

水分胁迫对冬小麦物质分配及 产量构成的影响

於 琨¹, 于 强¹, 罗 毅¹, 刘敏华²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 安徽农业大学农学系, 合肥 230036)

摘 要:通过设置不同土壤水分条件和不同生育期受旱处理, 研究土壤水分条件对冬小麦生长发育的影响。从器官水平上详细考察了水分条件对小麦物质积累、分配以及产量的影响, 并建立产量和耗水量关系。在相对适宜的土壤水分条件, 茎秆所占比例较小, 为 24%, 穗部则占 56%; 而过度灌溉和水分亏缺条件下, 茎秆所占比例较大, 分别为 36% 和 37%, 穗部比例相对较小, 仅为 43% 和 48%。各种条件下均以茎秆对产量的贡献量大。相对适宜的土壤水分条件, 茎秆对产量的贡献量最大, 为 0.308g/茎; 水分亏缺条件下, 叶鞘对产量贡献量较适宜土壤水分条件的叶鞘贡献量要大, 分别为 0.18 克/茎和 0.09 克/茎; 而过度灌溉条件下各器官对产量的贡献量均较小。根据实测产量和蒸散耗水量模拟的产量、水分利用效率与蒸散耗水量的关系可知: 禹城地区在现有的肥力水平和栽培管理措施下冬小麦的理论最大产量为 6240kg/hm², 蒸散耗水量为 473mm, 而获得最高水分利用效率的蒸散耗水量为 403mm。由于该地区地下水埋深浅, 地下水对冬小麦生育期需水量的补给作用明显, 试验年份冬小麦拔节期至成熟期地下水补给量占同期耗水量的 22%。

关 键 词: 水分亏缺; 冬小麦; 物质分配; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S17

在我国粮食主产区的黄淮海平原, 平均每亩耕地的可利用水量只占全国的 1/5^[1], 而另一方面我国的农业用水效率极低^[2]。因此如何充分利用有限的水资源, 提高的农业水分利用效率, 促成增产增收成为节水农业研究的主要内容。前人的研究已经表明适度的水分条件有利于提高作物的水分利用效率^[4-6]。但是在华北平原因水分条件的差异而导致的物质积累和分配情况, 以及各器官对产量贡献的情况等方面的报道却尚不多见。研究通过对冬小麦实施不同的水分处理来考察因水分条件的差异而导致物质积累和分配情况以及地上各部分 (器官) 对产量的贡献情况, 建立产量和耗水量关系, 为提高作物水分利用效率和制定合理的灌溉方案提供参考。

1 研究方法

1.1 试验地概况

1999 年 10 月~2001 年 6 月在中国科学院禹城综合试验站进行试验。该站 (36°56'N, 114°36'E) 位于山东省西北部, 平均海拔约 20m, 土壤为黄河冲积物, 土质以粉沙和轻壤为

收稿日期: 2003-10; 修订日期: 2004-01.

基金项目: 中国科学院禹城综合实验站开放课题资助.

作者简介: 於琨 (1976-), 女, 安徽全椒人, 在读博士生, 研究方向为农业生态及生态系统脆弱性评价。

主,土壤肥力中等。禹城地区属典型的季风气候,降水年内分布不平衡,冬春季节少,仅占12%。受引黄水影响,地下水位较高,常年在0.2~4.2m之间^[7]。

1.2 材料与方法

试验在站内的水分胁迫试验场进行。小区面积为6.67m²,深1.5m,无底,用砖质水泥墙面砌抹,以防止水分侧渗。供试材料为冀麦4564,播期为10月12日,密度相当于12.6万基本苗/亩。试验设五个水分处理,T₁为干旱处理,整个生育期无灌溉,并用防雨棚遮挡降水;T₂为适中处理,以田间最大持水量的60%为灌溉下限。T₃为充分湿润处理,以田间最大持水量的80%为灌溉下限。T₄和T₅为阶段受旱处理。其中T₄为返青—拔节期受旱,即在此生育期内控制土壤含水量不超过田间持水量的50±5%,其他时期则以田间持水量的70%为灌溉下限。T₅为抽穗—灌浆期受旱,同样也是在此生育期内控制土壤含水量不超过田间持水量的50±5%,其他时期则以田间持水量的70%为灌溉下限。每个处理两次重复,其它管理措施同大田。水分池外同期播种同密度同品种保护行。

土壤水分用IH-II型智能中子水分测定仪测定,每5天一次,遇降水和灌溉加测一次。生物量测定每5天一次,取长势整齐均一的分蘖10个,分别测定其叶片、叶鞘、茎秆、穗的鲜、干重。收获时每个处理单打单收,预留计产行,折算出不同处理的总产量,其他项目同常规烤种。

2 结果与分析

2.1 水量平衡的计算

由于试验处理期间的降水量仅为49mm,较少的降水使得土壤水分更加依赖于人工补给,同时地下水位变化缓和,对作物生长的影响变动较小,因此在水量平衡的计算中可予以适当简化。

冬小麦生育期内水量平衡方程为:

$$\Delta W = (P + I + u) - (R + D + E + T) \quad (1)$$

ΔW 为土壤层含水量变化, P 为降水量, I 为灌水量, u 为毛细上升水, R 为地表径流, D 为下渗漏水量, E 为土壤蒸发量, T 为植物蒸腾量。

试验期间没有出现暴雨,最大降水量仅17mm,因此地表径流量为0。由于禹城地区地下水位相对较高,对农作物生长影响较大,综合考虑地下水补给量和下渗漏水量,地下水补给方程简化为

$$Eg = \mu \Delta h \quad (2)$$

Eg 为地下水水对作物生长的补给量, μ 为给水度,禹城地区 μ 值为0.05^[7], Δh 为地下水位变化。

因此水分平衡方程简化为

$$\Delta W = (P + I + Eg) - (E + T) \quad (3)$$

故作物耗水量可表示为:

$$ET = P + I + Eg - \Delta W \quad (4)$$

表 1 不同处理水分收支状况 (单位:mm)
Tab.1 Water budget in different treatments (Unit:mm)

	土壤含水量		灌水量	地下水补给量	降水量	耗水量
T ₁	252	97	0	193	0	348
T ₂	267	272	182	193	49	419
T ₃	265	267	299	193	49	543
T ₄	254	232	147	193	49	411
T ₅	275	254	194	193	0	408

表 1 可以看出不同处理的生育期耗水量有较大差异,其中 T₁ 最小,T₃ 最大,两者相差约 200mm,T₂、T₄、T₅ 的耗水量差异不大,但灌溉量和灌溉时期均有差异;并且不同处理收获后土壤墒情差异较大。就试验地区而言,地下水补给是冬小麦生育期耗水量的重要来源之一。相对干旱的年份,拔节至成熟期地下水对冬小麦生长发育的补给量约为 65mm,占同期耗水量的 22%。

2.2 不同处理对冬小麦干物质积累的影响

土壤水分条件对冬小麦的生长影响涉及株高、叶面积指数、生育期、器官鲜重、器官干重、干物质积累以及产量等多方面。图 1 给出不同处理的干物质积累曲线。不同水分条件对植株的物质积累影响存在明显差异。由图 1 可以看出 T₁ 和 T₄ 的干物质早期积累缓慢,T₄ 在孕穗期后有一段快速积累时期,但随生育期推进,又变得缓慢,灌浆期后开始下降;T₂、T₃、T₅ 得干物质积累量相差不大,以 T₂ 为大,T₅ 稍小,灌浆期后 T₃ 的斜率最大,表明 T₃ 的物质积累还在进行,可见充足的土壤水分条件使冬小麦的生育期延长。对生育期的观测记录表明 T₃ 的生育期为 226 天,较其他处理的全生育期长 3~ 5 天,表现为贪青晚熟。

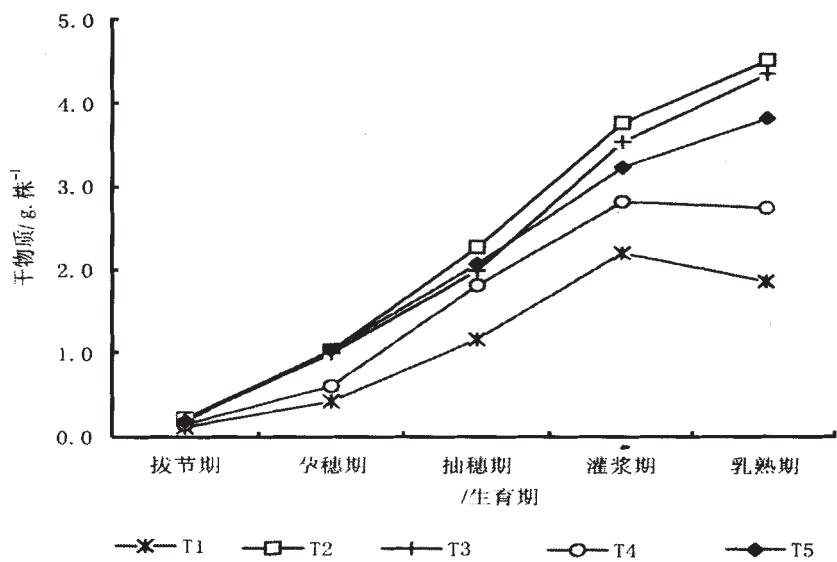


图 1 不同水分条件下干物质积累过程
Fig.1 Accumulation of above-ground dry-matter under different water conditions

2.3 不同处理对冬小麦物质分配的影响

由表 2 可知在不同土壤水分条件下,不同处理间地上各器官的分配率各不相同,但不同处理的叶片、叶鞘、茎秆和穗部的干物质分配趋势基本相同。T₁、T₃、T₄、T₅ 均为穗>茎>鞘>叶,只有 T₂ 分配比例稍有不同,为穗>茎>叶>鞘,处理间均为穗部和茎秆所占的比例较高,但 T₁ 和 T₃ 的茎秆比例较其他处理高,说明水分条件的不适引起物质分配更多地向支持生长的茎秆转移;水分条件适宜的处理茎秆比例相对较小,叶、鞘比例相对较大,合成器官生物量积累占优势,因此光合产物积累较其他处理多,最终的收获系数较其他处理高。

表 2 地上各器官干重及占总干重的比例

Tab. 2 Dry matter of above-ground apparatus and their ratios to above-ground dry matter

生育期	处理	叶片		叶鞘		茎秆		穗		总干重	收获系数
		干重/g	占总重/%	干重/g	占总重/%	干重/g	占总重/%	干重/g	占总重/%	/g	
乳熟期	T ₁	0.18	8.06	0.25	11.16	0.86	38.63	0.93	42.15	2.21	0.42
	T ₂	0.47	12.39	0.46	12.20	1.19	31.51	1.66	43.91	3.78	0.44
	T ₃	0.38	10.61	0.45	12.64	1.43	40.20	1.30	36.55	3.55	0.37
	T ₄	0.29	10.33	0.30	10.67	0.97	34.31	1.26	44.69	2.83	0.45
	T ₅	0.43	13.33	0.44	13.47	1.17	36.17	1.20	37.03	3.24	0.37
成熟期	T ₁	0.12	6.18	0.16	8.09	0.74	37.62	0.95	48.10	1.97	0.48
	T ₂	0.44	10.32	0.41	9.67	1.04	24.40	2.36	55.62	4.25	0.56
	T ₃	0.37	9.45	0.47	11.90	1.41	35.98	1.68	42.67	3.93	0.43
	T ₄	0.18	6.40	0.33	11.60	0.87	30.57	1.46	51.43	2.85	0.51
	T ₅	0.32	8.73	0.43	11.74	1.05	28.43	1.89	51.10	3.70	0.51

作物产量是来自于光合产物的积累以及其他器官向产量器官的物质转运。由表 3 可以看出叶片对籽粒干重的贡献量以 T₅ 最大,而叶鞘对籽粒干重的贡献量以 T₁ 最大,较其他处理显著偏高,且为 T₂ 的 2 倍;茎秆对籽粒干重贡献量最大为 T₂,而茎秆的物质积累是地上部分中生物量最大的器官,是最终产量形成的重要的“源”之一,它对籽粒的贡献量的大小将对最终产量的形成起到重要作用;T₃ 各器官对籽粒的贡献量为处理间最小,表明 T₃ 的水分条件不利于干物质向籽粒的转移。

表 3 不同水分条件下地上各器官对产量的贡献量 (单位:克/茎)

Tab.3 The contribution of leaves, sheaths, and stem to grains dry weight under different water conditions (g/stem)

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
叶	0.110	0.036	0.006	0.168	0.199
鞘	0.180	0.090	0.009	0.089	0.036
茎	0.231	0.308	0.030	0.200	0.240

不同土壤水分条件对作物产量的影响还表现在产量性状的差异上。水分条件对不同性

状的影响程度不同,其中以穗粒数为最大,达极显著水平 $F=6.194^{**}$, $v_1=4$, $v_2=95$, $F_{0.01}=3.523$; 之后依次为千粒重、结实率、有效分蘖数、穗长。不同时期的干旱处理对产量形状的影响也有所不同。全生育期的干旱处理,产量性状的各项指标均较低,尤以穗长和千粒重为最,而拔节期的干旱处理则对千粒重影响较大;灌浆期的干旱处理则对结实率和穗粒数影响较大; T_3 则表现为水分过多的劣势,穗粒数和结实率相对较低(表 4)。

表 4 不同处理产量性状的差异
Tab.4 Effect of water stress on yield components

	有效分蘖数/个	穗粒数/个	穗长/cm	千粒重/g	结实率/%	产量/kg·m ⁻²
T ₁	25.6	39.3	9.1	40	81	0.457
T ₂	26.9	38.5	9.5	45.5	87	0.584
T ₃	28.6	40.7	9.8	45.6	85	0.552
T ₄	28.2	48.6	9.5	39	89	0.542
T ₅	28.3	34.1	9.5	43.9	82	0.436

2.4 不同处理对水分利用效率的影响

2.4.1 产量水平的水分利用效率

随灌水量增加,作物耗水量也随之增加,但产量却并不表现为线性增长,同时水分利用效率也不随耗水量的增加而增加。处理间 T_3 灌溉量大,但产量和水分利用效率并不高,水分多损失于无效蒸发和渗漏失水,灌溉利用率低,水资源浪费严重; T_2 的灌溉量并不是最大,其耗水量也较 T_3 低,但产量和水分利用效率在处理间表现最好,表明 T_2 的水分条件有利于作物生长,器官间功能均衡,物质积累、分配合理; T_1 的耗水量虽少,水分利用效率也较高,但产量过低,生产上没有应用的可能; T_5 生育期长势良好,但因灌浆期干旱导致产量明显偏低,可见灌浆期是冬小麦生长发育过程中的又一水分敏感期,这一时期水分条件的限制将导致产量的严重下降,应在生产中予以足够的重视(表 5)。

表 5 水分胁迫对耗水量及水分利用效率
Tab.5 Effect of water stress on water consumption and water use efficiency

处理	灌溉量/mm	耗水量/mm	产量/kg·m ⁻²	水分利用效率/kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²
T ₁	0	348	0.457	13.1
T ₂	182	419	0.584	13.9
T ₃	299	543	0.552	10.2
T ₄	147	411	0.542	13.2
T ₅	194	408	0.436	10.7

2.4.2 产量与耗水量模拟分析

图 2 是根据实测的产量及耗水量建立的产量、水分利用效率与蒸散耗水量的曲线,其方程分别为:

$$Y = -0.1181ET^2+108.89ET-189.28$$

$$R^2=0.99^{**} \quad (1)$$

$$WUE = -0.0021ET^2 + 1.6928ET - 201.37 \quad R^2 = 0.99^{**} \quad (2)$$

对(1)式求导,得出理论最大产量为 6240 kg/hm²,获得最大产量时所需的蒸散耗水量为 473 mm。对(2)求导的结果为获得理论最高水分利用效率的蒸散耗水量,为 403 mm。

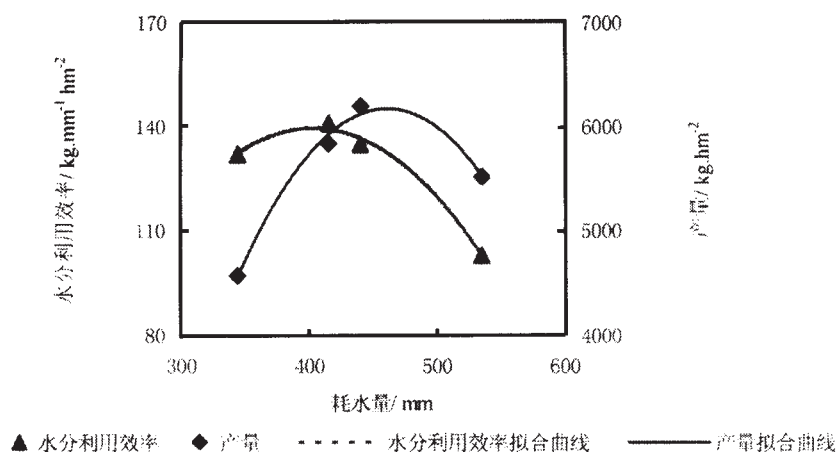


图2 蒸散耗水量与水分利用效率及产量的关系

Fig.2 The relation of yield, water use efficient and evapotranspiration

2.4.3 相对蒸散耗水不足额及其产量的影响

在有限供水条件下的实际蒸散耗水量 ET_a 应小于在充分供水条件下的最大蒸散耗水量 ET_m ,同样在有限供水条件下的实际产 Y_a 也应当小于在充分供水条件下的最大产量 Y_m 。用 $1-ET_a/ET_m$ 表示相对蒸散不足额,即水分亏缺,用 $1-Y_a/Y_m$ 表示相对产量减低值,即相对减产率,二者间存在一定的关系:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)$$

K_y 为产量对水分状况的反应系数。 K_y 值越大,表明水分条件对产量的影响越大, K_y 为负值时则表明水分过多,对产量也相应表现为负效应,其绝对值越大,负效应越强^[9]。

根据上述方法建立 T_1 至 T_5 各处理的水分反应系数,分别为 0.79、0.17、-0.95、0.55 和 1.49。由此可见 T_5 受水分条件的影响最大,表明冬小麦灌浆期对水分条件要求较高,为土壤水分状况的又一敏感期,这个时间水分供应不足对产量影响较大。因此,在生产中要注意确保这一时期的水分供给,以免造成减产。水分条件对 T_3 产量影响也较大,负的反应系数表明 T_3 的产量减少是因水分过多所致; T_1 的蒸散耗水量最小,水分差额最大,但其反应系数表现为中等,说明全生育期的水分亏缺造成减产相对较小,这是因为水分亏缺使得水分利用效率提高的原因; T_2 的水分反应系数最小,说明 T_2 的水分条件最接近于冬小麦生长发育的最适水平,作物生长良好,产量水平较高。

3 结论与讨论

以田间最大持水量 60%为灌溉下限,既水分适中的处理,植株地上器官比例依次为叶片占 10%、叶鞘占 10%、茎秆占 24%、穗部占 56%;而以田间最大持水量 80%为灌溉下限的处理和无灌溉的处理,即过量水分胁迫和水分亏缺的处理植株地上器官中茎秆所占比例较高,分别为 36%和 37%,穗部比例分别为 43%和 48%。茎秆对产量的贡献量以田间最大持水量 60%为灌溉下限的处理最大,为 0.308g/茎;而以田间最大持水量 80%为灌溉下限的处理,茎秆对产量的贡献量最小,仅为 0.030g/茎;水分亏缺时叶鞘的产量贡献量显著大于水分适中时的贡献量,分别为 0.18 和 0.09g/茎。

根据实测产量和蒸散耗水量模拟的产量、水分利用效率与蒸散耗水量关系得出:山东禹城地区在现有肥力水平和栽培技术下冬小麦获得理论最大产量时的蒸散耗水量为 473mm,理论最大产量为 6240kg/hm²;而获得最高水分利用效率的蒸散耗水量为 403mm。

拔节期干旱对冬小麦产量的影响较灌浆期的干旱对冬小麦产量的影响小,其产量对水分条件的反应系数分别为 0.55 和 1.49。

禹城地区在偏旱年型冬小麦全生育期较为适宜的灌水量为 182mm 左右,可灌三水,宜重点保证返青拔节和孕穗灌浆期间的水分需求。

本试验着重研究了地上各器官在不同土壤水分条件下的物质积累及分配情况,因条件限制对地下部分没有涉及,因此获得的结果就植株整体而言不是很完整。本领域的研究应该将地上器官细化的同时开展对根系的研究,以便获得作物整体水平上物质积累、分配、转运完整的动态过程。研究建立的产量和耗水量关系以及提出的禹城地区冬小麦的灌溉指标均是基于试验年份的降水情况下得出的,可对该地区中等偏旱的气候年型下合理地安排生产管理提供参考。

参考文献

- [1] 康绍忠. 新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1):11~ 17.
- [2] 李原圆, 李英能, 苏人琼等编. 中国农业水危机及其对策. 1997.
- [3] 朱丕荣等. 世界的水资源与灌溉农业. 世界农业, 1997, (1):3~ 5.
- [4] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报 1991, 2(1):70~ 76.
- [5] 汤章城. 作物对水分胁迫的反应和适应性 I. 抗逆性的一般概念和植物的抗涝性. 植物生理学通讯, 1983 (3):24~ 29.
- [6] 陈亚新, 康绍忠. 非充分灌溉原理. 北京:水利电力出版社, 1995.
- [7] 程维新, 赵家义, 胡朝炳, 张兴权著. 农田蒸发与作物耗水量研究. 北京:气象出版社, 1993.
- [8] 赵千钧, 罗毅, 欧阳竹等. 鲁西北平原冬小麦耗水过程与节水灌溉管理模式讨论. 地理科学进展, 2002, 21(6):600~ 607.
- [9] 袁小良, 王会肖, 张喜英. 冬小麦产量与耗水量关系. 作物与水分关系研究, 北京:中国科技出版社.
- [10] 王菱. 冬小麦产量与蒸散耗水模型的研究. 地理科学进展, 1997, 16 增刊:48~ 54.
- [11] 王天铎, 马立望, 贺东祥. 小麦对水利用效率的研究. 北京:气象出版社.
- [12] 李宝庆, 马瑞等编. 中国科学院禹城综合试验站年报(1988—1990), 北京:气象出版社.
- [13] 李凤民, 郭安红. 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.
- [14] Jeuffroy M H, Ney B., Crop physiology and productivity. Field Crops Research, 1997, 53:3~ 16.

- [15] Terry A. Howell, Judy A. Tolk, Arland D. Schneider, and Steven R. Evett., Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in Maturity. *Agronomy Journal*, 1998, 90:3~ 9.
- [16] Bhunia S. R., Sharma S. K., Singh V., Contribution of production parameters to yield, economics and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Research*, 1997, 14(2): 215~ 218.
- [17] Feng-Min Li, Xiao-Lan Liu, Shi-Qing Li., Effect of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 2001,49:163~ 171.
- [18] Wilhelm W. W., Dry-matter partitioning and leaf area of winter wheat grown in a long-term fallow tillage comparisons in US Central Great Plains. *Soil Tillage Research*, 1998, 49:49~ 56.

Effect of Water Stress on Dry-matter Partition and Yield Constitution of Winter Wheat

YU Li¹, YU Qiang¹, LUO Yi¹, LIU Minghua²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Department of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Dry-matter accumulation, partition and yield of winter wheat by different irrigation or water stress in different development stages was analyzed. The proportion of stem was low and the proportion of spike was high under the fitting water condition, there were 24% of stem and 56% of spike. But on the condition of water stress, the proportion of stem became higher and the proportion of spike was lower. On condition of water shortage, the proportions of stem and spike were 36% and 43% respectively, and on the redundant water condition, the proportions were 37% and 48%. The contribution from stem to yield was 0.308 g/stem under the fitting water condition; on the condition of water shortage the contribution from sheaths to yield was highest in treatments, was 0.18 g/stem. The relationship between yield and evapotranspiration indicated that the highest theoretical yield was 6240 kg/hm² in Yucheng under present fertilizer and management level. The evapotranspiration at highest yield was 473 mm; and the evapotranspiration was 403 mm when water use efficiency was highest. Groundwater was an important water resource in this area. Amount of water supplied by groundwater to wheat from jointing to maturity stages was 22% of total water consumption of winter wheat.

Key words: water deficiency; winter wheat; dry-matter partition; yield; water use efficiency