

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

刘庚山, 郭安红, 任三学, 安顺清, 林日暖, 赵花荣

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 试验在中国气象局固城农业气象试验基地的大型人工控制农田水分试验场进行。在底墒充足的条件下采用 3 种供水处理: 拔节期一次性供水 75mm (I_1); 返青供水 37.5mm 和拔节期供水 37.5mm (I_2); 返青后生长期内无水分供给 (I_{CK})。全生育期内用电动防雨棚遮去自然降水。试验结果表明, 表层土壤 (0~30cm) 水多根多, 根系反应敏感。上层干旱促使根系向深层发育, 利用下层水量较多。 I_1 处理减少表土层 (0~30cm) 的根量和根长密度, 促进根系下扎, 较多地利用深层土壤水分, 并减少无效分蘖。虽然总穗数减少, 但同 I_2 、 I_{CK} 相比籽粒数和籽粒重有较大幅度增加, 提高了产量和水分利用率。根系吸水效率随土层深度增加呈下降趋势, I_1 在 30cm 以下其根系吸水效率超过了 I_2 处理, 并在 100~200cm 土层表现最为明显。 I_{CK} 除 0~30cm 土层外, 其余土层有效底墒供水率均较低; I_1 和 I_2 两处理 30~100cm 有效底墒供水率均在 84% 以上, 1~2m 土层内 I_1 大于 I_2 。 I_{CK} 由于土壤水分不足并未造成千粒重的明显下降, 相反, 3 个处理中最高; 土壤水分不足导致穗数、穗粒重、籽粒重和籽粒数的显著降低, 从而造成了最终产量的降低。产量水平上的水分利用效率 I_1 比其余处理提高了将近 14%, 其次为 I_{CK} , 最低的是 I_2 。在灌溉效率上, I_1 比 I_2 提高了将近 19%; 在相同灌溉量的前提下, 蒸腾效率 I_1 比 I_2 提高约 7%。 I_1 水分利用效率高于 I_2 和 I_{CK} 处理。可以认为: 配合充足底墒, 前期控水, 有限的一定量的水分拔节期 (关键期) 一次供给比在返青和拔节分别供给, 更为有效科学。

关键词: 冬小麦; 根系; 根系吸水效率; 蒸腾; 水分利用效率; 底墒 (ASWp); 有限供水

The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat

LIU Geng-Shan, GUO An-Hong, REN San-Xue, AN Shun-Qing, LIN Ri-Nuan, ZHAO Hua-Rong (Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (11): 2342~2352.

Abstract: It is well known that the agricultural water resource is very limited in North China (which lies in the continental monsoon region in warm temperate zone), especially during winter wheat growth period.

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目 (2001BA509B-15); 国家科技部农业科技成果转化资金资助项目 (合同编号: 02EFN217401301)

收稿日期: 2002-06-04; **修订日期:** 2003-05-30

作者简介: 刘庚山 (1966~), 男, 吉林长春人, 副研究员。主要从事农田生态环境和节水方面的研究。Email: lgs@cams.cma.gov.cn

Foundation item: The national “Tenth Five-year Plan” key project of science and technology of China (2001BA509B-15) and achievement-popularizing project for agricultural science and technology (02EFN217401301)

Received date: 2002-06-04; **Accepted date:** 2003-05-30

Biography: LIU Geng-Shan, Associate professor, mainly engaging in research of farmland ecological environment and water saving.

The sufficient use of available soil water at planting (ASWp) stored in the deep soil layer is an effective measure to improve water use efficiency (WUE). The key point of utilizing water in the deeper soil layer is exploiting the root water absorbing function in the profile, that is optimize the root distribution in different soil layer, improve the root water absorbing rate, and increase the available soil water, etc.

Soil water is one of the most important soil environmental factors that influence root development and distribution. The regulation of root distribution in different soil layers by applying different water regimes will effectively improve the soil water use by crops, especially the soil water in the deeper portion of the soil profile.

The experiment was conducted in a man-controlled water supply field with a rain-shelter at the Gucheng Agrometeorological Experimental Base (latitude 39°08'N, longitude 115°40'E, and 15.2 m elevation in North China) of the Chinese Academy of Meteorological Sciences from September 1999 to June 2000. The winter wheat cultivar was Jingdong No. 6, and planted at a rate of 262.5 kg/hm² with an average row spacing of 22.2 cm. After planting with sufficient ASWp (soil relative moisture 80%), three water regimes were established. The three schemes were I₁, 75 mm of irrigation water was applied at jointing stage; I₂, 37.5 mm irrigation water applied at the time the wheat began to green in the spring, and another 37.5 mm at jointing stage; and I_{CK}, no irrigation water applied during the whole growth season. All plots were covered by a man-operated rainfall shelter to prevent any precipitation from falling on the plots during precipitation events so only stored soil water and irrigation water were available to the wheat. Each scheme was replicated 3 times for a total of 9 plots. Plot were 4 m×2 m on loam soil and they were separated from adjacent plots by concrete walls 2 m deep. The objective was to study the impact of root development and distribution and soil water use under limited water stress and different water supply scheme.

Results for the I₁ treatment were that the root dry matter and root length density in the upper 30-cm soil layer were reduced, and there was more root dry matter in the deeper soil layer when compared to the other treatments. This resulted in greater use of water from the deeper soil layers and increased water use efficiency of the ASWp. The I₁ treatment had the least water stress of any of the treatments. In addition, adding water at the jointing stage increased the transpiration portion of evapotranspiration at this key growth stage, decreased the evaporation and increased the infiltration depth of irrigation water. This improved the water use efficiency of irrigation and soil water. It showed that with the same amount of irrigation water, the transpiration efficiency under I₁ was improved by 7% as compared to I₂.

The grain yield was the highest for the I₁ treatment and the lowest for the I_{CK} treatment. The thousand-grain weight for the I_{CK} treatment was the highest of all treatments that was possibly due to the compensation effect at the later growth stage.

In conclusion, sufficient ASWp and limited added water at jointing stage are more effective than sufficient ASWp and limited water split between the greening period of early spring and at jointing stage. Adding all of the limited water at jointing stage favors the root development and distribution in the deeper portion of the soil profile making it advantageous for water absorption from the deep soil layers. The water supply scheme of having a high level of ASWp at time of planting supplemented by added water at jointing stage is an effective approach to the efficient use of limited water resources and improving WUE.

Key words: winter wheat; root system; root water absorbing efficiency; transpiration; water use efficiency (WUE); available soil water at planting (ASWp); limited water supply

文章编号:1000-0933(2003)11-2342-11 中图分类号:S512 文献标识码:A

华北地区农业水资源紧缺,冬小麦生育期内干旱少雨。如何合理地利用有限的农业水资源,提高水分利用效率,人们作了大量的研究工作^[1~6],提出了一些诸如有限水分灌溉等措施^[7~11],对浇足底墒水已形成共识^[12~15];同时认为在冬小麦需水关键期进行有限供水是提高冬小麦水分利用效率的主要措施之一,但其中对如何利用底墒和土壤深层贮水,如何提高它们利用效率的研究并不多^[16]。

相关研究表明^[1~3,17],土壤深层储水具有很高的生物有效性,开发利用的潜力很大。对深层土壤水分有效利用的切入点应该是发挥深层根系的吸水潜力。相关研究显示:在深层土壤中尚保留较多可利用水的情况下,作物浅层根系量的减少是有益的^[18~20]。一些现代小麦品种其收获指数和水分利用效率的增加与浅层根系生物量和根长密度的减少有一定关系^[21]。这与自然选择条件下“深,广,分支多的根系是抗旱植物的特征之一”^[22]观点有重要区别。根系对土壤水分的吸收作用取决于土层中根系分布量、根系吸水速率及有效含水量等^[17,23,24]。无论土壤水分是否充足,根系分布在作物吸水过程中都起着非常重要的作用。现有相关研究大多认为,根系生长与吸水间呈非线性正相关关系^[24~28]。

根系生长发育状况在作物吸水过程中起着非常重要的作用,它决定着作物吸水区域、吸收各土层水分的数量。在影响根系生长发育的诸多土壤环境因素中,土壤水分和肥力状况对根系的生长和在土壤中的分布影响最大,特别是土壤水分对深层根系的发育和配置比例有明显的影响^[29,24,29,30]。

可见通过调控根系分布,可以增加作物对土壤水分的吸收利用,特别是增加作物对深层土壤水分的吸收利用。因此,本文拟从不同供水方式入手,探讨相应的根系分布特征及其对土壤水分利用的影响,为发挥作物深层根系的吸水潜力,提高农田水分利用效率提供理论依据。

1 材料及方法

1.1 试验概况

试验在中国气象局固城农业气象试验基地(河北省定兴县固城镇,39°08'N,115°40'E,海拔高度15.2m)的大型人工控制农田水分试验场进行。该基地是华北平原北部高产农业区的典型代表性区域,属于暖温带大陆性季风气候,地势平坦,耕层深厚;种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟;年平均降雨量528mm,近10a来,已降至450mm左右(冬小麦生育期内约150mm),主要集中在汛期(6~9月份),地下水位在20m以下。

试验于1999年9月开始,10月5日播种,次年3月28日达到返青普期,4月2日达到拔节普期,6月8日进入成熟期。试验场土壤质地为壤土,0~200cm土层平均田间持水量为22.71%(占干土重百分比),平均凋萎湿度为5.0%(占干土重百分比),土壤容重为1.43g/cm³。施肥水平与该地区大田施肥水平一致(施鸡粪38.6m³/hm²,纯氮215kg/hm²,五氧化二磷108kg/hm²),肥力中等。供试冬小麦品种为当地主栽的京冬6号,播种量为262.5kg/hm²,平均行距22.21cm。

1.2 试验设计

利用大型人工控制农田水分试验场内的9个小区,每个小区面积8m²(4×2m²),每个小区四周及地下均有隔离层(用砖和水泥砌成),隔离深度为2m,用以防止水分交换。播种时土壤湿度保持一致(充足底墒播种),底墒量为占田间持水量的80%左右(表1),(0~200cm土层平均有效底墒量334.5mm)。采用3种供水方式(如表1),分别为:I₁拔节期一次性供水

75mm;I₂返青期供水37.5mm,拔节期供水37.5mm;I_{CK}返青后生长期无水分供应。每个处理设3个重复。生育期内的全部自然降水用场内的大型电动防雨棚遮去。

1.3 观测项目和方法

冬前和返青后每隔10d观测土壤湿度,30~200cm用土壤水分中子仪(美国CPN公司503DR)观测,地表到30cm之间用土钻取土烘干称重法测定,两种观测方法的测量间距均为10cm。

表1 不同处理供水时间、灌水量和底墒

Table 1 The times and amount of water supply under different treatments (mm)

处理 Treatm- ents	返青期 (28/2) Returning -green	拔节期 (12/4) Jointing	供水 次数 Times	供水 总量 Total amount	2m深 底墒 ASWp (mm)
I ₁	—	75.0	1	75.0	324.7
I ₂	37.5	37.5	2	75.0	340.6
I _{CK}	—	—	0	0	338.1

根系的观测采用根钻法:取样时,用自制活动式可调根钻(内径 7cm)在行间和行上各打一钻,合并土样进行分析,将土样置于容器中,浸泡 10~20h 后,冲洗泥土并用 0.15mm 网筛过滤,洗净并剔除杂质和死根后,采用网格交叉法^[31]测定;测定深度为 200cm,40cm 以上每隔 10cm 取样,40~100cm 每隔 20cm 取样,100~200cm 每隔 30cm 取样。根干物质重采用烘干法。

在冬小麦各生长发育期测定叶面积指数,小麦发育期、生物量和考种测定等按照《农业气象观测规范》进行。试验地常规气象要素资料来自该基地的常规地面气象观测站。

1.4 计算方法

(1)在不同土层中,根长密度较大的处理,其吸水量相应也较大。一般公认根长密度与根系吸水量基本呈正相关。根据 Philip、Gardner 单根吸水模型理论^[32,33],可以得出,单位土体根系吸水速率与根长密度关系式为:

$$WU = RLD^\alpha, \quad \alpha \in [0.5, 2.2] \quad (1)$$

其中, WU 代表单位土体根系吸水速率, RLD 代表根长密度。利用本试验的土壤水分和根系的观测数据资料,经过统计相关分析,得到如下具体的模拟方程:

$$WU = 0.0753721 \times RLD^{1.3312} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.8863^*$$

单位土层根系吸水效率 $U(i)$ 可由下式定义并计算^[32]:

$$U(i) = \frac{WL(i)/WT}{RL(i)/RT} \quad (3)$$

式中, $WL(i)$ 为根系在土壤第 i 土层中吸水量, WT 为根系在作物水分供给层厚度内总吸水量, $RL(i)$ 为根系在土壤第 i 土层中的根长密度, RT 为总根长密度。

(2)有效底墒供水率^[3]计算表达式为:

$$SR = \frac{SET}{SW} \times 100\% \quad (4)$$

式中, SR 为某土层有效底墒供水率(%), SET 为该土层有效底墒供水量(mm), SW 为该土层有效底墒(mm)。

(3)蒸腾量的计算采用下面的公式^[4]:

$$Tr = 0.234758(LAI + 1)^{1.51445} \times ETp^{0.48185} \times \left(\frac{SW_e}{SW_t} \right)^{0.16849} - 1 \quad (5)$$

其中, Tr 为植株蒸腾量, LAI 为叶面积指数, ETp 为潜在蒸散量, SW_e 为 0~200cm 土壤实际含水量, SW_t 为 0~200cm 土层田间持水量。

2 结果及分析

2.1 有限供水与土壤有效含水量和根系分布的关系

有限供水对土壤湿度影响最明显的土层是 0~60cm 土层(图 1~图 4)。从 0~30cm 土层内的有效含水量和根长密度图(图 1)上,可以发现,由于不同的供水处理,出现了不同的土壤湿度剖面,从而诱发小麦根系发育产生不同的分布形式。

I_2 由于在返青期进行过一次供水,这样在拔节期前,该层土壤水分一直高于其他两个处理,从而使该层的小麦根长密度高于其它两个处理;虽然到了拔节的时候, I_1 进行了供水,且供水量是 I_2 的 2 倍,但由于前期的累计效应,使该层的小麦根长密度仍然以 I_2 的为最高,说明浅层根系对水分十分敏感。图 2 表明, 30~60cm 土层在返青之后, I_2 进行了供水(37.5mm),开始

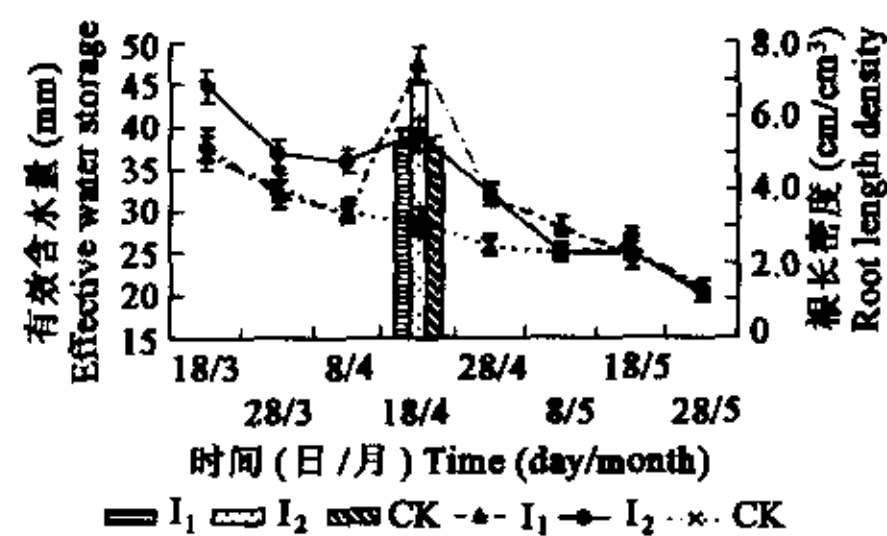


图 1 0~30cm 不同发育阶段各处理的有效含水量和根长密度

Fig. 1 Effective water storage and root length density in 0~30cm soil layer under different treatments

该层的土壤湿度高于其它两个处理,但随着冬小麦的生长,根系的下扎,逐渐开始吸收利用该层的土壤水分,土壤湿度曲线持续下降, I_1 拔节期浇水增加了该层土壤湿度,并使 I_1 土壤湿度持续下降的趋势有所缓和, I_{CK} 土壤湿度下降较缓慢,显然对该层水分的利用率要低于 I_1 和 I_2 ;根长密度仍以 I_2 处理的为最大,拔节时,虽然 I_{CK} 的土壤湿度最大,但其对应的根长密度却最小,这主要是由于它前期从未接受过任何水分(自然和人工)供给的原因造成的。因而其吸收水分的能力也低于另两个处理。60~100cm 土层(图3)显示,拔节以后3个处理60~100cm 土层的土壤湿度均有明显的下降。 I_1 和 I_2 的根长密度均大于 I_{CK} ,接近 $2.3\text{cm}/\text{cm}^3$ 。 I_1 和 I_2 之间的差距非常小(约5%)。在100~200cm 土层内(图4), I_1 和 I_2 在4月28日后土壤湿度曲线有明显的降低,这是由于在这之后,根系下扎100cm 以下土层,吸收利用该层内的水分所致;而 I_{CK} 在此之后,土壤湿度变化明显缓慢。并且在最后三旬高于 I_1 和 I_2 ;根长密度在该层出现的明显变化就是 I_1 高于 I_2 和 I_{CK} ,并且 I_{CK} 和 I_2 的根长密度几乎一样大小。

由表2可见, I_{CK} 具有较高的总根生物量和上层(0~60cm)根生物量; I_1 处理100cm 以下根生物量高于其它处理,这显然对于 I_1 利用100~200cm 土层的水分极为有利。

表2 开花期各处理各土层根生物量变化情况

Table 2 The root biomass in different soil layers under three treatments at flowering stage

土层 Soil layer	根生物量(g/m^2) Root biomass		
	I_1	I_2	I_{CK}
0~30cm	185.1c	217.8b	237.4a
30~60cm	27.3c	23.3b	26.5a
60~100cm	26.1b	24.1b	36.9a
100~200cm	19.5b	11.6a	10.6a
0~100cm	238.5b	265.3a	300.8a
0~200cm	258.0c	276.9b	311.4a

* 字母相同者表示差异不显著,字母不同者表示差异显著(下同表2) Means within a row followed by the same letter are not significantly different at 5% level by LSD test, the same below

综上所述, I_2 在0~30cm 和30~60cm 土层内根长密度较高(图1~图4),这符合 I_2 浇水量少而次数多,从而根系在表层分布多,以同土壤蒸发竞争水分的特点。显然,土壤水分匮乏的 I_{CK} ,其主要通过增加根系生长来寻找土壤水而增加水分利用,而在有频繁灌溉或降水的条件下(如 I_2),根系通过增加根长和根系的次级分支,增加水分吸收面积以同蒸发竞争土壤水。但是这两种策略与向深层土壤配置较多根系、增加深层土壤水分利用的 I_1 相比较,后者在水分利用上更具优势。

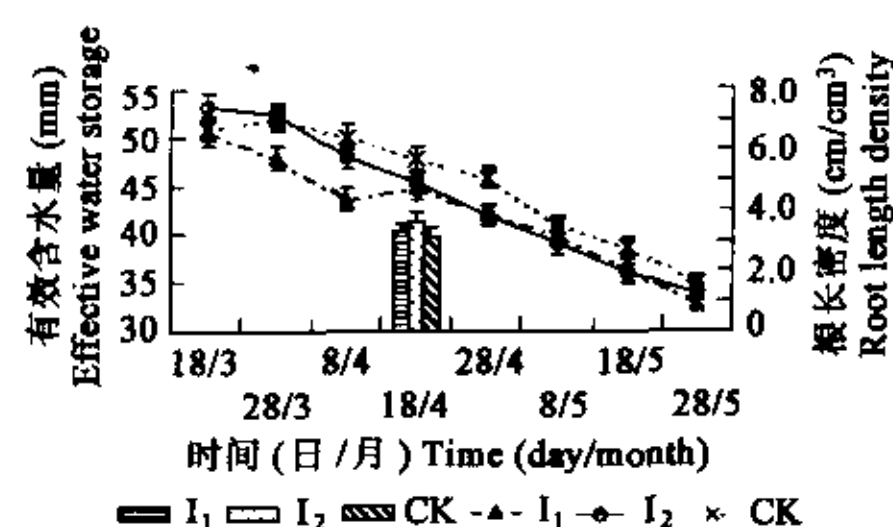


图2 30~60cm 不同发育阶段各处理的有效含水量和根长密度

Fig. 2 Effective water storage and root length density in 30~60cm soil layer under different treatments

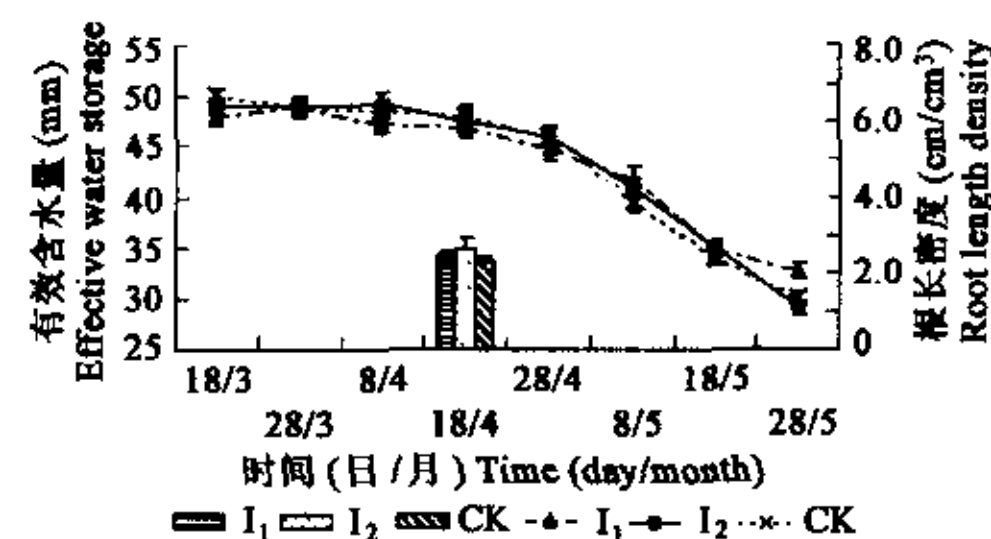


图3 60~100cm 不同发育阶段各处理的有效含水量和根长密度

Fig. 3 Effective water storage and root length density in 60~100cm soil layer under different treatments

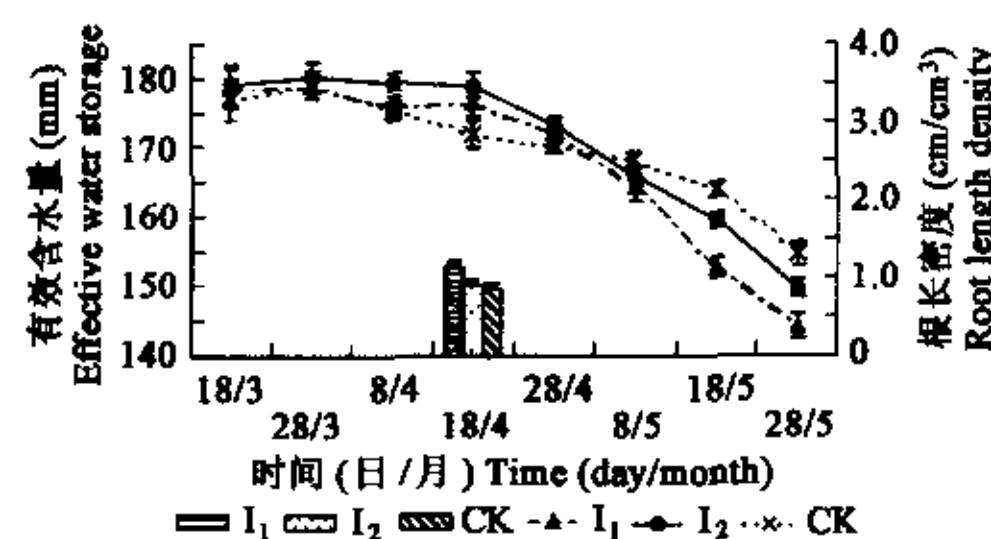


图4 100~200cm 不同发育阶段各处理有效含水量和根长密度

Fig. 4 Effective water storage and root length density in 100~200cm soil layer under different treatments

2.2 根系生长分布与土壤水分吸收利用的关系

根据(1)、(2)和(3)式计算的拔节-成熟阶段各土层根系吸水效率如表3所示。

表3显示:根系吸水效率随土层深度增加呈下降趋势。

在表层(0~30cm), I_2 不仅根长密度最大(图1a), 根系吸水效率也最大, 比 I_{CK} 和 I_1 分别高出20%和12%。由于 I_{CK} 的根生物量76.24%分布在0~30cm

土层中(见表2), 因而该层的根长密度占整层根长密度的比例高于其他两个处理, 即在公式(3)中其分母最大, 所以其根系吸水效率在该层最小。在30~100cm土层内, I_{CK} 由于表层极度干旱, 为了满足作物冠层蒸腾需求, 虽然根长密度(RLD)较小, 但根系吸水效率最高, 其次是 I_1 处理(60~100cm)。 I_1 在30cm以下其根系吸水效率超过了 I_2 处理, 并在100~200cm土层表现最为明显, 说明同样的灌溉量在华北北部平原旱作麦田里, 是否使用在关键期 and 如何分配, 其结果是有差别的, 这一点符合优化灌溉理论的。

根系的吸水量是各土层根系吸水之和, I_{CK} 虽然有最大的根生物量, 但其绝大部分(85%)分布在上层(0~60cm)范围内, 尤其在表层(0~30cm), 同时由于返青后 I_{CK} 没有任何的水分供给, 因此, 其根系总吸水量并不最多。 I_{CK} 在30~60cm土层内根系吸水效率出现最大值, 是由于公式(3)中分母较低造成的。

2.3 人工控制有限供水对底墒利用的影响

用公式(4)计算得到冬小麦生长期各土层底墒利用情况(表4), I_1 和 I_2 两处理0~100cm土层有效底墒供水率相差无几, 但 I_1 处理100~200cm有效底墒供水率比 I_2 高2.4%, 相当于 I_1 多利用了5mm的深层储水; I_1 处理0~200cm有效底墒供水率高, 这对底墒量略低(比 I_2 低15.8mm见表1)的 I_1 来讲是十分可贵的, 显然100~200cm土层底墒的有效利用是十分重要的。 I_{CK} 除0~30cm土层外, 其余土层有效底墒供水率均较低; 另外 I_{CK} 在收获时土壤含水量最高(图2~图4), 即土壤残存水分最多, 在本试验条件下, 显然该处理对土壤水分的利用不如其他两个处理。3个处理0~30cm土层有效底墒供水率均较高, 为87%~90%; I_1 和 I_2 两处理30~100cm有效底墒供水率也均在84%以上。可见非充分供水可大大提高底墒利用率。

2.4 有限供水处理与蒸腾的关系

为了了解不同有限供水处理小麦总耗水中用于作物蒸腾的情况, 根据冬小麦的叶面积指数和土壤湿度状况以及试验区的潜在蒸散量, 用公式(5)计算了返青以后(3月1日)至灌浆后期(5月31日)蒸腾量占同期耗水量(0~200cm)的比例(表5)。

由于无任何水分补给, 造成 I_{CK} 叶面积发育不良, 因而 I_{CK} 蒸腾量在4~5月份都偏低。 I_1 与 I_2 相比较, 虽然 I_1 在4月份拔节期浇水造成有效蒸腾比例相对偏低, 但由于这次浇水是在小麦需水关键期, 明显地增加了开花期和灌浆期的蒸腾消耗, 有利于提高水分利用效率; 而 I_2 返青后第一次浇水基本上被无效蒸发散失了。 I_1 在5月份用于蒸腾耗水约64.7mm, 由前面的分析可知, I_1 处理100~200cm土层土壤水供应量比 I_2 约高出5mm, 而该土层水分蒸发损失很少, 因而相当于在开花灌浆期在100~200cm土层增加了7.7%的有效水分消耗。

2.5 有限供水对产量及构成因子的影响

表3 不同处理不同土层根系吸水效率(%)

Table 3 Root water extraction efficiency for different layers under different treatments (%)

处理 Treatments	土层深度 Soil layer			
	0~30cm	30~60cm	60~100cm	100~200cm
I_1	6.167c	5.234b	3.786a	0.975b
I_2	6.979b	4.893b	3.124b	0.769a
I_{CK}	5.555a	7.999a	3.961a	0.673a

表4 冬小麦生长期各土层有效底墒供水率

Table 4 Consumption ratio of ASW in each soil depth during growth period under different treatments

土层(cm) Soil layer	有效底墒供水率(%) Consumption ratio of effective ASWp (%)		
	I_1	I_2	I_{CK}
0~30	87.2c	87.8b	90.6a
30~60	90.0b	84.7b	71.5a
60~100	84.7b	89.7b	74.3a
100~200	34.2c	31.8b	25.2a
0~100	78.8b	78.3b	72.5a
0~200	55.3b	51.4b	45.4a

表 5 3~5 月份冬小麦不同处理耗水量、蒸腾量及蒸腾量占同期耗水量的比例

Table 5 Water consumption, transpiration(Tr) and Tr ratio under each treatment from third 10-day on March to May

时间 Time	I ₁			I ₂			I _{CK}		
	耗水量(mm)	蒸腾量	蒸腾比	耗水量(mm)	蒸腾量	蒸腾比	耗水量(mm)	蒸腾量	蒸腾比
	Water consumption (mm)	Tr. (mm)	Tr. ratio (%)	Water consumption (mm)	Tr. (mm)	Tr. Ratio (%)	Water consumption (mm)	Tr. (mm)	Tr. ratio (%)
3 月下旬 Last 10-day on Mar.	10.4c	3.1b	29.4a	19b	3.6b	19.1b	10.8a	3.1a	28.7a
4 月 April	96.9b	51.6b	53.2c	89.2b	57.3c	64.2b	50.8a	25.6a	50.4a
5 月 May	103.7c	64.7c	62.4	85.8b	43.9b	51.2b	49.6a	21.1a	42.5a
3 月下旬至 5 月总量 Total	211b	119.4c	56.6	194b	104.9b	54.1b	111.2a	49.8a	44.8a

由表 6 小麦产量及产量构成因素可见, I_{CK} 由于土壤水分不足并未造成千粒重的明显下降, 相反, 3 个处理中它最高, 一般认为干旱胁迫导致繁殖器官减少, 并早衰, 干物质向籽粒转移, 造成千粒重增加。但土壤水分不足导致穗数、穗粒重、籽粒重和籽粒数的显著降低, 从而造成了最终产量的降低。I₁ 和 I₂ 相比较, I₁ 总穗数虽然相对减少, 但由于增加了籽粒数和籽粒重, 从而产量较 I₂ 增加了约 16%。

2.6 有限供水对水分利用效率的影响

本试验不是以追求小麦高产为目的, 而是以提高水分尤其是土壤深层贮水的利用率为目标, 因此, 如表 6 所显示, 产量不是很理想, 但却提高了水分利用效率和灌溉效率, 产量水平上的水分利用效率 I₁ 比其余处理提高了将近 14%, 其次为 I_{CK}, 最低的是 I₂; 在灌溉效率上, I₁ 比 I₂ 提高了将近 19%; 在相同灌溉量的前提下, 蒸腾效率 I₁ 比 I₂ 提高约 7%。I₁ 水分利用效率高于 I₂ 和 I_{CK} 处理。

表 6 不同处理的冬小麦产量因子情况

Table 6 Factors of yield under different treatments for winter wheat

处理 Treatments	穗数(个) Spike number	穗粒重(g) Grain weight per spike	籽粒数(粒) Grain number	籽粒重(g) Grain weight	千粒重 Kilo-grain weight(g)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)
I ₁	452ab	0.895c	10293c	404.5c	39.3b	4045.4c
I ₂	471b	0.722b	8814b	340.1b	38.6b	3400.9b
I _{CK}	393a	0.565a	5093a	222.0a	43.1a	2220.5a

* 表中观测数据为 1 m² 的考种资料 The data come from the information measured at harvesting in 1 m²

以上充分说明, 在不增加灌溉量的前提下, 在小麦生长的关键期灌溉是一种行之有效的节水办法。

3 讨论及结论

相关研究^[8~10,34]认为: 限量供水可以增加深层土壤贮水的利用程度, 苗期和灌浆期为水分亏缺不敏感期, 拔节期为亏缺敏感期。陈晓远^[35]和杨培岭等^[6]报道, 拔节期复水对根重、叶重和穗重增长的促进作用都很大。马瑞昆^[36]等也报道过前期限制供水有利于前期根系发育, 前期控水处理强化了根系吸水能力, 提高了作物对底墒尤其是对 1~2m 深层底墒的利用, 有利于产量形成阶段光合物质生产。但对限量供水如何调控根系分布等方面几乎没有涉及或者研究不够详细, 本研究在此基础上给出了如下一些较详细的结论:

(1) 赵松岭等^[37]认为: 作物的生产过程和产量形成是一个种群问题, 作物种群是长期人工选择的结果, 作物产量的提高过程是一个不断加强的人工选择过程。而人工选择的目标是获取较高的经济产量。所以, 它要求的不是个体具有较高的竞争能力, 而是具有较高的繁殖分配(以种子作为产量的作物), 以使群体有较高的产量。I₁ 虽然只在拔节期浇水 75mm, 但由于浇水前 0~100cm 处土壤相对湿度降至 55%~60% 左右(4 月 10 日测定值为 58.2%, 4 月 14 日浇水), 形成了一定程度的水分亏缺(水分胁迫)。这有利于控制无效分蘖, 从而控制优化了群体结构, 集中有限的水分供应相对较小的穗粒数生长, 虽然减少了总穗数, 但同 I₂、I_{CK} 两处理相比籽粒数和籽粒重有较大幅度增加, 因而有利于产量提高和水分利用率增加。达到

了有限水分胁迫增产的目的。

(2) I_1 浅层根生物量和根长密度的减少及深层根生物量和根长密度的增加是有积极意义的。李凤民等^[20,48]曾报道,在上层土壤比较干旱且根量较多时将大量形成非水力根信号,从植物非水力根信号的生理调节作用和生活史进化角度看,对小麦产量形成有一定抑制作用。在大田条件下浅层根少深层根多有助于稀释根信号作用;充足的底墒可促进小麦形成深根系,抑制根信号的强烈表达,并提高小麦籽粒产量和水分利用效率^[20,39]。本文 I_1 处理符合这种根系分布特征,因而得到了较高的籽粒产量。从开发利用土壤水分供应潜力的角度看,在降水少的情况下,表土层(0~30 cm)土壤水分供应量是有限的,而该土层内根量和根长密度却占总量的大部分,继续增加该土层内根生物量所能获得的土壤水量的增加已经很有限;而增加深层根系对利用储量较高的深层土壤贮水则是明显而有效的。当然,促使根系深扎并增加深层根系干物质分配可以通过浇水、深施肥、深耕、上下茬作物搭配等实现,但是控制上层根系的生长只能通过土壤水分调节来实现。充足的底墒配合有限水分亏缺可较好地起到控制上下层根系干物质分配的作用,有利于合理利用土壤贮水特别是深层底墒。

(3) 李凤民等的试验研究^[40]指出:小麦根系总生物量高,不能代表吸收土壤水分多、产量高。因为由于后期供水不足,致使中下部的根系不能发挥作用。因此,有时情况可能相反。另外,Barraclough 等人提出^[41]:当土壤中根长密度小于 $1.0\text{cm}/\text{cm}^3$ 时,根系的不足是限制作物充分利用土壤水分的主要因素。表 2 显示 I_{CK} 的表层根量和剖面总根量较其他处理多,说明干旱条件下利于根系的生长,但 I_{CK} 的总根量最大,其从土壤中吸收水量并不是最多,因为返青后该处理一直没有水分供给,且其根系绝大部分分布在表层,中下层根长密度低于 Barraclough 给出的值。水分胁迫条件不足以维持根冠同时增长,其耗水量最小(表 5),导致产量降低,但产量水平上的水分利用效率并不最低(表 7)。

表 7 不同处理冬小麦的水分利用效率

Table 7 The water use efficiency under different water supply treatments

处理 Treatments	蒸腾效率 Tr. efficiency (kg/m^3)	灌溉效率 Ir. Efficiency (kg/m^3)	灌溉占总蒸散比例 Ir. /Et (%)	产量水平上的水分 利用效率 WUE on yield level(kg/m^3)	全生育期总耗水 量(mm)Total water consumption
I_1	3.3712b	5.3939b	26.42a	1.4249b	283.9b
I_2	3.1526b	4.5345a	27.02a	1.2251a	277.6b
I_{CK}	4.7245a	—	—	1.2510a	177.5a

(4) 分析表明:决定小麦产量的主要因素是小麦早期繁殖器官的发育状况,亦即小穗和小花形成的数量和质量,千粒重和单位面积的穗数对产量影响不大^[15]。 I_1 浇水次数少但在关键期,降低了水分的无效蒸发,加深了灌水入渗深度,在根系生长发育旺盛时期保持了一定的土壤水分,有利于促进小麦根系的深扎,提高了土壤水供应量;同时增加了需水关键期的有效蒸腾耗水(表 5),保证了小穗和小花形成的数量和质量。这也是 I_1 虽然单位面积的穗数有所减少,但是籽粒数和籽粒重有较大幅度增加(表 6)的重要原因之一。最后,保障了籽粒产量,提高了水分利用效率。

为抗旱和提高水分利用效率,李凤民等提出:麦类作物根系的理想分配型应当是减少表土层中的根系分布,适当增加深土层中的根量^[38]。本试验的结论与这一观点一致。可以认为:配合充足底墒,前期控水,有限的一定量的水分拔节期(关键期)一次供给比在返青和拔节分别供给,更能调控根系分布,促进小麦根系生长发育向理想分配型发展。即表层根系减少,根系向土壤深层发展(表 2 和图 1),提高土壤深层土壤水分利用效率,另外还可产生有限水分胁迫和非水力根信号效应,不失为一种节约农业水资源提高水分利用率的有效途径。

References:

- [1] Liu G S, An S Q, Lu H Q, et al. Research on the effect of soil moisture before sowing on the growth and yield of winter wheat in North China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11(Sup.): 164~169.

- [2] Li Y S, Yu B P. The research on the effect of deep soil water on wheat yields. *Acta Pedologica Sinica*, 1980, **17**(1): 43~53.
- [3] An S Q, Liu G S, Lu H Q, *et al.* Research on water supply characteristics of soil moisture before sowing of winter wheat. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, **11**(Sup.): 119~127.
- [4] Zhu Z X, Zhao G Q, Fang W S, *et al.* A study of water dynamics and yield-increasing mechanism of winter wheat fields in different soil water and mulching conditions. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, **11**(Sup.): 137~143.
- [5] Ma Z M. Studies on the relationship between crop and water under limited irrigation. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, **16**(2): 75~79.
- [6] Yang P L, Liu H L, Ren S M. Root and shoot relations of winter wheat under different irrigation conditions. *Journal of China Agricultural University*, 1997, **2**(6): 57~62.
- [7] Huang Z B. Effect of limited water supply on water use efficiency of crop and its mechanism. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, **4**(3): 92~94.
- [8] Hu F, Zhao J B. Field experimental studies of ecophysiological effects on limited water supply for winter wheat. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1994, **15**(6): 29~31.
- [9] Xia G J, Yan Y L, Cheng S M, *et al.* Research on compensatory effects to water deficits on dry-land winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, **19**(1): 79~82.
- [10] Wang J R, Li S X. Effect of water-limited deficit stress in different growth stages on winter wheat grain yields and their yield constituents. *Acta Bot. Boreal. -Occidents. Sinica*, 2000, **20**(2): 193~200.
- [11] Zhang X Y, You K Z, Wang X Y. A preliminary study on the regulated deficit irrigation system of winter wheat. *Eco-Agriculture Research*, 1998, **6**(3): 33~36.
- [12] Cheng X G, Wang D S, Zhang M R, *et al.* Effects of different soil moisture conditions on winter wheat growth and nutrient uptake. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, **29**(4): 67~74.
- [13] Li J M, Wang P, Zhou D X, *et al.* Effect of the irrigation systems of winter wheat on the soil storage water utilization. *Eco-Agriculture Research*, 1999, **7**(1): 54~57.
- [14] Ju H, Lan X, Li J M, *et al.* Effects of different irrigation systems on winter wheat yield and water consumption. *Journal of China Agricultural University*, 2000, **5**(5): 23~29.
- [15] Li F M, Liu X L, Wang J. Effects of Pre-sowing irrigation and Pfertilization on spring wheat yield information. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(11): 1941~1946.
- [16] Liu G S, Guo A H, An S Q, *et al.* A scientific approach of using water resources in deep soil layer -farmland experimental studies of utilizing water by fertilizer. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(4): 423~429.
- [17] Hamlin A. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 1985, **38**: 95~158.
- [18] Zhang D Y, Jiang X H. Ecological analysis on redundancy of crop root system growth in semi-arid area. *Acta Bot. Boreal. -Occidents. Sinica*, 1995, **15**(5): 110~114.
- [19] Passioura J B. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management*, 1983, **7**: 265~280.
- [20] Li F M, Guo A H, Luo M, *et al.* Effect of water supply from deep soil on dry matter production of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(6): 575~579.
- [21] Siddique K H M, Belford R K, Tennant. Root; shoot ratio of old and modern, tall and semi-dwarf wheat in a Mediterranean environment. *Plant and Soil*, 1990, **121**: 89~98.
- [22] Kramer P J. Plant and soil water relationships; a modern synthesis. McGraw-Hill, New York, NY, 1969. 482.
- [23] Robertson M J, Fukai S, Ludlow M M, *et al.* Water extraction by grain sorghum in sub-humid environment. I. Extraction in relation to root growth. *Field Crops Res.*, 1993, **33**: 99~112.
- [24] Zhang X Y. *Crop root system and soil water utilization*. Beijing: Meteorology Press, 1999. 100~131.
- [25] You K Z, Wang H X. *Assessment on soil water resources in farmland*. Beijing: Meteorology Press, 1996. 79~98.
- [26] Liu C M, Wang H X, *et al.* *The interface processes of water movement in the Soil-Crop-Atmosphere system and*

- water-saving regulation*. Beijing: Science Press, 1999. 92~102.
- [27] Liu C M, Yu H N. *Experimental research on Soil-Plant-Atmosphere Continuum in water dynamic*. Beijing: Meteorology Press, 1997. 18~32.
- [28] Shaozhong Kang, Fucang Zhang, Jianhua Zhang. A simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region. *Agricultural Water Management*, 2001, **49**: 115~129.
- [29] Feng G L, Liu C M. Studies on the control of soil water profile and root distribution. *Acta Geographica Sinica*, 1997, **52**(5): 461~469.
- [30] Zhang X Y, Yuan X Q, Han R E, et al. Studies on root system growth characteristics of winter wheat and effects of soil environment. *Eco-Agriculture Research*, 1994, **2**(3): 62~67.
- [31] Marsh B. Measurement of length in random arrangements of lines. *J. Appl. Ecol.*, 1971, **3**: 139~145.
- [32] Proffitt A P B, Berliner P R, Oosterhuis D M. A comparative study of root distribution and water extraction efficiency by wheat grown under high and low frequency irrigation. *Agron. J.*, 1985, **77**: 655~662.
- [33] Gardner W R. Relation of root distribution to water and availability. *Agron J.*, 1964, **56**: 41~45.
- [34] Lan X, Zhou D X. Effects of irrigation on yield components and grain carbohydrate sources of winter wheat. *Journal of China Agricultural University*, 2001, **6**(1): 17~22.
- [35] Chen X Y, Luo Y P. Effect of fluctuated soil water condition on dry matter allocation and grain yield in winter wheat. *Journal of China Agricultural University*, 2001, **6**(1): 96~103.
- [36] Ma R K, Jia X L, Jian J L, et al. Characteristics of root and canopy photosynthesis of early water saving in winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, **21**(2): 88~91.
- [37] Zhao S L, Li F M, Zhang D Y, et al. Crop production is a population process. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(1): 100~104.
- [38] Li F M, Yan X, Guo A H, et al. A discussion on the non-hydraulic root-sourced signals and life history strategy of wheat crops. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(3): 510~513.
- [39] Li F M, Yan X, Li F R, et al. Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 2001, **47**(1): 25~35.
- [40] Li F M, Yan X, Wang J, et al. The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, **34**(3): 330~333.
- [41] Barraclough P B, Weir A H. Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat. *J. Agric. Sci.*, 1988, **110**: 207~216.

参考文献:

- [1] 刘庚山, 安顺清, 吕厚荃, 等. 华北地区不同底墒对冬小麦生长发育及产量影响的研究. *应用气象学报*, 2000, **11** (Sup.): 164~169.
- [2] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层贮水对小麦产量效应研究. *土壤学报*, 1980, **17**(1): 43~53.
- [3] 安顺清, 刘庚山, 吕厚荃, 等. 冬小麦底墒供水特征研究. *应用气象学报*, 2000, **11**(Sup.): 119~127.
- [4] 朱自玺, 赵国强, 方文松, 等. 不同土壤水分和不同覆盖条件下麦田水分动态和增产机理研究. *应用气象学报*, 2000, **11**(Sup.): 137~143.
- [5] 马忠明. 有限灌溉条件下作物-水分关系的研究. *干旱地区农业研究*, 1998, **16**(2): 75~79.
- [6] 杨培岭, 刘洪禄, 任树梅. 节水条件下大田冬小麦的根冠关系. *中国农业大学学报*, 1997, **2**(6): 57~62.
- [7] 黄占斌. 有限供水对作物水分利用率的影响及其机理. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, **4**(3): 92~94.
- [8] 胡芬, 赵聚宝. 有限供水下冬小麦生态生理效应的田间试验. *中国农业气象*, 1994, **15**(6): 29~31.
- [9] 夏国军, 阎耀礼, 程水明, 等. 旱地冬小麦水分亏缺补偿效应研究. *干旱地区农业研究*, 2001, **19**(1): 79~82.
- [10] 王俊儒, 李生秀. 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. *西北植物学报*, 2000, **20**(2): 193~200.
- [11] 张喜英, 由懋正, 王新元. 冬小麦调亏灌溉制度田间试验研究初报. *生态农业研究*, 1998, **6**(3): 33~36.
- [12] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响. *中国农业科学*, 1996, **29**(4): 67

~74.

- [13] 李建民,王璞,周殿玺,等.冬小麦灌溉制度对土壤贮水利用的影响.生态农业研究,1999,7(1):54~57.
- [14] 居辉,兰霞,李建民,等.不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究.中国农业大学学报,2000,5(5):23~29.
- [15] 李凤民,刘小兰,王俊.底墒与磷肥互作对春小麦产量形成的影响.生态学报,2001,21(11):1941~1946.
- [16] 刘庚山,郭安红,安顺清,等.开发利用土壤深层水资源的一种有效途径——“以肥调水”的大田试验研究.自然资源学报,2002,17(4):423~429.
- [18] 张大勇,姜新华.半干旱地区作物根系生长冗余的生态学分析.西北植物学报,1995,15(5):110~114.
- [20] 李凤民,郭安红,雒梅,等.土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响.应用生态学报,1997,8(6):575~579.
- [24] 张喜英.作物根系与土壤水利用.北京:气象出版社,1999.100~131.
- [25] 由懋正,王会肖.农田土壤水资源评价.北京:气象出版社,1996.79~98.
- [26] 刘昌明,王会肖,等.著.土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控.北京:科学出版社,1999.92~102.
- [27] 刘昌明,于沪宁.土壤-作物-大气系统水分运动试验研究.北京:气象出版社,1997.18~32.
- [29] 冯广龙,刘昌明.人工控制土壤水分剖面调控根系分布的研究.地理学报,1997,52(5):461~469.
- [30] 张喜英,袁小泉,韩润娥,等.冬小麦根系生长规律及土壤环境条件对其影响的研究.生态农业研究,1994,2(3):62~67.
- [34] 兰霞,周殿玺.灌溉制度对冬小麦产量结构形成与产量物质来源的影响.中国农业大学学报,2001,6(1):17~22.
- [35] 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.中国农业大学学报,2001,6(1):96~103.
- [36] 马瑞昆,贾秀领,蹇家利,等.前期控水条件下冬小麦的根系和群体光合作用特点.麦类作物学报,2001,21(2):88~91.
- [37] 赵松龄,李凤民,张大勇,等.作物生产是一个种群过程.生态学报,1997,17(1):100~104.
- [38] 李凤民,鄯珣,郭安红,等.试论麦类作物非水力根信号与生活史对策.生态学报,2000,20(3):510~513.
- [40] 李凤民,鄯珣,王俊,等.地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理.中国农业科学,2001,34(3):330~333.