

马青荣,刘荣花,胡程达,等,2020.干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J].气象,46(7):971-981. Ma Q R, Liu R H, Hu C D, et al, 2020. Impacts of drought and irrigation on root and yield of winter wheat[J]. Meteor Mon, 46(7):971-981 (in Chinese).

干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究*

马青荣^{1,2} 刘荣花^{1,2} 胡程达^{1,2} 王红振³ 余辉³ 王艳玲³

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

2 河南省气象科学研究所, 郑州 450003

3 郑州市气象局, 郑州 450003

提 要: 在郑州农业气象试验站开展不同程度干旱、灌溉试验,研究了不同水分条件对冬小麦根系活力、形态及产量的影响。结果表明,干旱条件下,冬小麦根系活力和根直径均有明显的降低,根长有明显增加,土壤下层所占根系总体积比例增大,且随着发育期的推进,下层根系所占比例呈现增大的趋势,水分利用效率有明显提高;随着干旱程度的增加,上述变化趋势更加明显。在灌溉量相同的情况下,越冬期灌溉,有利于冬小麦根系活力和根直径增加,但不利于根系的向下伸展;返青期和拔节期灌溉有利于根系向下伸展、水分利用效率提高、理论产量增加,但不利于根系活力和直径的增加;拔节期灌溉,可适当增大灌溉量,减少灌溉次数,以提高水分利用效率。综合根系形态和活力、水分利用效率及产量,在冬小麦干旱持续发生条件下,在返青期、孕穗期灌水 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,可根据干旱程度适当增减灌水量,重旱条件下适当增加灌水次数,少量多灌缓解旱情,而重大干旱年份灌水困难条件下可只在拔节期灌水 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,以实现产量的减损和节水效果。

关键词: 冬小麦,干旱,灌溉,水分利用效率,产量

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.009

Impacts of Drought and Irrigation on Root and Yield of Winter Wheat

MA Qingrong^{1,2} LIU Ronghua^{1,2} HU Chengda^{1,2} WANG Hongzhen³ YU Hui³ WANG Yanling³

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003

3 Zhengzhou Meteorological Bureau, Zhengzhou 450003

Abstract: By carrying out different degrees of drought, rehydration test at Zhengzhou Agricultural Meteorological Experimental Station, we studied the effects of different water conditions on the root vigor morphology and yield of winter wheat, to establish an optimized irrigation system for winter wheat in Henan Province, improve water use efficiency and achieve the goal of water saving and yield increasing. The results showed that under drought conditions, the root vigor and stem diameter of winter wheat decreases significantly, but the root length increases significantly, and the proportion of lower soil roots volume increases. In addition, with the development of the growth stages, the proportion of the lower soil roots volume increases, and the water use efficiency improves significantly. Along with the increase of drought degree, the above trend is more obvious. In the case of same amount of water recovery, overwintering irrigation is beneficial to the increase of root vigor and root diameter of winter wheat, but unfavorable for roots

* 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室科学研究基金项目(AMF201501)和公益性行业(气象)科研专项(GY-HY201506001-3、GYHY201106042)共同资助

2019年3月4日收稿; 2020年2月9日收修定稿

第一作者:马青荣,主要从事农业气象灾害研究. E-mail: zzmqr@163.com

通讯作者:刘荣花,主要从事农业气象研究. E-mail: liurongh@126.com

to extend downward. In the greening and jointing stages, irrigation is good for the roots stretching down, water use efficiency, grain weight and theoretical increase of yield, but not conducive to the increase of root vigor and diameter. For the purpose of improving water use efficiency, it is appropriate to increase irrigation volume and reduce the times of irrigation. Comprehensive analysis of root morphology and vitality, water use efficiency and yield shows that under the condition of persistent drought in winter wheat, irrigation is about $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ at the turning green stage and booting stage, so the amount of irrigation can be increased or decreased appropriately according to the degree of drought. Irrigation times can be increased appropriately under severe drought conditions. In severe drought years, under difficult irrigation conditions, only $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ can be irrigated at jointing stage to achieve the loss reduction of yield and water saving effect.

Key words: winter wheat, drought, irrigation, water use efficiency, yield

引 言

全球每年由干旱导致的经济损失达 60 亿~80 亿美元(Wilhite, 2000; 金燕等, 2018)。随着全球气候变暖加剧, 极端气候事件频发, 全球干旱有进一步加重的趋势(秦大河, 2007; 廖要明和张存杰, 2017)。20 世纪 60 年代以来, 黄淮海地区出现了气温升高、降水减少的气候变化特点, 水资源短缺已成为制约该地区农业生产可持续发展的关键因子(徐建文等, 2014; 周悦等, 2016); 另一方面, 由于灌溉水有效利用率低, 仅为 40% 左右(周凌云, 1993; 刘玉芝等, 2018), 水资源浪费严重。因此, 发展节水农业是农业可持续发展和缓解水资源供需矛盾的根本措施, 其中提高作物水分利用效率已成为迫切需要解决的关键热点问题(薛丽华等, 2010; 马柱国等, 2018)。

冬小麦是黄淮海地区一种主要粮食作物, 中国大部分麦区尤其是北方地区冬小麦生长季内降水量偏少, 灌溉是保证冬小麦高产稳产的主要措施之一。因此, 要实现冬小麦节水高产的目标, 必须要建立完善的节水灌溉制度(刘坤等, 2003)。作物对土壤水分的利用状况取决于不同土层中的根系分布、吸水速率及土壤有效水含量, 其中根系分布与土壤水分的吸收和产量的提高有着密切关系(Clothier and Green, 1994; Rasse and Smucker, 1998; 王连喜等, 2003)。研究表明, 在水分亏缺条件下, 限量供水可以增加土壤深层贮水的利用效率(夏国军等, 2001), 冬小麦生长前期水分亏缺利于根系生长发育, 强化根系的吸水能力, 提高对 1~2 m 深层水分的利用, 利于产量形成(刘庚山等, 2003); 如果生长后期供水不足, 小麦中下部根系不能发挥作用, 反而对小麦生

长不利(李凤民等, 2001)。目前, 大部分的研究主要集中在灌水量和灌水时期对根系和产量的影响(薛丽华等, 2010; 王俊儒和李生秀, 2000)。对于不同干旱程度下、不同发育期定量灌溉对根系的研究相对较少, 且大部分研究都是利用根钻取样, 对根系形态影响较大。由于冬小麦生育前期水分的亏缺程度对其根系的影响较大(苗果园等, 1989; 曹雯等, 2019), 因此本试验在冬小麦生育前期通过限量供水的方式来调节根系的形态和布局, 以提高冬小麦总体水分利用效率; 同时测定不同干旱程度、不同时期(越冬、返青、拔节和孕穗期)灌溉对根系活力、形态特征、产量以及水分利用效率的影响, 以期为冬小麦高产节水栽培和提高抗灾减灾能力提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验在郑州农业气象试验站冬小麦-夏玉米轮作区进行, 土壤为沙壤土, 肥力中等。供试作物为当地主栽品种(矮抗 58)。试验分别于 2015 年 10 月至 2016 年 6 月和 2016 年 10 月至 2017 年 6 月两年进行。试验小区的管理措施(水分管理除外)均与大田一致, 以减少外界环境因子的影响。

1.2 试验设计

每个小区为 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的水泥池。试验利用自动防雨棚遮挡、人工测墒和定量浇水的方法实现水分的有效控制。本试验干旱程度设为适宜(作对照 CK)、轻旱、重旱 3 个处理水平, 干旱复水时期设越冬期、拔节期复水, 返青期、孕穗期复水, 拔节期复水

和不复水4个处理方法,共9个处理方法(表1)。整个试验时期,土壤水分相对湿度波动范围为 $[-5\%, 5\%]$ 。各试验小区逢3逢8人工测墒,土壤相对湿度低于处理水平5%时,根据小区面积和土

壤相对湿度按照0~50 cm土层需水量适时灌水(多次少量灌水),定量灌溉处理在发育普遍期时增加灌水60 mm($600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),具体灌水量见表2。

表1 冬小麦在不同干旱程度下,不同发育期水分控制试验设计
Table 1 Experiment design of water control in different development stages of winter wheat at different drought degrees

处理方法	水分条件	灌水次数	灌溉时期	灌溉量	备注
CK	适宜				CK 全生育期保持土壤相对湿度在70%~80%
T1					T1 全生育期保持土壤相对湿度在60%
T2	轻度干旱	2	越冬期、拔节期	每次60 mm	T2、T3 在 T1 基础上增加2次60 mm复水量
T3		2	返青期、孕穗期		
T4		1	拔节期		
T5					T4 在 T1 基础上增加1次60 mm复水量 T5 全生育期保持土壤相对湿度在40%
T6	重度干旱	2	越冬期、拔节期	每次60 mm	T6、T7 在 T5 基础上增加2次60 mm复水量
T7		2	返青期、孕穗期		
T8		1	拔节期		

表2 各处理方法下冬小麦不同生育时期的灌水量(单位:mm)

Table 2 Total irrigation amount of different treatment methods of winter wheat at different growth stages (unit: mm)

处理方法	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	开花-乳熟期	全生育期
CK	91.6	37.5	56.8	50.6	163.2	399.7
T1	23.6	27.3	40.9	18.4	93.6	203.8
T2	83.6	27.3	100.9	18.4	93.6	323.8
T3	23.6	87.3	40.9	78.4	93.6	323.8
T4	23.6	27.3	100.9	18.4	93.6	263.8
T5	9.1	9.1	13.6	26.6	54.6	113.0
T6	69.1	9.1	73.6	26.6	54.6	233.0
T7	9.1	69.1	13.6	86.6	54.6	233.0
T8	9.1	9.1	73.6	26.6	54.6	173.0

1.3 观测项目

1.3.1 根系活力的测定

根系取样时,在试验小区中挖取15 cm×15 cm×30 cm的根系土柱,放入盛有自来水的桶中,然后用水流缓慢将根冲洗干净,并用吸水纸将根表面的水分吸干,最后将整个根系剪碎,混合后随机取样。其活力采用TTC比色法测定(李合生,2003)。

1.3.2 根系形态指标的测定

采用CI-600根系测量系统原位测量根系参数。测量时将扫描探头插入预先埋在土壤中的透明根管中,利用扫描探头自动旋转扫描根管壁上的根系剖面图像。得到不同深度的根系图像,以及不同根系(不同根管)的图像。然后利用图像分析软件分析根系剖面图像,得到冬小麦根系(0~80 cm)的体积、根

直径等相关参数。

1.3.3 土壤水分的测定

土壤水分测定主要是人工取土,通过烘干法进行测定。

水分利用效率根据 $WUE = Y/TET$ 计算,其中: WUE 为水分利用效率(单位: $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y 为作物产量(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); TET 为作物整个生长季的总耗水量(单位:mm)。

1.3.4 产量及构成要素的测量

产量及构成要素的测量,依据《农业气象观测规范》(国家气象局,1993)进行观测。

1.4 数据分析和处理方法

利用Excel进行数据分析和作图,利用SPSS19.0进行相关性分析和平均数差异显著性水平检验。

2 结果分析

2.1 不同干旱程度对冬小麦根系的影响

2.1.1 对根系活力的影响

从冬小麦在不同水分处理下,不同发育期根系活力的变化(表 3)上看,不同水分处理冬小麦根系活力均呈现先升高后降低的变化趋势。具体表现为:T5 处理在拔节期根系活力达到最大值,而其余处理均是在孕穗期根系活力达到峰值,不同水分处理均较 CK 组均有不同程度的降低,差异均通过显著性水平检验($P < 0.05$);从孕穗到灌浆期,根系活力快速下降,灌浆期其根系活力值总体上为峰值的

70%左右,而后又呈现缓慢的下降趋势;在冬小麦乳熟期,所有处理组较 CK 均有明显下降,其余处理均呈现了不同程度的降低,差异均通过显著性水平检验($P < 0.05$)。综上所述,冬小麦根系活力在随着发育期推进而改变的同时,水分条件处理得越好,根系活力越强,同时还受灌溉时段的影响。

从全生育期来看,水分条件适宜的 CK 根系活力表现最强,轻度干旱灌溉 2 次的 T3、T2 次之,重度干旱灌溉 2 次的 T6、T7 和轻度干旱灌溉 1 次的 T4 表现一般,轻度干旱的 T1 和重度干旱灌溉 1 次的 T8 较弱,重度干旱不灌溉的 T5 表现最弱。9 个处理方法表现顺序与表 1 中全生育期灌水量排序基本一致,灌水量越多,根系活力越强,灌水量越少,根系活力越弱。

表 3 冬小麦在不同水分处理下,不同发育期根系活力(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)的变化

Table 3 Variation of root activity of winter wheat at different water treatment and different growth stages (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

处理方法	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	灌浆期	乳熟期
CK	39.41	68.76	109.52	165.28	116.76	106.32
T1	36.73*	67.12	86.69*	122.56*	73.29**	43.28**
T2	38.51	73.63	112.75	149.83	111.31	78.63*
T3	36.73*	73.63	123.75*	147.83*	105.31*	74.18*
T4	36.73*	67.12	106.75	129.83*	95.31*	63.17**
T5	32.64**	49.97**	72.48**	62.31**	41.78**	31.57**
T6	37.18	64.62	113.83	132.73*	99.26*	52.39**
T7	32.64**	58.57*	110.97	131.73*	92.31*	50.62**
T8	32.64**	49.97**	91.83*	119.73**	82.26**	46.91**

注:处理组仅与 CK 比较差异性;冬小麦根系活力测量时采用新鲜根样品;* 和 ** 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验,下同。

Note: Treated groups were only compared with the CK groups; Fresh root samples were used to measure root activity of winter wheat;

* and ** are significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below.

2.1.2 对根直径的影响

由冬小麦在不同水分条件下,不同发育期根直径的变化状况(表 4)可见,冬小麦的根直径总体上呈现先增加后降低的变化趋势。具体表现为:冬小麦根直径从越冬期开始逐渐增加,在返青期或拔节期达到最大,而后逐渐减小;其中 T1 和 T7 处理根直径最大值均出现在返青期,其余处理冬小麦根直径峰值出现在拔节期。出现这种状况的主要原因可能是从越冬期到拔节期为冬小麦生长的前期,此阶段为冬小麦根系快速生长时期,因此根的直径不断增大,利于根系向下发展。根直径最大的是 CK 处理组,最小的是 T5 处理组,其余处理均表现为随土壤水分的增加,根直径增大。不同时期、不同干旱胁迫下冬小麦灌溉处理根直径均有不同程度的增加,且灌溉越早冬小麦的根直径就越大。冬小麦根从孕

穗到乳熟期,其直径呈下降趋势。上述研究表明根系直径变化主要受发育期推进的影响,在此过程中又受到水分条件的制约。

2.1.3 根长度的变化状况

由冬小麦在不同水分条件下,不同发育期根长度的变化状况(表 5)可见,冬小麦的根长总体上呈现持续增加的变化趋势,随发育期推进,增加幅度由大到小。具体表现为:冬小麦根长从越冬期到返青期冬小麦根长增加幅度较大,其实并不是其生长速度较快,而是生长的时间较长;根系生长速度最快的发育期是拔节期—孕穗期,而冬小麦灌浆期—乳熟期根系长度变化幅度较小。T5 处理根系长度最大,CK 处理根系长度最小,冬小麦不同发育期根系长度均随土壤湿度的增加而减小。不同时期、不同干旱胁迫下冬小麦定量灌溉处理根长度均有不同程度

的减小;同一干旱处理水平,返青期灌溉比越冬期灌溉根系要有不同程度的增加。上述研究表明根系长度变化主要受发育期推进的影响,在此过程中又受到水分条件的制约。

冬小麦整个生育时期重度干旱不灌溉的 T5 根

长最长,重旱灌溉 1 次的 T8 次之,轻旱不灌溉的 T1 和灌溉 1 次的 T4 占位第三,根长偏短的是重旱灌溉 2 次的 T7,相对根长值最小的 T6、T3、T2 和 CK 之间差异不大。

表 4 同表 3,但为根直径(单位:mm)

Table 4 Same as Table 3, but for root (unit: mm)

处理方法	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	灌浆期	乳熟期
CK	2.97	3.31	3.92	3.26	3.15	2.73
T1	2.69	3.02	2.91**	2.63*	2.42**	2.35*
T2	2.81	3.42	4.01	3.36	3.18	2.67
T3	2.69	3.08	3.28*	3.12	2.71*	2.56*
T4	2.69	3.02	3.20*	3.11	2.62*	2.52*
T5	2.21**	2.64**	2.86**	2.49**	2.13**	2.06**
T6	2.49*	2.71*	3.25*	3.18	2.86*	2.31**
T7	2.51*	3.09	2.95**	2.98	2.79*	2.27**
T8	2.21**	2.64**	2.93**	2.89*	2.51**	2.08**

表 5 同表 3,但为根长度(单位:mm)

Table 5 Same as Table 3, but for root length (unit: mm)

处理方法	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	灌浆期	乳熟期
CK	2166.41	3847.13	4757.3	5723.96	5946.61	6313.69
T1	2667.43*	4875.91*	6576.54**	7967.8**	8121.33**	8263.51*
T2	2576.52	4536.76*	5876.21*	6672.37*	7015.56*	7125.43*
T3	2667.43*	4421.16*	5671.22*	6983.67*	7210.08*	7293.57*
T4	2667.43*	4875.91*	6334.81*	7463.36**	7903.22**	8047.59**
T5	2946.53**	5275.98**	7946.36**	8747.39**	9142.44**	9193.61**
T6	2467.89	4637.72*	5133.26*	7128.53**	7589.34**	7716.53*
T7	2946.53**	4668.73*	5328.93*	7345.01*	7884.17**	7930.75*
T8	2946.53**	5275.98**	7451.08**	8227.39**	8435.69**	8537.83*

2.1.4 对不同土层根系生物量的体积百分比的影响

由冬小麦在不同水分条件下,不同发育期根系体积的变化(表 6)可见,总体上看,所有水分处理冬小麦呈现上层土壤根系所占比例大,下层土壤根系所占比例小。随着生育期的推进,不同层次根系所占比例差距逐渐减小,根系体积分配比例受土壤水分影响较大。具体表现为,全生育期土壤水分较好的处理,上层土壤(0~40 cm)根系分配比例较大,下层土壤(40~80 cm)根系分配比例较小。如 CK 处理组,在乳熟期,上层土壤所占根系的比例为 76.3%,在此之前,其所占总根系的体积比例更大。在不同时段进行不同程度的干旱处理,出现了上层土壤根系所占比例下降,下层土壤根系所占比例升高,干旱胁迫越严重,下层土壤所占根系总体积的量越大,如下层比例最大的是 T5 处理, T5 处理下层土壤根系占整个根系体积的比例是 38.18%。以上

研究表明,冬小麦根系分布规律与土壤水分密切相关,土壤水分越好,上层根系比例就越大,反之土壤墒情越差,根系下层所占根系总体的比例就越大。

全生育期 0~40 cm 根系占比水分条件适宜的 CK 和越冬拔节期灌溉 2 次的 T6、T2 分别为 82%、81%、80%,返青孕穗期灌溉 2 次的 T7、T3、轻旱灌溉 1 次的 T4 分别为 77%、76%、76%,干旱不灌溉的 T1、T5、重旱灌溉 1 次的 T8 分别为 74%、72%、68%。

2.2 根系活力与产量及其构成要素的相关性

由不同发育期根系活力与产量构成要素的相关性(表 7)可见,不同水分条件下产量及其构成要素与不同时段发育期根系活力总体相关性较大,但其相关系数最高、相关性最明显的生育期却有所不同。具体表现为:穗粒数与越冬期、返青期和孕穗期根系活力有明显相关性,但是相关最明显的是返青期根

系活力,达极显著水平($P < 0.01$);根系活力与密度的相关性除越冬期无明显影响外,其余均有明显相关,其中与孕穗期和灌浆期相关性最明显($P < 0.01$);与千粒重的相关性比其他产量要素相关性好,相关性均达显著水平($P < 0.05$),其中与孕穗期

相关系数最大;与理论产量的相关性均显著相关,相关系数最大也是孕穗期;与水分利用效率呈现明显的负相关关系,除拔节期相关性没有达显著水平外,其余均显著相关($P < 0.05$),相关系数最大的时期为越冬期。

表 6 同表 3,但为根系体积

Table 6 Same as Table 3, but for root volume

处理方法	土壤层次/cm	越冬期/%	返青期/%	拔节期/%	孕穗期/%	灌浆期/%	乳熟期/%
CK	0~20	80.29	71.27	66.85	58.84	51.34	46.67
	20~40	11.03	17.93	17.66	23.81	27.73	29.63
	40~60	6.67	8.43	10.52	12.32	14.72	14.56
	60~80	2.01	2.37	4.97	5.03	6.21	9.04
T1	0~20	75.56	65.53	55.38	45.24	40.35	32.35
	20~40	13.06	18.03	24.63	28.35	29.44	30.57
	40~60	7.83	9.68	12.16	18.31	19.52	22.93
	60~80	3.55	6.76	7.83	8.1	10.69	14.15
T2	0~20	78.51	67.06	57.69	48.33	44.78	39.86
	20~40	16.68	20.23	26.17	30.91	32.34	33.29
	40~60	4.05	8.74	10.01	13.23	14.81	16.83
	60~80	0.76	3.97	6.13	7.53	8.07	10.02
T3	36.17	0~20	75.56	64.79	52.27	46.31	43.39
	20~40	13.06	21.81	25.96	29.35	27.4	31.61
	40~60	7.83	9.42	13.12	17.21	18.72	19.37
	60~80	3.55	3.98	8.65	7.13	10.49	12.85
T4	0~20	75.56	62.53	55.39	51.26	43.82	35.36
	20~40	13.06	19.03	24.51	26.42	28.41	31.62
	40~60	7.83	10.68	11.32	14.23	16.21	18.69
	60~80	3.55	7.76	8.78	8.09	11.56	14.33
T5	0~20	70.56	49.52	45.26	41.58	36.81	30.18
	20~40	13.06	25.79	26.13	26.76	28.59	31.64
	40~60	9.83	14.87	15.66	17.92	20.93	23.82
	60~80	6.55	9.82	12.95	13.74	13.67	14.36
T6	0~20	78.04	69.52	64.88	58.84	50.52	41.37
	20~40	16.16	21.73	19.63	23.81	26.61	30.43
	40~60	4.72	6.23	10.52	12.32	16.65	18.47
	60~80	1.08	2.52	4.97	5.03	6.22	9.73
T7	0~20	70.56	65.52	61.57	51.58	42.34	32.23
	20~40	13.06	20.85	23.31	27.76	31.73	28.25
	40~60	9.83	9.71	9.39	14.92	16.72	22.93
	60~80	6.55	3.92	5.73	6.73	9.21	16.59
T8	0~20	70.56	49.52	55.29	47.98	40.89	33.87
	20~40	13.06	25.79	23.36	26.52	28.15	29.72
	40~60	9.83	14.87	13.37	15.33	17.24	20.83
	60~80	6.55	9.82	7.98	10.17	13.72	15.58

表 7 冬小麦不同发育期根系活力与产量构成要素的相关性

Table 7 Correlation coefficient between root activity and yield and its components of winter wheat at different growth stages

产量及其构成要素	越冬期	返青期	拔节期	孕穗期	灌浆期	乳熟期
穗粒数	0.782*	0.825**	0.533	0.750*	0.644	0.626
密度	0.563	0.674*	0.710*	0.758**	0.774**	0.747*
千粒重	0.751*	0.828**	0.822**	0.952**	0.911**	0.854**
理论产量	0.760*	0.843**	0.801*	0.926**	0.899*	0.864*
水分利用效率	-0.877**	-0.691*	-0.633	-0.852**	-0.868**	-0.873**

2.3 不同干旱程度对冬小麦产量构成要素和水分利用效率的影响

由不同水分条件下冬小麦产量构成要素和水分利用效率的变化(表 8)可见,在不同水分处理下冬小麦产量和水分利用效率均有明显差异,在 40%~80%的相对湿度范围内,所有水分处理土壤相对湿度越小,水分利用效率越高,产量就越低。其中 CK 处理组产量为 $9269.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,水分利用效率最低仅为 $16.41 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$;而 T5 处理水分亏缺最严重,密度最小,为 $433.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,产量最低,仅为 $4943.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而水分利用效率高达 $21.22 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$;在灌溉量相同的情况下,返青期灌溉比越冬期灌溉有利于产量和水分利用效率的提高,如 T3 和 T7 分别大于 T2 和 T6 处理。与对照 CK 组相比,穗粒数、密度和千粒重均随着干旱程度增加而降低,同一干旱处理水平,不同发育期

灌溉在灌溉量相同的情况,返青期灌溉比越冬期灌溉有利于产量和水分利用效率的提高,千粒重受到较大的影响,穗粒数受影响相对较小;拔节期灌溉一次,由于总体灌溉量较小,重度干旱下穗粒数和千粒重均受到明显影响,轻度干旱穗粒数无明显影响,千粒重有一定程度的减少。

针对冬小麦整个生长季水分利用效率,从干旱程度来看,重度干旱>轻度干旱>水分条件适宜;从灌溉时期看,重旱不灌溉>重旱返青孕穗灌溉 2 次>轻旱不灌溉和重旱拔节期灌溉 1 次>轻旱返青孕穗灌溉 2 次>轻旱拔节期灌溉 1 次和重旱越冬拔节期灌溉 2 次>轻旱越冬拔节期灌溉 2 次>水分条件适宜。单从理论产量表现来看,水分条件适宜>轻度干旱>重度干旱;从复水次数看,灌溉 2 次>灌溉 1 次;从发育期来看,返青、孕穗期灌溉>越冬、拔节期灌溉。

表 8 在不同水分条件下冬小麦产量构成要素和水分利用效率的变化

Table 8 Variation of yield components and water use efficiency of winter wheat in different water conditions

处理方法	穗粒数/粒	密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	千粒重/g	理论产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	40.75	538.12	42.27	9269.16	16.41
T1	40.61	439.99**	38.86**	6943.46**	19.43**
T2	39.49	521.38	40.03*	8241.93*	17.72*
T3	39.57	544.70	40.26*	8677.51*	18.66*
T4	39.37	481.22*	39.72*	7525.28**	18.28*
T5	36.95**	433.11**	30.89**	4943.43**	21.22**
T6	39.21	440.59**	39.15**	6763.31**	18.07*
T7	39.29	476.24*	39.47*	7385.34**	20.23**
T8	37.12**	461.02*	35.29**	6039.16**	19.22*

2.4 不同干旱程度灌水量对冬小麦产量的影响

结合表 2 灌水量和表 8 的产量计算,不同程度干旱的变化所需灌水量不同,产量减损效果各不相同(表 9),产量减损效果重旱条件下灌水好于轻旱条件下灌水。重旱转为轻旱时产量减损效果最好,重旱条件下灌水 $908 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,缓解为轻旱条件,1 mm 灌水量减损量可达 $22.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;增加灌水 $1959 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,可解除干旱,使土壤水分条件达到适宜状态;重旱转为适宜状态下平均 1 mm 灌水量减损量降为 $15.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。轻旱条件下拔节期灌水产量减损效果表现较差,1 mm 灌水量减损量为 $9.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对应重旱增加 $1660 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水,产

量减损 $1884 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;轻旱和重旱条件下解除干旱分别需灌水 1959 和 $2867 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量分别减损 2325.7 和 $4325.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均 1 mm 灌水量减损量分别为 11.87 和 $15.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。水分适宜条件 CK 与轻旱返青、孕穗 2 次灌水 T3 相比,灌水量增加 $760 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,产量减损 $591 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均 1 mm 灌水量减损量 $0.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。重旱条件下 1 mm 灌水量减损效果为:多次少量灌水缓解干旱>返青孕穗期 2 次灌水>拔节期 1 次灌水>越冬拔节期 2 次灌水。轻旱条件下灌水减损表现为:多次少量灌水解除干旱>返青孕穗期 2 次灌水>越冬拔节期 2 次灌水>拔节期 1 次灌水。

表 9 不同干旱程度下的灌溉量对冬小麦产量的影响

Table 9 Effect of irrigation rate on winter wheat yield at different drought degrees

干旱程度变化	所需灌水量/mm	产量减损/(kg·hm ⁻²)	平均 1 mm 灌水量减损量/(kg·hm ⁻²)
重旱转为轻旱	90.8	2000.03	22.03
重旱转为适宜	286.7	4325.73	15.09
重旱越冬拔节期灌水 2 次	120	1819.88	15.17
重旱返青孕穗期灌水 2 次	120	2441.91	20.35
重旱拔节期灌水 1 次	60	1095.73	18.26
轻旱转为适宜	195.9	2325.70	11.87
轻旱越冬拔节期灌水 2 次	120	1298.47	10.82
轻旱返青孕穗期灌水 2 次	120	1734.05	14.45
轻旱拔节期灌水 1 次	60	581.82	9.70

3 讨 论

根系是作物吸收水分的重要器官,对个体上部发育、群体冠层形成、提高抗御逆境条件的能力起着重要的作用。作物对土壤水分的利用状况取决于不同土层中的根系分布、吸水效率及土壤有效含水量有着密切的关系(Clothier and Green,1994)。当土壤干旱发生时,作物根系首先受到影响,并迅速发出信号,使整个植物对干旱做出反应,同时改变根系的形态特征和其他生理生化指标以适应干旱的土壤(孙书变等,2008;吴洪颜等,2017)。传统的灌溉通常是满足各生育阶段生理水为基础,造成根系冗余度增大,土壤水分的过度利用(张大勇等,1995;景蕊莲等,2002)。因此,冬小麦要实现节水,必须从建立节水灌溉制度、提高土壤水分利用效率着手。

本文研究了不同程度的干旱及在不同发育期灌溉对冬小麦根系活力、形态特征以及产量等方面的影响。结果表明:干旱发生时,不同程度的干旱造成根系活力不同程度的下降,越冬期下降幅度较小,随着发育期的推进下降幅度明显增大,均是到乳熟期降幅最大;总体上不同程度干旱在越冬期灌溉均比在返青期灌溉利于根系活力的提高,升高幅度重度干旱处理大于中度干旱处理。出现这种情况的主要原因可能是冬小麦在拔节期以前为冬小麦根系形成和发展的主要阶段,这个时段灌溉利于根系活力的提高和根系直径的快速增大;灌溉致使冬小麦地上部分的快速生长,重度干旱处理比轻度干旱处理冬小麦根系抗逆性物质累积多,抵御干旱灾害能力强(胡程达等,2014),冬小麦根系对水分的吸收和利用就越高。虽说灌溉越早,越利于根系活力的提高和根直径的增加,但却不利于根系长度的增加和向下伸展,在冬小麦越冬期复水的处理根系下层比例(40

~80 cm)减少,上层比例增加,这样会影响后期冬小麦在水分非充足条件下的生长,不利于产量的形成;在返青期灌溉虽然会在一定程度上减少根系活力和根直径,但是根长度却会有明显增加,在一定程度上增加了冬小麦下层根系的分布比例,能够利用下层的土壤水分。这与刘殿英等(1991)研究结果基本一致。同时此时正值 2 月中上旬,整体上气温较低,冬小麦棵间蒸发量较小,这样能较大限度地提高冬小麦上层根系土壤水分的利用效率;在同一时段灌溉的不同程度的干旱处理,干旱程度越重,根系下层所占总根系比例越大,水分利用效率就越高。这与王淑芳等(2006)的研究结果基本一致。在拔节期灌溉的处理,由于此时冬小麦根系总体形态格局已基本定型,下部根系所占比例较大,少量的灌水下渗深度较小,不宜被下层根系充分利用,同时此阶段气温升高较快,致使较大一部分水分以棵间蒸发形式散失(胡程达等,2016),从而减低了冬小麦土壤的水分利用效率。综上所述,与越冬期灌溉相比,冬小麦在返青期灌溉,利于其根系向下发展,提高水分利用效率;拔节期及以后发育期灌溉,可适当增大灌溉量,减少灌溉次数,以便提高水分利用效率,这与肖俊夫等(2007)的研究结果基本一致。

产量及其构成要素与根系活力的相关性关系来看,产量及其构成要素在不同发育期对根系活力的响应不尽一致,主要体现在穗粒数与返青期冬小麦根系活力相关性最好,这也说明了返青期冬小麦活力的提高利于穗粒数的增加,而冬小麦返青期根系活力的增加,是由此阶段土壤墒情较好造成的,同时因返青期冬小麦农田蒸散量较小,较好的墒情会持续到拔节期,利于小穗的分化,这与田中伟等(2018)研究结果基本一致;密度与根系活力之间的关系表现为除越冬期外其余发育期均有明显影响,说明根系活力在一定程度上影响了密度的大小,根系活力

降低到一定阈值范围,会造成冬小麦植株的死亡;千粒重和理论产量均与孕穗期相关性最好,这可能是因为孕穗期和抽穗期穗粒数已经形成,这个阶段土壤墒情和根系活力会影响到后期灌浆的速率,进而决定千粒重的大小和产量的高低,这与韩惠芳等(2010)的研究成果基本一致。

从不同干旱程度复水的情况来看,重度干旱条件下灌水效果明显好于轻度干旱条件下灌水,返青孕穗期灌溉明显好于越冬拔节期灌溉。重旱条件下灌水缓解为轻旱状态时 1 mm 水量产量减损 22.03 kg·hm⁻² 为最高值,返青孕穗期 60 mm 灌水 2 次为次高值,1 mm 水量产量减损 20.35 kg·hm⁻²,重旱拔节期灌 1 次比越冬拔节期灌 2 次减损效果明显。相应轻旱条件下灌溉减损效果偏低,返青孕穗期 2 次灌水减损效果较好,拔节期 1 次减损效果最差。刘丽平等(2012)研究结果,0~40 cm 土层平均土壤相对含水量在返青至开花期保持在 55%~5%,可在获取一定产量的同时高效节水;李彦彬等(2018)试验研究成果显示轻度水分胁迫可实现节水和高产的统一,与本文研究结论基本符合。因此,冬小麦干旱持续发生条件下,在返青期和孕穗期需灌水 600 m³·hm⁻²,可根据干旱程度适当增加灌水次数或增减灌水量,重大干旱年份灌水困难条件下可只在拔节期灌水 600 m³·hm⁻²,或重旱条件下灌水时适当增加灌水次数缓解干旱,达到干旱灾害发生的节水增产和抗灾减损效果。此灌水量与大田常规灌水量 1000~1200 m³·hm⁻² 相比节水明显。

4 结 论

(1)在干旱条件下,冬小麦根系活力和根直径均有明显的降低,根长有明显增加,土壤下层所占根系总体积比例增大,且随着发育期的推进,下层根系所占比例呈现增大的趋势,水分利用效率有明显提高;随着干旱程度的增加,上述变化趋势更加明显。在灌溉量相同的情况下,在越冬期灌溉,有利于冬小麦根系活力和根直径增加,但不利于根系的向下伸展;在返青期和拔节期灌溉利于根系向下伸展、水分利用效率提高、理论产量增加,但不利于根系活力和直径的增加;拔节期灌水,可适当增大灌水量,减少灌水次数,提高水分利用效率。

(2)不同干旱条件下冬小麦根系活力和产量表现为,水分条件适宜>轻度干旱>重度干旱;从灌水

次数看,2次灌水>1次灌水;从发育期来看,返青孕穗期灌水>越冬拔节期灌水。从不同干旱条件下冬小麦水分利用效率和产量表现来看,重度干旱条件下灌水减损效果好于轻度干旱条件下灌水,返青孕穗期灌水减损效果好于越冬拔节期灌水。

(3)不同干旱条件下冬小麦根系活力与产量呈显著性正相关,与水分利用效率呈显著性负相关。冬小麦干旱持续发生时在返青期、孕穗期分别灌水 600 m³·hm⁻² 左右,可根据干旱程度适当增减灌水量,重旱条件下灌水时适当增加灌水次数,少量多灌缓解干旱,重大干旱年份灌水困难条件下可只在拔节期灌水 600 m³·hm⁻²,以达到抗灾减损、节水灌溉效果。

参 考 文 献

- 曹雯,成林,杨天明,等,2019.河南省冬小麦拔节-抽穗期干旱天气指数保险研究[J].气象,45(2):274-281. Cao W, Cheng L, Yang T M, et al, 2019. Study on weather index insurance of drought damage at jointing-heading stage of winter wheat in Henan Province[J]. Meteor Mon, 45(2):274-281(in Chinese).
- 国家气象局,1993.农业气象观测规范[M].北京:气象出版社. The National Weather Service, 1993. Observation Criterion of Agricultural Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 韩惠芳,李全起,董宝娣,等,2010.灌溉频次和时期对冬小麦籽粒产量及品质特性的影响[J].生态学报,30(6):1548-1555. Han H F, Li Q Q, Dong B D, et al, 2010. Effects of irrigation frequency and stages on grain yield and quality characteristics of winter wheat[J]. Acta Ecol Sin, 30(6):1548-1555(in Chinese).
- 胡程达,刘荣花,张永录,2016.不同水分条件下冬小麦农田蒸散研究[J].江苏农业科学,44(7):484-487. Hu C D, Liu R H, Zhang Y L, 2016. Study on evapotranspiration of winter wheat farmland under different water conditions[J]. Jiangsu Agric Sci, 44(7):484-487(in Chinese).
- 胡程达,杨光仙,成林,2014.干旱对冬小麦光合产物积累和分配的影响[J].中国农业气象,35(3):243-249. Hu C D, Yang G X, Cheng L, 2014. Effects of drought on distribution and accumulation of photosynthetic matter in winter wheat[J]. Chin J Agrometeor, 35(3):243-249(in Chinese).
- 金燕,况雪源,晏红明,等,2018.近55年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J].气象,44(9):1169-1178. Jin Y, Kuang X Y, Yan H M, et al, 2018. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteor Mon, 44(9):1169-1178 (in Chinese).
- 景蕊莲,昌小平,朱志华,等,2002.小麦幼苗根系形态与反复干旱存活率的关系[J].西北植物学报,22(2):243-249. Jing R L, Chang X P, Zhu Z H, et al, 2002. Relationship between root morphology of

- wheat (*T. aestivum*) and survival percentage under repeated drought condition[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 22(2): 243-249(in Chinese).
- 李凤民, 刘小兰, 王俊, 2001. 底墒与磷肥互作对春小麦产量形成的影响[J]. *生态学报*, 21(11): 1941-1946. Li F M, Liu X L, Wang J, 2001. Effects of pre-sowing irrigation and P fertilization on spring wheat yield information[J]. *Acta Ecol Sin*, 21(11): 1941-1946(in Chinese).
- 李合生, 2003. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社. Li H S, 2003. *The Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press(in Chinese).
- 李彦彬, 朱亚南, 李道西, 等, 2018. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 37(8): 76-82. Li Y B, Zhu Y N, Li D X, et al, 2018. Effects of alternating drought and watering on growth, photosynthesis and yield of winter wheat [J]. *J Irrigat Drain*, 37(8): 76-82(in Chinese).
- 廖要明, 张存杰, 2017. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. *气象*, 43(11): 1402-1409. Liao Y M, Zhang C J, 2017. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. *Meteor Mon*, 43(11): 1402-1409(in Chinese).
- 刘殿英, 黄炳茹, 董庆裕, 1991. 土壤水分对冬小麦根系的影响[J]. *山东农业大学学报*, 22(2): 103-110. Liu D Y, Huang B R, Dong Q Y, 1991. Effect of soil moisture on root system in winter wheat [J]. *J Shandong Agric Univ*, 22(2): 103-110(in Chinese).
- 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等, 2003. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J]. *生态学报*, 23(11): 2342-2352. Liu G S, Guo A H, Ren S X, et al, 2003. The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat [J]. *Acta Ecol Sin*, 23(11): 2342-2352(in Chinese).
- 刘坤, 陈新平, 张福锁, 2003. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性[J]. *土壤学报*, 40(5): 697-703. Liu K, Chen X P, Zhang F S, 2003. Winter wheat root distribution and soil water and nutrient availability[J]. *Acta Pedol Sin*, 40(5): 697-703(in Chinese).
- 刘丽平, 欧阳竹, 武兰芳, 等, 2012. 阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 31(11): 2797-2803. Liu L P, Ouyang Z, Wu L F, et al, 2012. Effects of phased drought and re-watering on the photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Chin J Ecol*, 31(11): 2797-2803(in Chinese).
- 刘玉芝, 常姝婷, 华珊, 等, 2018. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展[J]. *气象学报*, 76(3): 485-492. Liu Y Z, Chang S T, Hua S, et al, 2018. A review of the research on atmospheric water resources over arid and semi-arid regions of East Asia[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(3): 485-492(in Chinese).
- 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等, 2018. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. *大气科学*, 42(4): 951-961. Ma Z G, Fu C B, Yang Q, et al, 2018. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 951-961(in Chinese).
- 苗果园, 张云亭, 尹钧, 等, 1989. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究[J]. *作物学报*, 15(2): 104-115. Miao G Y, Zhang Y T, Yin J, et al, 1989. A study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid Loess Plateau[J]. *Acta Agronom Sin*, 15(2): 104-115(in Chinese).
- 秦大河, 2007. 应对全球气候变化防御极端气候灾害[J]. *求是*, (8): 51-53. Qin D H, 2007. Addressing the change global climate and preventing the disasters of extreme climate[J]. *Qiushi J*, (8): 51-53(in Chinese).
- 孙秀雯, 陈秀敏, 乔文臣, 等, 2008. 冬小麦干旱胁迫下不同土层根量分布与产量的关系[J]. *河北农业科学*, 12(5): 6-8. Sun S L, Chen X M, Qiao W C, et al, 2008. Relationship between root distribution in different soil layer and yield of winter wheat under drought stress[J]. *J Hebei Agric Sci*, 12(5): 6-8(in Chinese).
- 田中伟, 王妮妮, 李怡香, 等, 2018. 分蘖期和拔节期干旱对小麦主茎和分蘖穗粒形成的影响[J]. *麦类作物学报*, 38(6): 734-741. Tian Z W, Wang N N, Li Y X, et al, 2018. Effect of water deficit on main stem and tiller grain number formation of wheat during tillering stage and jointing stage[J]. *J Trit Crops*, 38(6): 734-741(in Chinese).
- 王俊儒, 李生秀, 2000. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响[J]. *西北植物学报*, 20(2): 193-200. Wang J R, Li S X, 2000. Effect of water-limited deficit stress in different growth stages on winter wheat grain yields and their yield constituents[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 20(2): 193-200(in Chinese).
- 王连喜, 杨有林, 何雨红, 2003. 气候变化和植被关系研究方法探讨[J]. *生态学杂志*, 22(1): 43-48. Wang L X, Yang Y L, He Y H, 2003. Discussion of research methods on relationship between climate change and plant[J]. *Chin J Ecol*, 22(1): 43-48(in Chinese).
- 王淑芬, 张喜英, 裴冬, 2006. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 22(2): 27-32. Wang S F, Zhang X Y, Pei D, 2006. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. *Trans CSAE*, 22(2): 27-32(in Chinese).
- 吴洪颜, 高苹, 谢志清, 等, 2017. 基于春季阴雨过程的冬小麦涝渍指数模型构建与应用[J]. *气象*, 43(3): 373-377. Wu H Y, Gao P, Xie Z Q, et al, 2017. Construction and application of waterlogging index model of winter wheat based on spring rainy weather [J]. *Meteor Mon*, 43(3): 373-377(in Chinese).
- 夏国军, 阎耀礼, 程水明, 等, 2001. 旱地冬小麦水分亏缺补偿效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 19(1): 79-82. Xia G J, Yan Y L, Cheng S M, et al, 2001. Research on compensatory effects to water deficits on dryland winter wheat[J]. *Agric Res Arid Areas*, 19(1): 79-82(in Chinese).
- 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等, 2007. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J]. *中国农村水利水电*, (8): 18-21. Xiao J F, Liu Z D, Duan A W, et al, 2007. Root distribution and water consumption characteristics of winter wheat under different soil moisture[J]. *China Rural Water Hydr*, (8): 18-21

- (in Chinese).
- 徐建文,居辉,刘勤,等,2014.黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].生态学报,34(2):460-470. Xu J W, Ju H, Liu Q, et al, 2014. Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecol Sin, 34(2):460-470(in Chinese).
- 薛丽华,段俊杰,王志敏,等,2010.不同水分条件对冬小麦根系时空分布、土壤水利用和产量的影响[J].生态学报,30(19):5296-5305. Xue L H, Duan J J, Wang Z M, et al, 2010. Effects of different irrigation regimes on spatial-temporal distribution of roots, soil water use and yield in winter wheat[J]. Acta Ecol Sin, 30(19):5296-5305(in Chinese).
- 张大勇,姜新华,赵松岭,等,1995.半干旱区作物根系生长冗余的生态学分析[J].西北植物学报,15(5):110-114. Zhang D Y, Jiang X H, Zhao S L, et al, 1995. An ecological analysis of growth redundancy in root systems of crops under drought conditions[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 15(5):110-114(in Chinese).
- 周凌云,1993.华北地区节水农业问题探讨[J].农业现代化研究,14(4):240-243. Zhou L Y, 1993. Discussion on water-saving agriculture in North China[J]. Res Agric Mod, 14(4):240-243(in Chinese).
- 周悦,周月华,叶丽梅,等,2016.湖北省旱涝灾害致灾规律的初步研究[J].气象,42(2):221-229. Zhou Y, Zhou Y H, Ye L M, et al, 2016. Preliminary study on disastrous law of drought and flood in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 42(2):221-229(in Chinese).
- Clothier B E, Green S R, 1994. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water[J]. Agric Water Manage, 25(1):1-12.
- Rasse D P, Smucker A J M, 1998. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations[J]. Plant Soil, 204(2):203-212.
- Wilhite D A, 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions[M] // Wilhite D A. Drought: A Global Assessment. London: Routledge: 3-18.