

渭北地区冬小麦的有限灌溉与水分利用研究

邓 西 平

中国科学院
(水利部)水土保持研究所 陕西杨陵 712100)

摘 要 采用越冬前、拔节、抽穗和灌浆 4 个灌水时期和每次 60 与 120 mm 两个灌水量的组合设计, 在大田条件下对冬小麦的灌水量与耗水量、产量、水分利用效率(WUE)以及灌水效率(IUE)和有限灌溉的下限与适宜的灌水时期进行了小区试验研究, 并建立了冬小麦产量与耗水以及 WUE 与耗水的回归数学模型。试验结果表明, 冬小麦在渭北地区的耗水量与产量和 WUE 之间均呈现非线性关系; 满足最大产量时所需的补充灌水量约为 180 ~ 220 mm; 满足 WUE 最大时的补充灌水量为 60 ~ 80 mm。研究结果还显示, 在底墒良好的条件下, 拔节期 60 mm 的有限灌溉可以同步提高子粒产量和 WUE 冬季 60 mm 和拔节期 60 mm 的两次有限灌溉, 对于改善渭北地区冬小麦的苗期生长发育和提高产量、WUE 和灌水效率也有明显作用。

关键词 冬小麦 有限灌溉 水分利用

The Study of Limited Irrigation on the Winter Wheat and Water Utilization

Deng X i p i n g

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and the Ministry of Water Resources Yangling Shaanxi 712100)

Abstract The combination design of the four irrigation periods, including winter, jointing, heading and grain filling stages, and two irrigation amounts of 60 mm and 120 mm for each, were used in this winter wheat field experiment. The relationship among irrigation amounts, e-vapotranspiration, water use efficiency of wheat and optimum water supplementary supply as well as suitable limited irrigation periods have been studied. According to the relations between water consumption and grain yields, as well as water consumption and water use efficiency, the mathematical regression models have been set up. The results showed that in the Weibei areas, the supplementary irrigation amount to meet with maximum yield of winter wheat was about 180 ~ 220 mm; and limited irrigation amount to satisfy highest crop water use efficiency was about 60 ~ 80 mm; under the good water conditions during seedling establishment of winter wheat, when the 60 mm of limited irrigation water was supplied in the jointing period, grain

yield, water use efficiency and irrigation efficiency were much improved synchronously; during the winter and jointing periods, supplement 60 mm irrigation water separately, was able to increase seedling growth and development, and also to improve water utilization markedly.

Key words winter wheat limited irrigation water utilization

渭北是一个水资源相当贫乏的地区。尽管这一地区土地资源丰富, 土层深厚, 耕性良好, 是陕西粮食生产潜力最大的地区, 但是可利用水资源(含地下水) 1hm² 平均仅为 1 830 m³/hm², 为全省最少。当前该地区粮食单产仅为 2 700 kg/hm², 粮食潜力开发的关键在于对有限水资源的高效利用, 而有限灌溉技术则被认为是提高水分利用和粮食产量的重要途径^[1]。关于渭北地区有限灌溉条件下冬小麦的产量、耗水与水分利用的基本关系, 目前研究的非常有限。从作物需水规律与生长发育不同阶段的耗水特征出发, 对三者之间的关系进行了研究, 并对渭北地区冬小麦实施有限灌溉的适宜供水时期和灌水量下限以及有限灌溉条件下的增产机理进行了探讨, 旨在为冬小麦对有限灌水的高效利用提供科学依据和指导原则。

1 材料与方法

试验于 1996~1998 年在位于渭北地区的富平县华朱乡东新村的水浇地上进行, 该县的年均温度为 13.1℃, 年平均降水量为 527.2 mm, 试验地选择有暗管输水条件的平地, 土壤类型为黄绵土。土壤肥力为中上水平, 其中全氮含量为 0.091 5%, 水解氮为 63.3×10⁻⁶, 全磷含量为 0.088 7%, 速效磷含量为 24.45×10⁻⁶, 钾含量为 2.03%, 速效钾为 194.8×10⁻⁶, 土壤有机质含量为 1.386%, 田间持水量为 19.44%, 土壤永久凋萎湿度为 8.0%。播前每 1hm² 施肥量: 尿素 750 kg, 磷酸二铵为 750 kg。全部试验地均匀撒施翻耕。选用当前大面积推广的水旱地兼用冬小麦品种陕 160 为试验材料。采用 4 个灌水时期和两种灌水量的组合设计(表 1), 试验处理如下:

- (1) 灌溉生育期: 冬前、拔节、抽穗、灌浆;
- (2) 灌溉次数: 1、2、3、4 次;
- (3) 每次灌量: 60 mm、120 mm。

表 1 冬小麦灌溉试验设计

处理 编号	灌溉生育期	灌溉 次数	每次灌 量/mm	总灌水 量/mm	处理 编号	灌溉生育期	灌溉 次数	每次灌 量/mm	总灌水 量/mm
1	干旱	0	0	0	17	冬前	1	120	120
2	冬前	1	60	60	18	拔节	1	120	120
3	拔节	1	60	60	19	抽穗	1	120	120
4	抽穗	1	60	60	20	灌浆	1	120	120
5	灌浆	1	60	60	21	冬前、拔节	2	120	240
6	冬前、拔节	2	60	120	22	冬前、抽穗	2	120	240
7	冬前、抽穗	2	60	120	23	冬前、灌浆	2	120	240
8	冬前、灌浆	2	60	120	24	拔节、抽穗	2	120	240
9	拔节、抽穗	2	60	120	25	拔节、灌浆	2	120	240
10	拔节、灌浆	2	60	120	26	抽穗、灌浆	2	120	240
11	抽穗、灌浆	2	60	120	27	冬前、拔节、抽穗	3	120	360
12	冬前、拔节、抽穗	3	60	180	28	冬前、拔节、灌浆	3	120	360
13	冬前、拔节、灌浆	3	60	180	29	冬前、抽穗、灌浆	3	120	360
14	冬前、抽穗、灌浆	3	60	180	30	拔节、抽穗、灌浆	3	120	360
15	拔节、抽穗、灌浆	3	60	180	31	冬前、拔节、抽穗、灌浆	4	120	480
16	冬前、拔节、抽穗、灌浆	4	60	240	32	干旱	0	0	0

每个试验小区面积为 14.2 m², 重复 3 次, 共 96 个小区, 随机区组排列, 灌水方式采用地面灌溉, 灌水量采用流量法控制, 将塑料软管接到输水管道上, 用单位体积水量所需的时间进行流量校正, 再根据每小区的灌水量采用时间控制法, 进行精确灌溉。采用水分平衡法测定作物的耗水量, 然后进行作物水分利用效率和灌水效率的计算^[2]。

2 试验结果

2.1 冬灌对冬小麦成苗的影响

由于播前土壤表层水分较好, 耕层 30 cm 平均含水量达到 16.8%, 陕 160 冬麦的出苗率达 93.8%, 冬前分蘖数达到 2.3 个, 促进了成苗过程, 使苗齐苗壮, 为小麦高产奠定了基础(见表 2)。

表 2 出苗和冬前苗情调查结果

出苗	万株/hm ²	出苗率/%	冬前	万茎/hm ²	冬前分蘖数
平均	315.15	93.85	平均	721.5	2.3
SD	2.13	9.53	SD	6.64	0.32

不同冬灌量对返青分蘖数的增加也有影响。和无灌溉对照相比, 冬灌 120 mm 条件下显著提高了冬小麦返青分蘖数, 而冬灌 60 mm 条件下尽管也促进了返青分蘖, 但作用不显著(见表 3)。

表 3 冬灌对返青分蘖数的影响

冬前灌水量 /mm	万茎/hm ²		总分蘖数		新增分蘖数	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD
0	1513.5	7.6	4.8	0.4	2.5	0.4
60	1576.5	15.6	5.0	0.7	2.7	0.7
120	1717.5	9.0	5.5	0.4	3.2	0.4

2.2 冬小麦耗水、产量与 WUE 之间的回归模型

从表 4 的试验结果中, 选择不同灌水量条件下产量和 WUE 都比较高的处理组合, 建立的冬小麦耗水量与产量回归模型如下:

$$Y = 1.8 \times 10^{-4} X^3 - 0.350 2 X^2 + 218.8 X - 35\,947.4 \quad (R^2 = 0.910\,6) \tag{1}$$

式中: Y ——为产量(kg/hm²); X ——耗水量(mm)。

耗水量与 WUE 的回归数学模型如下:

$$WUE = -1.2 \times 10^{-10} X^4 + 3.1 \times 10^{-7} X^3 - 2.8 \times 10^{-4} X^2 + 0.11 X - 13.4 \quad (R^2 = 0.889\,4) \tag{2}$$

式中: WUE ——水分利用效率(kg/m³); X ——耗水量(mm)。

对回归方程(1)和(2)的数学分析结果表明, 在试验所测定的耗水量 X 范围内, 当 $X = 524$ mm 时, 有一个 Y 的最大极值, 也就是理论上的最大产量。因此, 可将耗水划分为二个阶段, 即当耗水量 X 从 326.4 mm 增加到 524 mm 时产量随着耗水量的增大而提高, 直至达到最大产量; 当耗水量 X 从 524 mm 持续增大到 798.6 mm 时, 产量随耗水量 X 的增大而下降。同理, 当耗水量 $X < 406$ mm 时, WUE 随 X 的增大而增高, $X = 406$ mm 时, WUE 达到最大极值; 当 $X > 406$ mm 时, WUE 随 X 的增大而降低。

对耗水量 X 和 Y 与 WUE 的结合分析表明, 当耗水量从小向大的方向增加时, 首先是 WUE 的极值出现, 而 Y 最大值的出现滞后于 WUE 的最大值。这一结果进一步暗示着在耗水量中等程度上有可能取得较高的 WUE。

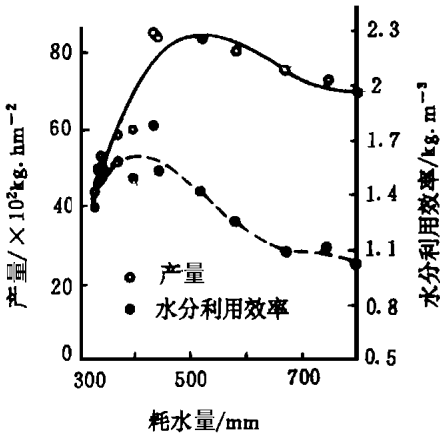


图 1 冬小麦耗水与产量和 WUE 的回归模型

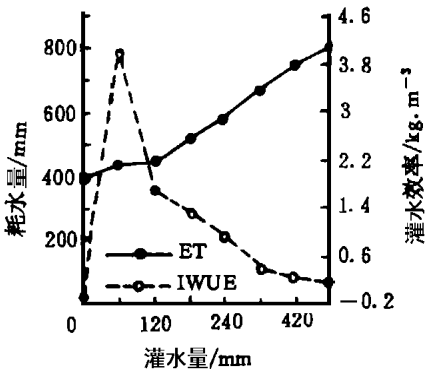


图 2 冬小麦灌水量与耗水和灌水效率的关系

表 4 灌期和灌量对产量和水分利用的影响

处理 编号	总耗水量/ mm	子粒产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	WUE/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	IUE/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	每平方米 穗数/个	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	经济系数
1	396.6	5937 ± 421	1.497	0.000	558.7	27.95	40.5	0.376
2	430.6	6799 ± 420	1.580	1.437	621.5	27.34	40.3	0.410
3	459.7	8344 ± 327	1.815	4.013	477.3	38.42	41.5	0.498
4	417.9	8080 ± 162	1.934	3.573	617.0	32.83	41.3	0.483
5	429.4	6301 ± 361	1.467	0.608	699.3	24.68	40.0	0.391
6	452.0	6757 ± 397	1.496	0.684	701.0	28.42	38.6	0.428
7	448.9	7993 ± 438	1.781	1.715	608.7	32.61	39.8	0.389
8	396.0	6676 ± 391	1.686	0.617	619.3	26.96	40.3	0.366
9	463.8	7276 ± 328	1.569	1.116	604.8	30.52	39.4	0.414
10	466.2	7155 ± 181	1.535	1.016	609.7	29.24	40.1	0.375
11	432.3	7326 ± 412	1.695	1.158	564.0	29.78	43.6	0.441
12	507.6	7495 ± 201	1.476	0.866	630.6	29.00	41.0	0.453
13	629.0	7083 ± 666	1.127	0.636	683.7	27.60	41.7	0.477
14	527.7	8344 ± 450	1.581	1.338	567.7	29.27	40.3	0.441
15	523.0	7656 ± 462	1.464	0.956	641.0	30.12	41.3	0.447
16	564.3	6982 ± 378	1.238	0.435	634.7	29.22	37.6	0.381
17	499.5	6424 ± 450	1.286	0.407	617.7	26.78	39.0	0.385
18	477.0	7680 ± 396	1.610	1.452	582.3	30.63	40.8	0.437
19	361.6	6154 ± 285	1.703	0.182	615.5	22.73	44.0	0.362
20	457.6	7095 ± 427	1.551	0.965	554.0	27.37	42.1	0.391
21	609.7	8316 ± 672	1.364	0.992	628.8	27.32	41.3	0.405
22	585.8	7648 ± 243	1.305	0.713	668.5	29.95	41.5	0.423
23	579.4	7347 ± 252	1.268	0.588	649.1	28.39	39.8	0.387
24	542.8	7827 ± 514	1.443	0.788	639.7	31.60	40.3	0.446
25	590.3	6744 ± 432	1.143	0.336	629.7	26.84	40.8	0.377
26	601.0	7170 ± 324	1.194	0.515	603.3	29.89	36.1	0.368
27	683.1	7495 ± 466	1.098	0.434	653.8	30.46	40.7	0.388
28	704.3	7341 ± 270	1.043	0.390	663.7	29.83	39.2	0.380
29	670.0	7243 ± 498	1.082	0.363	664.7	29.43	40.2	0.388
30	617.0	7027 ± 241	1.139	0.303	654.7	27.85	41.0	0.388
31	798.7	6936 ± 429	0.869	0.208	740.9	32.23	41.2	0.438

2.3 有限灌溉与灌水效率和土壤耗水的关系

图 2 中,灌水量与耗水量和灌水效率的关系表明:耗水量随着灌水量的增大而增大,而灌水效率则与灌水量呈现一种非线性关系,灌水量在 30~120 mm 的范围内,灌水效率(IUE)一般大于 1.7 kg/m^3 ,其中 60 mm 左右灌水量条件下 IUE 最大值达到 4.0 kg/m^3 以上,灌水量在 120~240 mm 之间, IUE 一般在 $1.0 \sim 1.7 \text{ kg/m}^3$ 的范围内。随着灌水量的进一步增大, IUE 均小于 1,且随着耗水量的增大而持续下降。图 3 中土壤耗水的结果表明,干旱对照的收获期土壤湿度在 2 m 范围内几乎接近永久凋萎湿度,和播前的土壤水分状况相比,在 0~1 m 的土层中,土壤耗水达到 108.9 mm, 1~2 m 土层中的土壤耗水为 62.2 mm,分别占到土壤 2 m 土层总耗水量的 63.6% 和 36.4%。收获时期最大灌水量(480 mm)条件下的 2 m 土层土壤总耗水为 70.8 mm,其中 0~1 m 土层的耗水达到 85.5 mm,而 1~2 m 土层的土壤水分与播前土壤水分状况相比,不仅没有减少,反而增加了 14.7 mm。其它不同灌水量下的土壤耗水情况,均介于干旱对照和最大灌水量下土壤耗水界限的中间状态。这一结果暗示着增加灌水量有减少土壤耗水的趋势和可能性。

2.4 有限灌溉对冬小麦产量构成的影响

作物产量的构成一般可用以下公式来表示:

$$Y = E_D \times S_N \times S_W \quad (3)$$

式中: Y ——单位面积产量; E_D ——单位面积的穗数; S_N ——每穗粒数, S_W ——粒重。

一般情况下,每平方米穗数与播种量有直接关系, E_D 可以一定程度上受人为因素的调控,而穗粒数 S_N 和粒重 S_W 则主要由作物的生长发育和成熟的过程所决定,人为的作物管理措施(包括耕作、施肥、灌溉等),一定程度上影响着 S_N 和 S_W 的变化。当然,产量构成的三因子还受气候类型的影响。

表 4 结果表明,有限灌溉措施对产量的构成产生了明显作用。首先,有限灌溉对单位面积的穗数有明显作用。冬前不灌的对照每平方米穗数为 601.2 ± 14.0 穗,冬前 60 mm 灌水的每平方米穗数为 631.1 ± 17.8 穗,冬前 120 mm 灌水的每平方米穗数为 658.7 ± 15.3 穗。冬灌 120 mm 条件下每平方米穗数提高 9.5%, 60 mm 冬灌条件下提高 5.0% 左右,作用不显著。

拔节期 60 mm 灌水条件下和干旱对照相比,尽管每平方米穗数下降 14.6%,但穗粒数和千粒重分别比对照增加 34.7% 和 2.5%,经济系数提高 32.4%。因此,拔节期有限灌溉对穗粒数和经济系数的提高,是提高 WUE 和增产的主要原因。120 mm

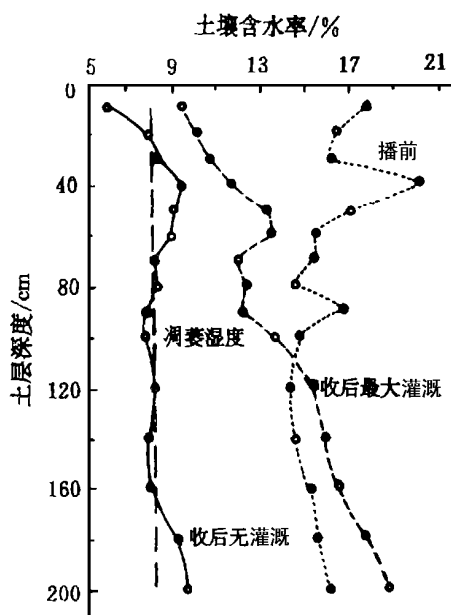


图 3 无灌溉和最大灌水条件下冬小麦播前收后不同土层的水分动态变化

冬灌和拔节期两次供水的有限灌水条件下,和干旱对照相比,每平方米穗数增加 10.4%,穗粒数增加 16.7%,而千粒重和经济系数变化不显著。

3 结 论

3.1 冬小麦的耗水、产量与水分利用效率的耦合关系

通过两年的冬小麦不同灌水量试验,对冬小麦在渭北地区的耗水、产量、水分利用效率之间的关系进行进一步的分析结果表明:冬小麦不同耗水量下产量与水分利用效率之间存在着三大特征:(1)耗水量从 326.4 mm 增加到 406 mm 这一阶段,产量从 4 414.7 kg/hm² 提高到 7 199.3 kg/hm²,WUE 从 1.398 5 kg/m³ 上升到 1.629 2 kg/m²,为耗水与产量和 WUE 三者同步增长阶段,这一阶段当耗水量增加 24.4% 时,产量增加 63.1%,WUE 提高 16.5%;(2)耗水量从 406 mm 增加到 524 mm 时,产量持续提高,从 7 199.3 kg/hm² 增加到 8 433.6 kg/hm²,而 WUE 则从 1.629 2 kg/m³ 下降到 1.403 8 kg/m³,为耗水量与产量同步增长,而 WUE 随耗水量增加而下降的阶段,在这一阶段,耗水量增加 29.1% 时,产量提高 17.1%,WUE 则下降 13.8%;(3)当耗水量从 524 mm 增加到 798.7 mm 时,随着耗水量的增大,产量和 WUE 均呈下降趋势,耗水量增大 52.4%,WUE 下降 26.2%,产量下降 15.9%,为产量与 WUE 同步下降阶段。从回归数学模型的进一步推论可以认为,从满足最大产量时所需的补充灌水量约为 180~220 mm;满足 WUE 最大时的补充灌水量为 60~80 mm。

3.2 有限灌水的最佳时期和灌水下限

表 4 表明:在水资源有限的条件下,冬小麦一次性有限灌溉的最佳时期为拔节期,适宜灌溉量的下限为 60 mm,60 mm 一次性有限灌溉条件下产量可提高 40.6%,水分利用效率达到 1.815,提高 21.2%,灌水效率可达到 4.013 kg/m³,可以实现冬小麦对有限水的高效利用。另一方面,当水资源比较丰富的条件下,以冬季和抽穗期二次灌水效果为佳,其中每次有限灌溉的下限以 60 mm 为宜,灌水总量为 120 mm 左右,可使产量与 WUE 和灌水生产效率都有明显的改善。与不灌水的对照相比,产量提高 34.6%,WUE 提高 18.9%,IUE 可达到 1.715 kg/m³。

关于有限灌溉条件下能否增加对土壤储水的利用问题,一些研究结果表明:能够增强对土壤深层储水的高效利用^[2],而本项研究结果表明,增加补充灌溉水,有减少土壤耗水的趋势和可能性(见图 2 和表 4)。显然,有限灌溉条件下能否增加土壤耗水,与两个因素有密切的关系。首先,与播种时的土壤水分状况有关^[3],如果播前土壤水分状况良好,则有利于小麦苗期根系的生长发育,使根系到达的土层深度增加,则有利于小麦对土壤深层储水的高效利用,即使是在无灌溉条件下,经过生育期降水的适当补充和对土壤储水的利用也能获得一定的产量。第二,有限灌溉条件下土壤耗水的多少还与小麦生育期降雨的分布有直接关系^[4],当灌浆期降雨较多时,作物往往还未充分利用就达到了收获季节,这时的土壤水分状况与其它生育期降雨相对较多的情况相对要高一些。土壤墒情和降雨季节分布与有限灌溉下作物的高效用水的关系有待进一步的量化研究。

参考文献

- 1 山仑,邓西平.有限灌溉及其生物学基础,陕西农业,1997(218):52~54
- 2 邓西平,山仑等.旱地春小麦对有限灌水高效利用的研究.干旱地区农业研究,1995,13(2):42~46
- 3 Truner, N.C., Water use efficiency in crop plants: potential for improvement. In: International Crop Science (Baenziger, P.S., Ed), Wisconsin, 1993, 75~82.
- 4 Fereres, E., and F. Orgaz, et al., Water use efficiency in sustainable agricultural systems. In: International Crop Science II (Baenziger, P.S., Ed), Wisconsin, 1993, 83~90