

地下滴灌灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长发育的影响

孙章浩¹ 黄令淼^{1,2} 杨培岭^{1*} 邱流潮¹ 张艳霞¹

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 福建厦门龙岩山海协作经济区管理委员会, 福建 龙岩 364000)

摘要 为探明地下滴灌条件下灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长的影响, 采用3种灌水器流量(0.1、0.9和1.5 L/h)与2种灌水下限(试验地土壤田间持水量的80%和60%)的全因素试验, 分析不同试验处理对土壤水分分布及冬小麦生长的影响。结果表明: 试验处理下较高流量的地下滴灌灌溉水分下渗量较大, 使得40~80 cm土层土壤含水率提高, 较小流量的地下滴灌水分主要保存在上层土壤; 灌水下限为80%田间持水量较60%田间持水量能够促进冬小麦株高、叶面积指数、干物质积累量和产量的增加, 同时能够减缓灌浆期旗叶叶绿素含量的降低; 不同灌水器流量处理以0.9 L/h处理冬小麦叶面积指数最高, 提高灌水器流量能够减缓灌水下限为60%田间持水量处理下灌浆期旗叶叶绿素含量的降低。综合作物生长、产量及水分利用效率, 本试验条件下最优灌溉制度为, 灌水下限80%田间持水量, 灌水器流量0.9 L/h。

关键词 冬小麦; 地下滴灌; 土壤水分; 植株生长

中图分类号 S275.6

文章编号 1007-4333(2019)11-0041-10

文献标志码 A

Effect of lower irrigation limit and emitter flow on winter wheat growth under subsurface drip irrigation

SUN Zhanghao¹, HUANG Lingmiao^{1,2}, YANG Peiling^{1*}, QIU Liuchao¹, ZHANG Yanxia¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Management Committee of Xiamen Longyan Shanhai Cooperative Economic Zone, Longyan 364000, China)

Abstract To explore the influence of lower irrigation limit and emitter flow on winter wheat growth under subsurface drip irrigation, a full factor experiment was conducted with 3 emitter flow types (0.1, 0.9 and 1.5 L/h) and 2 lower irrigation limits (80% and 60% of field capacity in the test site). The effects of different experimental treatments on soil moisture distribution and winter wheat growth were analyzed. The results showed that, The higher flow subsurface drip irrigation had a large amount of water infiltration, which resulted in an increase in soil moisture content in 40-80 cm soil layer. The smaller flow subsurface drip irrigation water was mainly stored in the upper soil. The lower limit irrigation of 80% field capacity, compared with 60% field capacity, promoted the increase of plant height, leaf area index, dry matter accumulation and yield of winter wheat, and reduced the decrease of flag leaf Chlorophyll content during grain filling period. The leaf area index of winter wheat treated with 0.9 L/h under different flow treatments was the highest. Increasing the emitter flow rate could reduce the lowering of the Chlorophyll content under the lower irrigation limit of the 60% field capacity. Considering crop growth, yield and water use efficiency comprehensively, the optimal irrigation system under the conditions of this experiment is the lower limit irrigation of 80% field capacity and irrigation water flow rate of 0.9 L/h.

Keywords winter wheat; subsurface drip irrigation; soil moisture; plant growth

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 科技部国家科技支撑计划(2014BAD12B06)

第一作者: 孙章浩, 硕士研究生, E-mail: 15733223580@163.com

通讯作者: 杨培岭, 教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: yangpeiling@126.com

华北地区是我国小麦、玉米的优势产区^[1]。但由于水资源短缺,利用效率低及区域发展不协调的原因,农业用水不足已成为制约华北地区粮食产量的重要因素^[2-3]。地下滴灌能够将灌溉水直接输送到作物根区,减少了地表水分散失^[4],从而提高了水分利用效率。地下滴灌灌水器在土壤当中,其流量受到灌水器种类、工作压力^[5]及土壤结构^[6]的影响。目前大多数地下滴灌流量都在 1.0 L/h 以上,痕量灌溉作为一种新型地下滴灌技术,流量最小可以达到 0.1 L/h。目前对小流量地下滴灌的研究主要是室内入渗试验及模拟,一般认为小流量地下滴灌垂向湿润长度较长且湿润体内含水率较低^[7-9]。同时地下滴灌条件下土壤水分分布受到土壤质地的严重影响,使得不同土壤条件下小流量地下滴灌灌溉后土壤湿润情况不同^[10-11]。灌水器流量的降低,灌溉相同体积的水并获得相同深度和宽度的湿润区域需要更长的时间,从而可以减少灌溉水分渗漏量^[12];并且这种持续灌溉过程更符合植物的需水过程^[13],能够促进植物对水分的吸收,进而提高水分利用效率。

地下滴灌是一种高频灌溉,制定合理的灌溉制度能够有效的提高作物产量、品质和水分利用效率。国内外在马铃薯^[14-15]、玉米^[16-17]、番茄^[18-19]等作物的灌溉制度上做了很多研究,研究形成了一系列适应当地地方管理的灌溉模式。冬小麦是重要的粮食作物,其生长和产量的形成受到土壤水分的影响,适宜的水分环境能够促进小麦干物质质量的积累,提高产量^[20]。有的研究指出随着灌水下限的提高冬小麦生物产量与经济产量也随之提高,适宜的灌水下

限为:拔节期为当地土壤田间持水量的 70%,灌浆期为当地土壤田间持水量的 55%^[21-22]。地下滴灌相比于地表滴灌,在非充分灌溉条件下更能够提高冬小麦产量与水分利用效率^[23]。但对于流量小于 1.0 L/h 的地下滴灌,由于流量较小,在作物生长关键期,如小麦灌浆期,能否满足作物对于水分的需求,有待进一步研究^[24]。

基于国内外研究现状,目前小流量地下滴灌的研究主要集中在点源土壤水分运移规律,对于田间条件下滴灌制度和节水效果的研究较少。本研究拟采用不同灌水下限和灌水器流量的田间组合试验,探究小流量地下滴灌对土壤水分变化和作物生长的影响,旨在为当地冬小麦地下滴灌技术的发展提供科学依据。

1 材料及方法

1.1 试验材料

本试验于 2017 年 10 月—2018 年 6 月在中国农业大学通州试验站(北纬 39°42′6.93″,东经 116°41′2.31″)进行。前茬作物为春玉米。试验地为粉壤土,0~20 cm 土壤层有机质质量分数为 2.01%,全氮 1.76 g/kg、有效磷 22.75 mg/kg 与速效钾 150.17 mg/kg。供试冬小麦品种为良星 99,播前测定 0~80 cm 各土层田间持水率和容重,见表 1。2017 年 10 月 2 日播种,行距 15 cm,采用“1 管 4 行”布置方式。播种后对各小区统一灌溉 1 次,灌溉量 30 mm。基本苗 450 万株/hm²,于 12 月 1 日各小区统一灌溉越冬水,灌溉量 30 mm。2018 年 6 月 13 日统一收获。

表 1 试验地基础土壤参数

Table 1 Basic soil parameters of the test site

土层深度/cm Soil depth	容重/(g/cm ³) Volumetric weight	饱和导水率/(cm/s) Saturated hydraulic conductivity	田间持水量/% Field capacity	孔隙度 Porosity
0~20	1.42	2.99×10^{-5}	19.45	0.405 1
20~40	1.42	6.83×10^{-6}	17.35	0.405 1
40~70	1.38	6.50×10^{-6}	20.73	0.426 0
70~100	1.38	1.82×10^{-4}	20.86	0.260 0

1.2 试验方法

试验设计灌水下限与灌水器流量 2 个变量:灌

水下限设置 2 个处理,以 W_1 和 W_2 表示,对应灌水下限分别为试验地土壤田间持水量的 80%和 60%,

灌水上限为田间持水量；灌水器流量设置 3 个处理，以 F_1 、 F_2 和 F_3 表示，对应流量分别为 0.1、0.9 和 1.5 L/h。试验采取完全组合设计，试验方案见表 2。0.1 和 0.9 L/h 流量的滴灌带选取北京普泉公司生产的痕量带，1.5 L/h 流量的滴灌带选取 Netafim 公司生产的地下滴灌专用滴灌带。滴灌带统一埋深 15 cm，间距 60 cm。每个处理小区面积 30 m^2 ($3 \text{ m} \times 10 \text{ m}$)。按照当地推荐的冬小麦施肥量，磷肥与钾肥通过基肥一次性施入，总施用量 525 kg/hm^2 ，其中硫酸钾 150 kg/hm^2 ，磷酸二铵 375 kg/hm^2 ；冬小麦生育期追施尿素 2 次，分别于冬小麦拔节期和抽穗期随灌水追施，追肥量 215 kg/hm^2 。其他管理措施同大田生产。

1.3 统计分析

返青期后各处理试验开始，定期检测土壤含水率。当土壤含水量降至各处理灌水下限后实施灌溉，返青拔节、抽穗扬花及灌浆成熟 3 个生育阶段各处理计划湿润层深度分别取 30、60 和 60 cm。试验期灌溉情况见表 3；试验期间有效降雨量总计 158.7 mm。

表 2 冬小麦地下滴灌试验处理设计方案

Table 2 Design scheme for winter wheat subsurface drip irrigation test

处理 Treatment	灌水下限 ^① / % Lower irrigation limit	流量/(L/h) Flow
W_1F_1		0.1
W_1F_2	80	0.9
W_1F_3		1.5
W_2F_1		0.1
W_2F_2	60	0.9
W_2F_3		1.5

注：①灌水下限以试验地田间持水量的百分比计，%。
 W_1 、 W_2 分别表示灌水下限是田间持水量的 80% 和 60%； F_1 、 F_2 和 F_3 表示灌水器流量为 0.1、0.9 和 1.5 L/h。下表同。

Note: ① The design of the lower limit of irrigation is based on the percentage of water holding capacity in the field. W_1 and W_2 respectively indicate that the lower irrigation limit is 80% and 60% of the field water holding capacity, and F_1 , F_2 and F_3 indicate that the emitter flow rate is 0.1, 0.9 and 1.5 L/h, the same as follows.

表 3 试验期间不同处理灌溉量

Table 3 Different treatment irrigation volumes during the test

mm

处理 Treatment	灌溉日期 Irrigation date								灌溉总量 Total irrigation
	10-03	12-01	04-13	04-18	05-04	05-11	05-24	06-01	
W_1F_1	30	30	30	13	20	38	33	36	230
W_1F_2	30	30	30	13	16	41	26	35	221
W_1F_3	30	30	30	13	23	30	30	37	223
W_2F_1	30	30	0	34	0	51	0	39	184
W_2F_2	30	30	0	34	0	50	0	35	179
W_2F_3	30	30	0	34	0	48	0	38	180

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

返青期后每隔 7 d 用烘干法测定 0~80 cm 土壤含水率，取样时按照 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 分层取样，每个处理 3 个重复，灌溉前后 24 h 加测。

1.3.2 冬小麦生长指标

冬小麦返青期后每个生育阶段随机取样观测冬小麦的株高、叶面积和地上部分干物质积累量。各

处理每次取样 10 株观测株高和叶面积，株高采用精度 1 mm 的直尺测量；叶面积采用精度 1 mm 的塑料直尺测量植株每片完全展开时完整绿色叶片的长度和最大宽度，然后采用叶面积拟合公式^[25]（叶面积 = 叶长 × 叶宽 × 0.82）计算，通过单株叶面积和群体密度计算出叶面积指数(LAI)。旗叶叶绿素相对含量(SPAD)采用 SPAD-502 叶绿素仪测量，测定时间为开花后，每隔 7 天测定 1 次。测量时每个处理选取长势良好的 6 片冬小麦旗叶叶片进行冬小麦

叶绿素含量测量。冬小麦干物质积累测量时每个试验小区取一行 10 cm 长的冬小麦地上部分,按茎鞘、叶、穗分开。样品在鼓风干燥箱中 110 °C 杀青 30 min,然后在鼓风干燥箱 75 °C 条件下烘干至恒质量,用精度 0.01 g 的电子天平称量。用 Logistic 方程模拟冬小麦干物质积累量变化^[26]:

$$y = k/[1 + \exp(a - bt)]$$

式中: y 为冬小麦拔节后第 t 天干物质积累量, g ; t 为冬小麦拔节后天数, d ; k 为理论上冬小麦最大干物质积累量, g ; a 、 b 为待定系数。根据方程推导得到冬小麦干物质积累变化的几个特征值:冬小麦最快生长阶段开始时间 $t_1 = (a - 1.317)/b$, 结束时间 $t_2 = (a + 1.317)/b$, 干物质最大相对生长速率 $V_m = -bk/4$, 最大相对生长速率出现时间 $t_m = -a/b$ 。

1.3.3 产量及水分利用效率

成熟期每个处理分别选取 3 个地块测量产量,每个地块面积为 1 m²。测量时将 1 m² 地块的冬小麦割下计算穗数,选取 5 穗考察穗粒数,并计算每个处理地块小麦的千粒重,以其平均数计算各处理产量和千粒重,并计算水分利用效率。

灌溉水利用效率 = 经济产量 / 灌溉量

水分利用效率 = 经济产量 / 耗水量

1.3.4 数据分析

用 Excell 2010 进行数据处理及图形绘制,用 SPSS 统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤含水率变化

图 1 示出不同处理 0~80 cm 土壤含水率变化。0~10 cm 土层由于降雨与蒸发的影响,各处理土壤含水量出现明显的升降变化。3 种流量处理之间的差异表现在灌溉后土壤水分关系为 $F_3 > F_2 > F_1$,这种现象在 W_2 处理下更加明显。如 5 月 11 日灌溉后, W_2F_3 处理含水率提升至 29.33%, 而 W_2F_1 处理含水率仅为 22.37%, 两处理间含水率相差 5%。10~20 cm 土层是滴灌带埋设的深度,受到灌溉的影响,该层含水率基本在 22% 左右浮动,不同流量处理间变化趋势相近。随着土层深度的增加,40~80 cm 土层含水率曲线波动逐渐减小,3 种流量处理间含水率大小表现为 $F_3 > F_2 > F_1$ 。40~60 cm 土层 W_1F_3 处理平均含水率 25.62%, 与 W_1F_1 、 W_1F_2 处理相比分别提高 2.73%、1.55%; W_2F_3 处理平均含水率 26.45%, 与 W_2F_1 、 W_2F_2 处理相比分

别提高 3.80%、2.58%。60~80 cm 土层 W_1F_3 处理平均含水率 24.88%, 与 W_1F_1 、 W_1F_2 处理相比分别高出 2.78%、2.55%; W_2F_3 处理平均含水率 25.76%, 与 W_2F_1 、 W_2F_2 处理相比分别高出 3.95%、3.00%。同一流量的处理, W_1 、 W_2 处理由于灌溉频率与灌溉量的不同,产生一定的差异,具体表现为 W_1 处理下含水率曲线波动较为频繁,而 W_2 处理曲线波动幅度较大。

2.2 不同处理对冬小麦生长指标的影响

2.2.1 不同处理对冬小麦植株高度与叶面积指数的影响

冬小麦拔节后植株迅速生长,至开花期植株高度基本定型(图 2)。 W_1F_2 处理植株高度在 6 个处理中最高,与 W_1F_1 、 W_1F_3 、 W_2F_1 、 W_2F_2 、 W_2F_3 处理相比分别提高 3.33%、2.97%、8.77%、10.83%、11.86%。同一灌水下限,3 种流量处理之间株高没有明显差异;同一流量下,2 种灌水下限植株高度大小表现为 $W_1 > W_2$,显著性分析表明差异显著($P < 0.05$)。

冬小麦拔节期各处理叶面积指数大小基本一致,至孕穗期叶面积显著增大, W_1F_2 处理最高可达 6.02;孕穗期后叶面积指数逐渐减小,到成熟期各处理叶面积指数基本降低至同一水平。灌水下限处理对叶面积指数影响显著($P < 0.05$), W_1 处理叶面积指数在孕穗、开花、灌浆期 3 个时期较 W_2 处理平均提高 24.38%、24.65%、40.15%。随着流量的提高叶面积指数呈现先增加后减小的趋势,3 种流量处理间叶面积指数大小关系为 $F_2 > F_1 > F_3$ 。进一步分析试验处理对植株生长指标的影响,灌水下限对株高与叶面积指数的影响达到极显著性水平($P < 0.01$),流量处理对叶面积指数影响达到显著性水平($P < 0.05$)。

2.2.2 不同处理对冬小麦 SPAD 值的影响

随着灌浆期的进行,冬小麦叶片逐渐衰老,叶绿素含量逐渐下降。在 W_1 处理下 3 种流量处理 SPAD 值大小基本相同,显著性分析表明处理间显著不差异($P > 0.05$)。在 W_2 处理下自 5 月 18 日起 3 种流量处理 SPAD 值大小关系为 $W_2F_3 > W_2F_2 > W_2F_1$,至 6 月 1 日 3 处理间差异达到最高, W_2F_3 和 W_2F_2 处理 SPAD 值分别较 W_2F_1 处理增加 53.74% 与 24.91%,显著性分析表明在 5 月 18 日、5 月 25 日和 6 月 1 日 3 种流量处理间差异显著($P < 0.05$)。

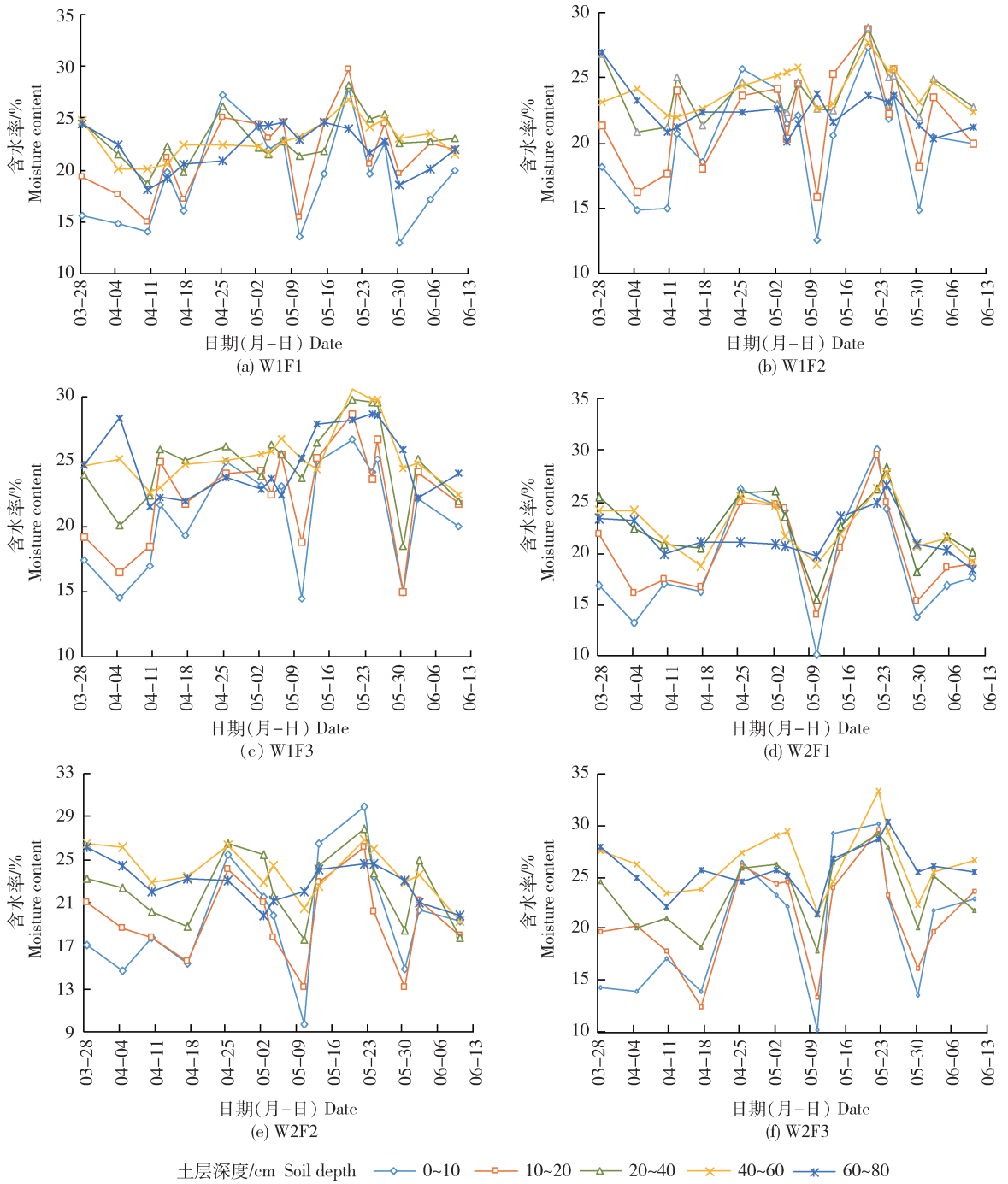


图 1 不同处理 0~80 cm 土壤体积含水率的变化

Fig. 1 Changes in volumetric water content of 0–80 cm soil in different treatments

2.2.3 不同处理对冬小麦干物质积累量的影响

冬小麦拔节期开始干物质积累量不断增加,孕穗期后干物质积累速度显著提高,至花后 20 d 干物质质量基本达到最高值(图 4)。成熟期 W₁ 处理干物质积累量高于 W₂ 处理 23.53%,显著性分析表明灌水下限处理对干物质积累量的影响达到显著性水

平($P < 0.01$)。同一灌水下限处理,3 种流量处理间干物质积累量大小基本相同,显著性分析表明流量处理对干物质积累量影响不显著($P > 0.05$)。

采用 Logistic 方程对冬小麦干物质积累过程进行拟合分析,拟合结果及干物质积累特征值见表 4。W₁ 处理较 W₂ 处理提高冬小麦干物质积累最大速

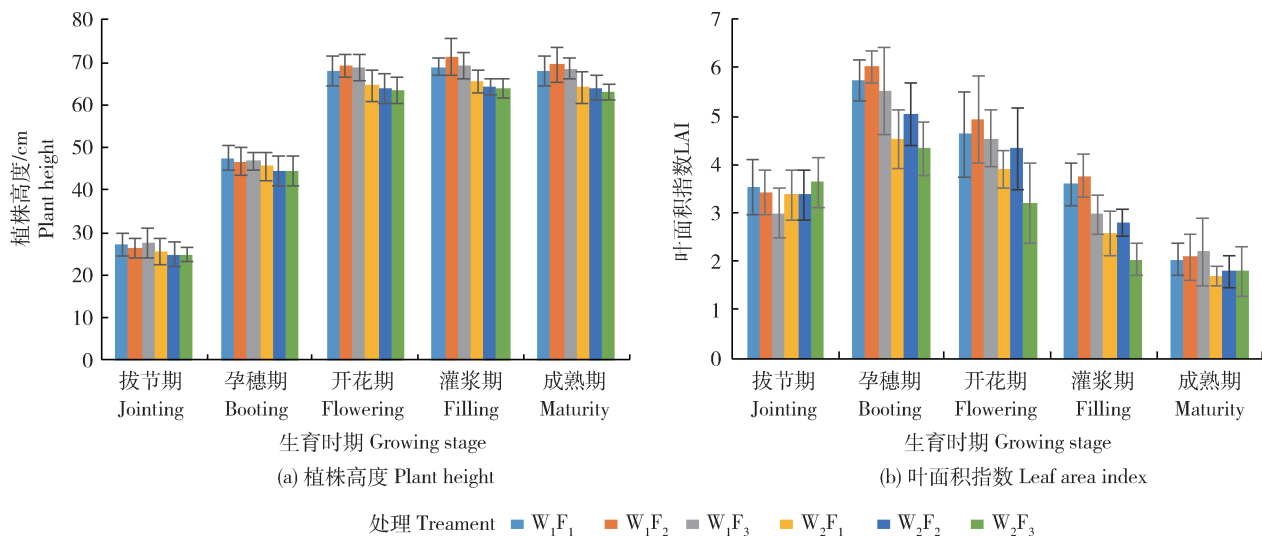


图 2 不同处理植株高度及叶面积指数的变化

Fig. 2 Plant height (a) and leaf area index (b) changes in different treatments

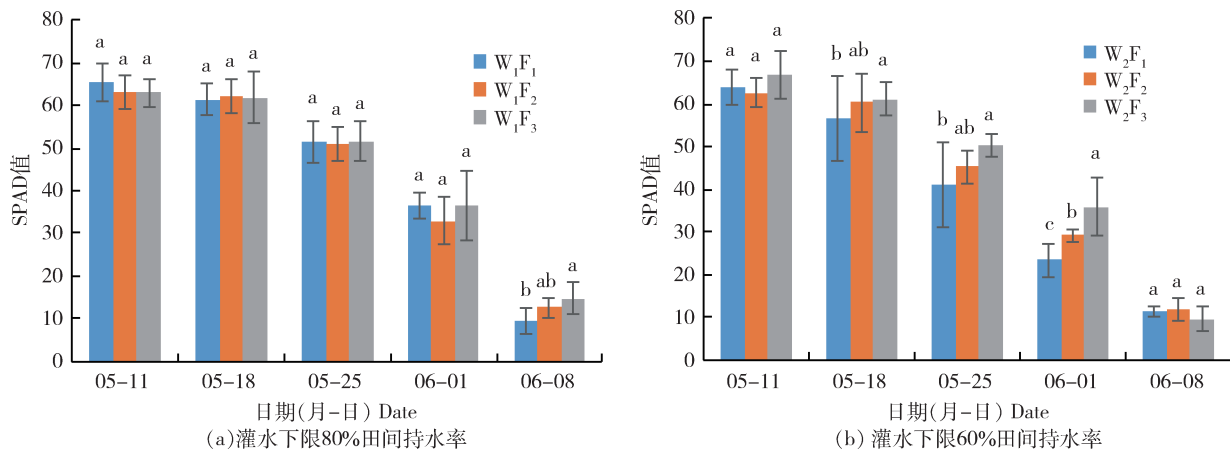


图 3 2种灌水下限不同流量处理 SPAD 值变化

Fig. 3 Changes in SPAD values for different flow treatments under the 2 lower irrigation limits (a) and (b)

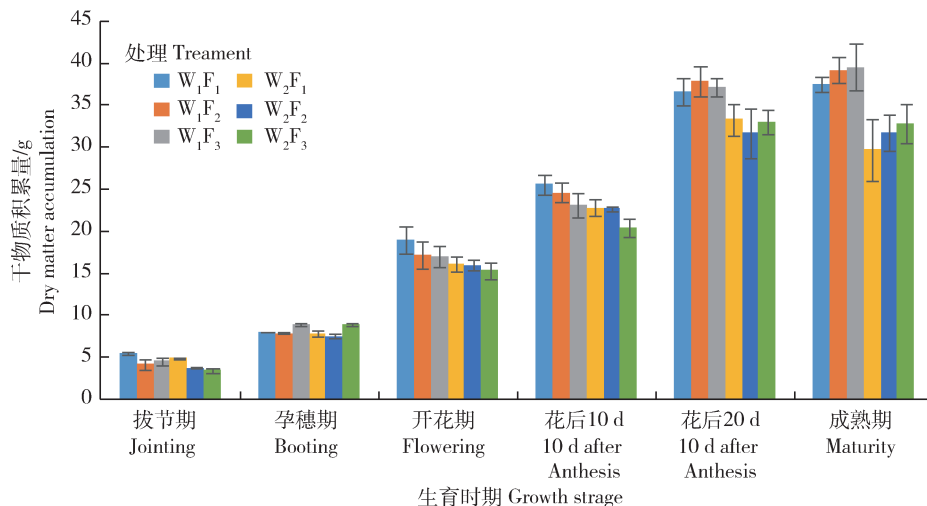


图 4 不同处理冬小麦干物质积累量

Fig. 4 Dry matter accumulation of winter wheat under different treatments

表 4 不同处理冬小麦干物质积累的 Logistic 模拟及特征值

Table 4 Logistic simulation and eigenvalues of dry matter accumulation in of winter wheat under different treatments

处理 Treatments	方程 Equation	$V_m/(g/d)$	t_m/d	t_1/d	t_2/d	$\Delta t/d$	R^2
W_1F_1	$y=39.1105/[1+\exp(2.3098-0.1180t)]$	1.154	19.58	9.66	30.74	21.08	0.9802
W_1F_2	$y=41.0076/[1+\exp(2.5635-0.1197t)]$	1.227	21.42	11.64	32.42	20.78	0.9833
W_1F_3	$y=41.7406/[1+\exp(2.3725-0.1069t)]$	1.115	22.20	11.25	34.52	23.27	0.9790
W_2F_1	$y=32.1399/[1+\exp(2.3475-0.1309t)]$	1.052	17.94	9.00	28.00	19.00	0.9577
W_2F_2	$y=33.0421/[1+\exp(2.3964-0.1259t)]$	1.040	19.03	9.74	29.49	19.75	0.9868
W_2F_3	$y=34.7408/[1+\exp(2.2894-0.1113t)]$	0.967	20.56	10.05	32.39	22.34	0.9691

注： t 表示冬小麦拔节后的天数； y 表示冬小麦干物质积累量； V_m 表示干物质最大增长速率， t_m 表示干物质最大速率出现的时间； t_1 和 t_2 分别为 Logistic 生长函数的 2 个拐点； Δt 表示干物质快速积累持续天数。

Note: t indicates the number of days after winter wheat jointing; y indicates the dry matter accumulation of winter wheat; V_m indicates the maximum growth rate of dry matter, t_m indicates the time when the maximum rate of dry matter appears; t_1 and t_2 are the two inflection points of Logistic growth function respectively; Δt indicates the rapid accumulation of dry matter for the number of days.

率(V_m)， W_1F_2 处理 V_m 最大为 1.227 g/d。3 种不同流量的处理，随着灌水器流量的降低干物质最大积累速率出现时间(t_1)提前， F_1 处理 t_1 平均为 9.33 d，与 F_2 、 F_3 处理相比分别提早 1.36、1.33 d；而高灌水器流量的处理一定程度上会延长干物质积累快速积累时间(Δt)。 W_1F_3 处理较 W_1F_1 、 W_1F_2 处理 Δt 分别延长 2.19、2.49 d， W_2F_3 处理较 W_2F_1 、 W_2F_2 处理分别延长 3.34、2.59 d。

2.3 不同处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

不同处理产量、产量构成指标及水分利用效率见表 5。 W_1 处理较 W_2 处理平均增产 13.17%，显

著性分析表明灌水下限对产量的影响达到显著性水平($P<0.05$)，而流量处理对产量的影响不显著。分析产量构成指标， W_1 处理较 W_2 处理提高了单位面积穗数，显著性分析表明灌水下限对冬小麦穗数影响显著($P<0.01$)。分析不同处理间水分利用效率可知， W_2 处理较 W_1 处理提高了灌溉水利用效率，显著性分析表明灌水下限对灌溉水利用系数影响显著($P<0.01$)。水分利用效率 W_1F_2 处理最高为 2.00 kg/m²，各处理间差异不显著。综合分析， W_1F_2 与 W_1F_3 处理产量最高，灌溉水利用效率同为 3.77 kg/m²，水分利用效率分别为 2.00 和 1.97 kg/m²。

表 5 冬小麦产量及水分利用效率

Table 5 Winter wheat yield and water use efficiency

处理 Treatment	穗数/ (10 ⁴ /hm ²) Spike number	穗粒数 No. of grains per spike	千粒重/g 1 000-grain weight	产量/ (kg/hm ²) Yield	灌溉水利用效率/ (kg/m ³) IWUE	水分利用效率/ (kg/m ³) WUE
W_1F_1	579 a	28 b	50.05 a	8 123.43 ab	3.53 b	1.97 a
W_1F_2	521 b	32 a	50.66 a	8 328.44 a	3.77 ab	2.00 a
W_1F_3	510 b	33 a	50.16 a	8 404.21 a	3.77 ab	1.97 a
W_2F_1	498 b	29 b	50.09 a	7 194.99 c	3.91 ab	1.90 a
W_2F_2	439 c	34 a	49.76 a	7 325.55 c	4.09 a	1.92 a
W_2F_3	498 b	30 ab	49.33 a	7 443.10 bc	4.14 a	1.93 a

注：每列数字后相同字母表示显著性在 0.05 水平无显著性差异。

Note: Same letters within same column indicate that there are no significant differences at the 0.05 level.

3 讨论

地下滴灌是一种新型节水灌溉技术,不同灌溉参数(流量、灌水下限)会造成水分在土层剖面上出现差异,进而影响灌溉效果^[27,28]。小流量的地下滴灌水分主要存留在主要根系层,防止了无效的水分蒸发与渗漏。本研究结果显示随着土层深度的提高,40~80cm 土层土壤含水率表现出 $F_3 > F_2 > F_1$ 的趋势, F_3 较 F_2 、 F_1 处理 40~60 cm 与 60~80 cm 土层含水率分别提高 2.42%、3.42%。在灌溉量基本相同的情况下,持续的低流量灌溉不会造成土壤含水率显著的提高,且水分主要保留在滴灌带主要埋设深度;较大流量会造成水分大量下渗,造成下层土壤含水率提高。

土壤水分状况会影响冬小麦的生长情况,适宜的土壤水分能够促进冬小麦生长^[29]。研究指出叶面积易受到水分供应的影响,提高灌水量能够提高叶面积指数^[30]。本研究结果显示在促进冬小麦植株及叶片的生长,提高植株高度和叶面积指数方面, W_1 处理要优于 W_2 。随着地下滴灌流量的降低,冬小麦叶面积指数呈现先增加后减小的趋势,适宜提高叶面积指数的地下滴灌流量为 F_2 。这可能是由于较小流量的灌水器流量能够将水分保持在作物根区,促进作物的吸收,减小水分渗漏。水分状况能够影响生育后期旗叶叶绿素含量,且 SPAD 值能够较好的反应冬小麦叶绿素含量^[31]。本试验结果显示在 W_2 处理下,3 种流量处理 SPAD 值大小关系为 $W_2F_3 > W_2F_2 > W_2F_1$,提高灌水器流量能够提高旗叶叶绿素含量,缓解叶片衰老。有的研究指出小流量的滴灌系统可能在作物关键生育期的供水不足^[13],本试验结果显示在 W_2 处理下这一情况显著。 W_2 处理灌水下限较低, F_2 、 F_3 处理能够迅速将所需灌溉水量提供到作物根区土壤,迅速提高土壤水分;而 F_1 处理则需要较长时间,土壤含水率一直处于一种较稳定状态。植物叶片对土壤水分条件较敏感^[32],由此造成 W_1F_1 处理相对于 W_1F_2 、 W_1F_3 处理 SPAD 值较小。

冬小麦干物质积累量是产量形成的基础,提高灌溉量能够提高干物质积累量,促进产量的提高。也有研究指出给与作物一定的水分胁迫能够促进光合物质向关键部位转化,对产量有一定补偿作用^[34]。本试验结果显示 W_1 较 W_2 处理能够提高干物质积累量;不同流量处理地下滴灌干物质积累量

大小基本相同,而小流量的处理能够提早干物质快速积累时间。究其原因可能是小流量处理根区土壤水分稳定,有利于冬小麦生育早期干物质积累。提高灌溉量能够提高作物产量^[35],本试验中也显示出 W_1 处理产量高于 W_2 处理,平均提高 946.15 kg/hm²。提高灌水下限能够促进单位面积成穗数的增加,进而提高作物产量。流量对作物产量的影响不显著。综合作物生长、产量与水分利用效率, W_1F_2 是试验条件下较优的灌溉模式。 W_1F_2 处理能够促进植物生长指标的提高、减缓植物的衰老,获得较高的产量,同时能够减少水分大量下渗,促进水分利用效率的提高。

4 结论

本研究采用不同灌水下限与不同流量的冬小麦灌溉试验,分析了地下滴灌条件下灌水下限与流量对土壤水分分布和冬小麦生长的影响,主要结论如下:

1)增加灌水器流量可使得 40~80 cm 土层含水率的提高,小流量的地下滴灌水分主要保留在主要根系层。

2)灌水下限 80%田间持水量较 60%田间持水量促进了植株高度、叶面积指数以及干物质量的提高,并且促进了灌浆期旗叶叶绿素含量的提高,减缓叶片衰老,提高单位面积成穗数及作物产量。

3)流量处理主要影响叶片的生长,随着流量的提高叶面积指数呈现先增加后减小的趋势,0.9 L/h 处理下叶面积指数最高;在灌水下限 60%田间持水量处理下,提高灌水器流量能够提高旗叶叶绿素含量,减缓叶片衰老。

4)综合作物生长、产量及水分利用效率,试验条件下最优灌溉制度为,灌水下限 80%田间持水量,灌水器流量为 0.9 L/h。

参考文献 References

- [1] 周祖昊,杨波,刘海振,邵薇薇,曹小磊. 华北地区农业用水影响因素与保障对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(8):24-27
Zhou Z H, Yang B, Liu H Z, Shao W W, Cao X L. Study on the influencing factors and security countermeasure of agricultural water in north China[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(8):24-27 (in Chinese)
- [2] 王梦然,马振兴. 华北地区农业用水效率分析[J]. 南方农业, 2014,8(27):78-80

- Wang M R, Ma Z X. Analysis of agricultural water use efficiency in North China[J]. *South China Agriculture*, 2014, 8 (27): 78-80 (in Chinese)
- [3] 莫兴国, 夏军, 胡实, 林忠辉. 气候变化对华北农业水资源影响的研究进展[J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 189-192
- Mo X G, Xia J, Hu S, Lin Z H. Influences of climate changes on agricultural water resources in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2016, 38(3): 189-192 (in Chinese)
- [4] Romero P, Botia P, Garcia F. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1-2): 169-181
- [5] 白丹, 宋立勋, 王晓愚, 李永川, 杨坤, 付嘉. 地下滴灌灌水器流量和压力关系的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 189-191
- Bai D, Song L X, Wang X Y, Li Y C, Yang K, Fu J. Experiment on relationship between flow and pressure of subsurface drip irrigation emitter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(8): 189-191 (in Chinese)
- [6] Lazarovitch N, Shani U, Thompson T L, Warrick A W. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation systems[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(6): 531-536
- [7] 王超, 李援农. 地下滴灌条件下湿润体特性的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 38-40
- Wang C, Li Y N. Experimental research on soil wetting front infiltration of subsurface drip irrigation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2011(3): 38-40 (in Chinese)
- [8] 岳海英, 李援农. 滴灌土壤湿润体含水率分布规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 137-139
- Yue H Y, Li Y N. Experimental study on distribution rule of soil moisture in wetting front under drip irrigation[J]. *Journal of irrigation and drainage*, 2010, 29(2): 137-139 (in Chinese)
- [9] 孙连宝, 罗金耀, 李小平. 流量对地下滴灌土壤水分运动的影响研究[J]. 节水灌溉, 2012(9): 41-44
- Sun L B, Luo J Y, Li X P. Effects of dripper discharge on soil: Water movement under subsurface drip irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(9): 41-44 (in Chinese)
- [10] 李道西, 彭世彰. 地下滴灌灌水设计参数对土壤水分分布影响的计算机模拟[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5): 507-509
- Li D X, Peng S Z. Computer simulation on soil water movement under the condition of different irrigation design parameters in subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5): 507-509 (in Chinese)
- [11] 李久生, 杨风艳, 栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 25-31
- Li J S, Yang F Y, Li Y F. Water and nitrogen distribution under subsurface drip fertigation as affected by layered-textural soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 25-31 (in Chinese)
- [12] Elmaloglou S, Diamantopoulos E. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1-2): 160-163
- [13] Poh, Bee L. Reducing drip irrigation operating pressure for reducing emitter flow rate and improving irrigation management[J]. Florida, USA: University of Florida, 2010
- [14] Saidi E, Kassab O M, Okasha E M. Effect of drip irrigation systems, water regimes and irrigation frequency on growth and quality of potato under organic agriculture in sandy soils[J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2010, 4 (9): 4131-4141
- [15] Smajstrla A G, Locascio S J, Weingartner D P, Hensel D R. Subsurface drip irrigation for water table control and potato production[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16 (3): 225-229
- [16] Payero J O, Tarkalson D D, Irmak S, Davison D, Petersen J L. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(8): 895-908
- [17] Sampathkumar T, Pandian B J, Rangaswamy M V, Manickasundaram P, Jeyakumar P. Influence of deficit irrigation on growth, yield and yield parameters of cotton-maize cropping sequence [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 130: 90-102
- [18] 诸葛玉平, 张玉龙, 张旭东, 冯永军, 李军, 黄毅, 刘鸣达. 塑料大棚渗灌灌水下限对番茄生长和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 761-777
- Zhuge Y P, Zhang Y L, Zhang X D, Feng Y J, Li J, Huang Y, Liu M D. Effects of lower limit of subsurface drip irrigation on tomato growth and its yield in plastic tunnel [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (5): 767-771 (in Chinese)
- [19] 古君, 牛文全, 吕望, 李元, 梁博惠, 郭丽丽. 灌水下限与毛管埋深对温室番茄生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (5): 698-707
- Gu J, Niu W Q, Lv W, Li Y, Liang B H, Guo L L. Effects of irrigation threshold and lateral depth on tomato growth in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (5): 698-707 (in Chinese)
- [20] Tambussi E A, Nogués S, Araus J L. Ear of durum wheat under water stress: Water relations and photosynthetic metabolism[J]. *Planta*, 2005, 221(3): 446-458
- [21] 李锡录, 杜贞栋, 王昕. 冬小麦适宜土壤水及灌水下限指标研究[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(S1): 116-120
- Li X L, Du Z D, Wang X. Study on optimal soil water for winter wheat and lower limit targets of irrigation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1997, 2(S1): 116-120 (in Chinese)
- [22] 张奇阳, 孙景生, 肖俊夫, 李晓东, 刘小飞, 申孝军. 灌水控制下限对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 387-391

- Zhang J Y, Sun J S, Xiao J F, Li X D, Liu X F, Sheng X J. Effects of irrigation low limits on yield and water use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11): 387-391 (in Chinese)
- [23] 王建东, 龚时宏, 高占义, 邹慧, 于颖多. 滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 68-73
- Wang J D, Gong S H, Gao Z Y, Zou H, Yu Y D. Effects of drip irrigation mode on spatial distribution of soil water and nitrogen and winter wheat yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 68-73 (in Chinese)
- [24] 张志新. “痕量”无法灌溉; 对“痕量灌溉”的思考[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 1-4
- Zhang Z X. ‘Trace quantity irrigation’ is impossible; Thinking about ‘Trace quantity irrigation’ [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(18): 1-4 (in Chinese)
- [25] 赛力汗·赛, 张永强, 薛丽华, 梁玉超, 雷钧杰, 陈兴武, 王志敏. 新疆滴灌冬小麦灌溉量对产量形成与水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 30-40
- Sailihan · Sai, Zhang Y Q, Xue L H, Liang Y C, Lei J J, Cheng X W, Wang Z M. Effects of different drip irrigation amount on yield formation and water use of winter wheat in Xinjiang [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(8): 30-40 (in Chinese)
- [26] 雷钧杰, 张永强, 赛力汗·赛, 薛丽华, 梁玉超, 张宏芝, 陈兴武, 王志敏. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1078-1086
- Lei J J, Zhang Y Q, Sailihan · Sai, Xue L H, Liang Y C, Zhang H Z, Cheng X W, Wang Z M. Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, distribution and translocation of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(8): 1078-1086 (in Chinese)
- [27] Huang L M, Yang P L, Ren S M, Cui H B. Effects of continuous and pulse irrigation with different nitrogen application on soil moisture, nitrogen transport and accumulation in root systems [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(5): 139-149
- [28] 蒋桂英, 刘建国, 魏建军, 刁明. 灌溉频率对滴灌小麦土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 38-42
- Jiang G Y, Liu J G, Wei J J, Diao M. Effects of continuous irrigation frequency on soil water distribution and water use efficiency in wheat field under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(4): 38-42 (in Chinese)
- [29] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 周涌, 金轲, 郭世昌, 王自力, 王书子. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 67-74
- Cheng X G, Wang D S, Zhang M R, Zhou Y, Jin K, Guo S C, Wang Z L, Wang S Z. Effects of different soil moisture conditions on winter wheat growth and nutrient uptake [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(4): 67-74 (in Chinese)
- [30] 吕廷波, 杨海梅, 辛明亮. 土壤水分下限对滴灌春小麦生长和产量的影响研究[J]. 节水灌溉, 2013(6): 43-44, 47
- Lü T B, Yang H M, Xin M L. Influence of low limit of soil moisture on growth and yield of wheat under drip irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(6): 43-44, 47 (in Chinese)
- [31] 位国峰, 刘义国, 姜雯, 张洪生, 林琪, 赵长星. 不同滴灌制度对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响. 华北农学报, 2013, 28(5): 149-156
- Wei G F, Liu Y G, Jiang W, Zhang H S, Lin Q, Zhang C X. Effects of different drip irrigation system on photosynthesis characteristics and water use efficiency of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(5): 149-156 (in Chinese)
- [32] 刘晓英, 罗远培, 石元春. 水分胁迫后复水对冬小麦叶面积的激发作用[J]. 中国农业科学, 2001, 34(4): 422-428
- Liu X Y, Luo Y P, Shi Y C. The stimulating effects of rewatering in subjecting to water stress on leaf area of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(4): 422-428 (in Chinese)
- [33] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Pei D, Wang Y M. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat [J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1-10 (in Chinese)
- [34] 陈晓远, 罗远培. 土壤水分变动对冬小麦干物质分配及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(1): 96-103
- Chen X Y, Luo Y P. Effect of fluctuated soil water condition on dry matter allocation and grain yield in winter wheat [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(1): 96-103 (in Chinese)
- [35] 姜东燕, 于振文. 灌溉量对冬小麦产量和土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 703-705
- Jiang D Y, Yu Z W. Effects of irrigation rate on the yield of wheat and the content of soil nitrate [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 703-705 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春