

不同施肥水平对旱地冬小麦 水分利用效率的影响*

赵立新 荆家海 王韶唐

(西北农业大学植物生理生化教研组, 陕西杨陵 712100)

摘 要

1987—1988年,研究了旱地施肥对冬小麦(*Triticum aestivum* cv. Shanhe No.6)水分利用效率的影响,初步探讨了“以肥调水”的生理机制。施肥不仅提高了旱地土壤含水量,更重要的是提高了土壤水势和土壤水的有效性,从而增加了有效水分利用。施肥增大旱地冬小麦绿叶面积,延缓叶片衰老,从而降低土壤蒸发,增加蒸腾用水潜势和光合潜势,但净同化率不一定提高。施肥增加旱地冬小麦总的水分利用(ET,即蒸散量)和蒸腾(T)用水,增加地上部生物产量,提高了经济产量和水分利用效率。施肥使冬小麦同时具有耗水和节水以抵御干旱的能力,对植株具有调节作用,使之更好地适应干旱环境。

关键词 土壤水势; 以肥调水; 水分利用效率; 冬小麦

当前旱地农业生产中,降水潜势还未充分发挥,其主要原因是土壤瘠薄和缺肥,尤其是缺氮和缺磷。据研究,旱作农业区大部土壤有机质含量在1%以下,有些地区甚至在0.5%以下。N含量 $<0.10\%$, P_2O_5 $<0.07\%$ 。因此,近年来提出了“以肥调水”的重要看法。认为施肥可增加对土壤水分的利用,显著提高水分利用效率和作物产量。有人报道,旱地施肥条件下,每毫米降水可生产1 kg小麦^[5]。然而,有的学者指出,干旱条件下施肥对作物生长是否有利,还是一个有争议的问题^[2]。因此,有必要对干旱条件下“以肥调水”的生理机制进行深入的探讨。自Philip^[13]提出土壤-植物-大气连续体系(soil-plant-atmosphere continuum,简称SPAC)理论之后,许多研究者从SPAC系统来探讨水分利用和作物生产的关系。这不仅在植物水分及抗旱生理研究中具有较大的理论价值,而且在指导农业生产中也具有实际意义。本试验研究了不同施肥水平对旱地冬小麦水分利用效率的影响,探讨“以肥调水”的生理机制。同时,以旱地冬小麦为例,初步探讨了水分在SPAC中的运动规律,为旱地冬小麦施肥的栽培技术措施提供理论依据。

材 料 和 方 法

试验品种为冬小麦陕合6号(*Triticum aestivum* cv. shanhe No.6)。试验地设在陕西省渭北旱塬的澄城县罗家洼乡,年平均降水量为450—511 mm,但分配不均,7—9

三月降水量占全年的55—60%，属半湿润偏(易)旱气候。土壤以瘠土和黄土性土为主，有机质含量1%左右，缺氮和磷。

试验设三个处理：对照(CK)，不施肥，这与当地部分农田不施肥条件相同。据取样分析，试验地表层25 cm土壤含全氮0.0617%，全磷(P₂O₅)0.155%，全钾1.76%，速效氮(碱解)3.94 mg/100g，速效磷7.13 ppm，速效钾136 ppm，缓效钾1024 ppm，有机质0.904%。中肥(MF)，每亩施4.6 kg氮，2.5 kg的P₂O₅，3000 kg农家肥，这与当地部分农田施肥水平相当。高肥(HF)，每亩施9.2 kg氮，5.0 kg的P₂O₅，6000 kg农家肥，此施肥水平高于当地农田施肥水平。试验用农家肥含有有机质3.296%，全N 0.162%，全P(P₂O₅)0.176%，速效N(碱解)323 ppm，速效P 44.0 ppm。每个处理重复8次，小区面积24 m² (4×6m)，随机排列。无灌溉条件，全凭自然降水。1987年9月14日播种，行距20 cm。田间管理同大田。

冬小麦生育期内温度、降水和Pan蒸发见图1。为研究施肥对旱地土壤水分的有效

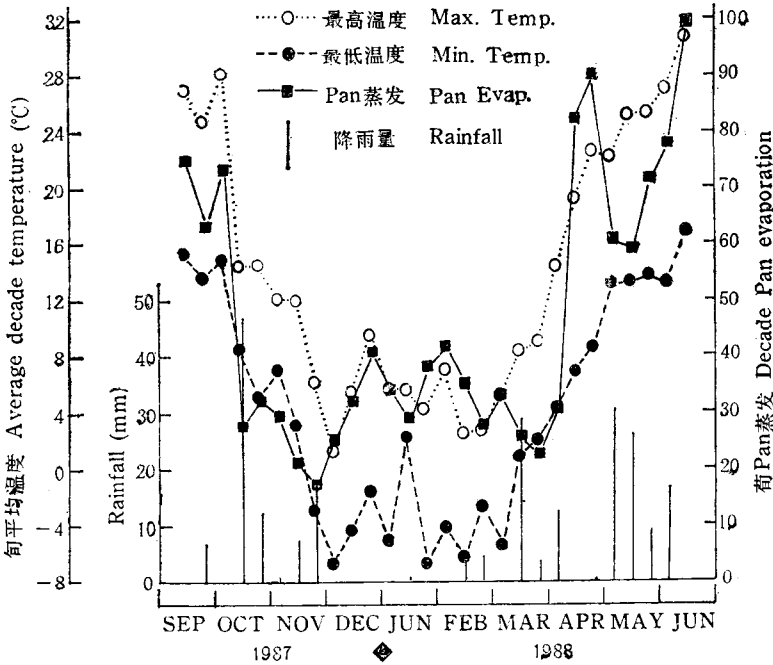


图1 冬小麦生育期内气温、降水和Pan蒸发

Fig.1 Air temperature, rainfall and Pan evaporation at field experiment station during winter wheat growing season

性和对旱地冬小麦植株体内的水分平衡等的影响，测定土壤水势、叶片水势、大气水势、气孔阻力和蒸腾强度等。土壤水势用热电偶湿度计法^[4]测定；叶片水势用压力定法^[11]测定；大气水势按下式^[11]计算：

$$-\psi_{w.v} = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{\text{Per cent } r \cdot h.}{100}$$

式中， $\psi_{w.v}$ 为大气水势， R 为气体常数， T 为绝对温度， V_w 为水的偏摩尔体积， $r \cdot h.$ 为大气相对湿度，蒸腾强度和气孔阻力用LI-Cor-1600型稳态气孔计测定。

试验结果

一、不同施肥水平对旱地土壤水势和土壤含水量的影响

1. 不同施肥水平对旱地不同土层土壤水分特征曲线的影响: 收获以后, 将 0—140 cm 深土壤分为七层 (每层 20 cm) 取样, 测其土壤含水量和土壤水势。结果 (图 2) 表明, 无论哪种施肥处理, 0—140 cm 深各层土壤的水分特征曲线均为双曲线型, 符合 $\psi_s = a\theta^{-b}$ (其中, ψ_s 为土壤水势, θ 为土壤含水量, a, b 为常数, 因不同土壤而异)。说明土壤水分特征曲线主要因土壤结构和质地而变化。土壤水分特征曲线表明, 该土壤含水量 10% 以下, 土壤含水量变化很小, 而 ψ_s 变化很大; 土壤含水量 10% 以上, 随土壤含水量增加, ψ_s 变化很小。施肥对同一土壤水分特征曲线的影响较小。比较不同处理的土壤水分特征曲线可以看出, 当土壤含水量较低时, 随着施肥量的增加, 土壤水势有增加的趋势; 不过当土壤含水量高时, 不同施肥处理之间的土壤水势差异不大。可见, 旱地施肥可起到提高低含水量的土壤水势作用, 表现了“以肥调水”之效应。

2. 施肥对冬小麦不同生育期间土壤水势和土壤含水量的影响: 播种后 2 天各层土壤含水量实际上为播前底墒, 各表层 20 cm 约为 12% 左右 (图 3)。随着植株生长, 特别是返青拔节以后, 叶面积迅速扩大, 加上大气蒸发加强, 蒸腾失水加大, 根系吸水增加。因此, 从播种开始, 在整个生育期中, 土壤水势和土壤含水量呈降低趋势。这主要与冬小麦根系吸水有关。降水对这种变化趋势有暂时的影响。降水以后, 土壤水势和土壤含水量得到恢复和提高 (如播种后 194 天的土壤水势和土壤含水量高于播种后 129 天), 但由于旱区降水通常较少, 这种影响尤以上层土壤较大。由图 3 还可见, 愈近表层土壤水势和土壤含水量变化幅度愈大。这是因为表层土壤直接与大气接触, 既直接接受天然降水, 又受大气蒸发的影响较大, 而且冬小麦根系主要集中在表层土壤, 从中吸收水分也多。

比较不同施肥处理可见, 除收获和播种后 258 天的下层土壤水势和土壤含水量外, 在冬小麦的整个生育期内, 中肥和高肥处理的土壤水势多高于对照。施肥对土壤含水量的影响与土壤水势变化趋势一致, 但不及对土壤水势的影响大。高肥处理对土壤水势和土壤含水量影响的效果比中肥处理显著, 对照不及施肥处理。如播种后 223 天表层 20 cm 土壤中, 对照的土壤水势和土壤含水量低至 -15.6 巴和 7.83%, 而高肥处理为 -12.1 巴和 8.73%, 中肥处理介于二者之间。

然而, 在冬小麦接近成熟和收获时, 中肥和高肥处理的土壤水势和土壤含水量均低于对照。这是由于施肥提高了前期土壤水势, 使原来一部分对植物生长“无效”的水变得“有效”, 使植物吸收利用更多的水分造成的, 这种现象表明了“以肥调水”的结果。此外, 尽管表层土壤水势和土壤含水量较下层土壤变化剧烈, 但下层土壤水势和土壤含水量变化趋势与表层土壤一致。这可能是由于施肥促进根系生长, 加强根系吸水能力所致。但根系生长及其吸水能力与土壤水势的关系尚需进一步探讨。

二、施肥对旱地冬小麦植株水势、气孔阻力和蒸腾强度的影响

表 1 表明施肥对旱地冬小麦植株水势、气孔阻力和蒸腾强度影响的总趋势为: 当土壤水势和大气水势均较低时, 施肥增大气孔阻力, 减弱蒸腾强度, 降低植株水势; 当土壤水势和大气水势均较高时, 施肥则减小气孔阻力, 增大蒸腾强度, 提高植株水势。但处理间

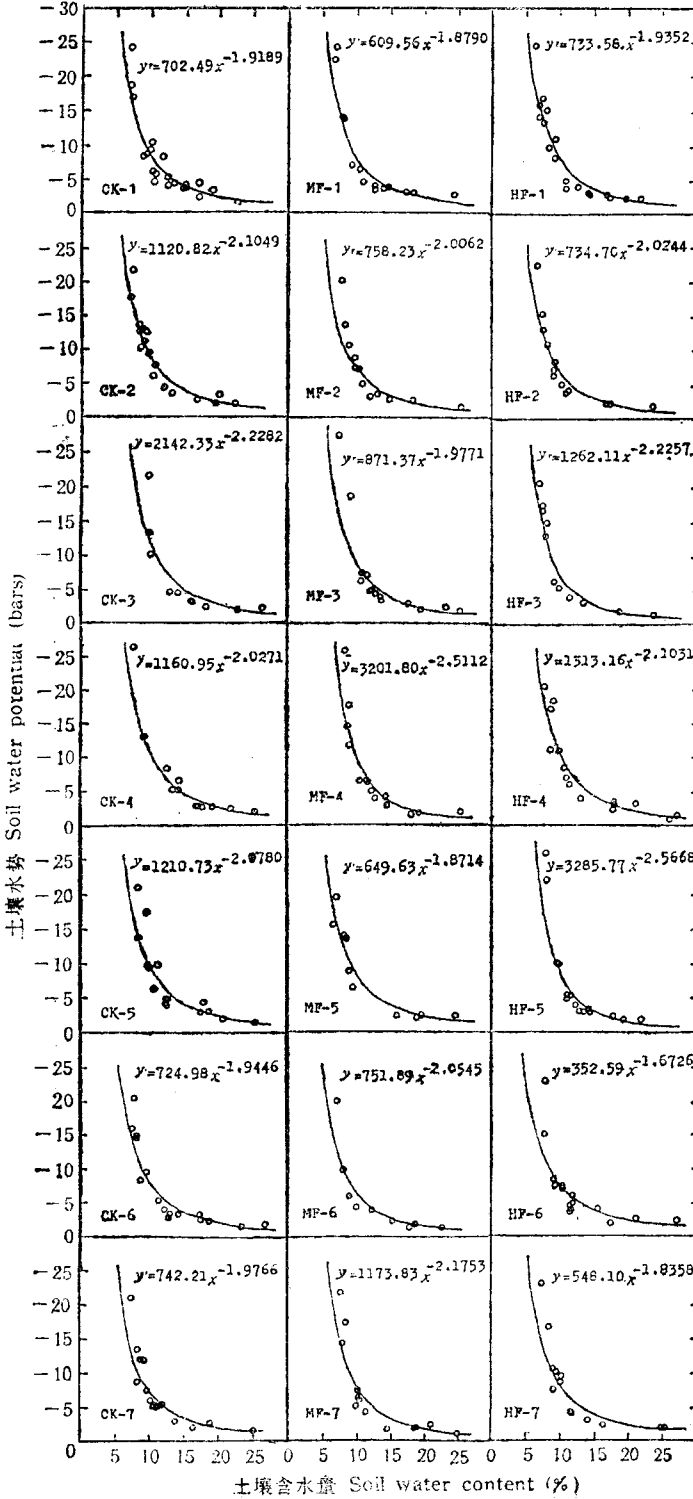


图2 不同施肥水平对不同土层土壤水分特征曲线的影晌
 Fig.2 Effects of different fertilization levels on soil water property curves of different soil layers
 CK: 对照 No fertilization MF: 中肥 Mediate fertilization HF: 高肥 High fertilization 1: 0—20 cm 土层 Soil layer
 2: 20—40 cm 3: 40—60 cm 4: 60—80 cm 5: 80—100 cm 6: 100—120 cm 7: 120—140 cm

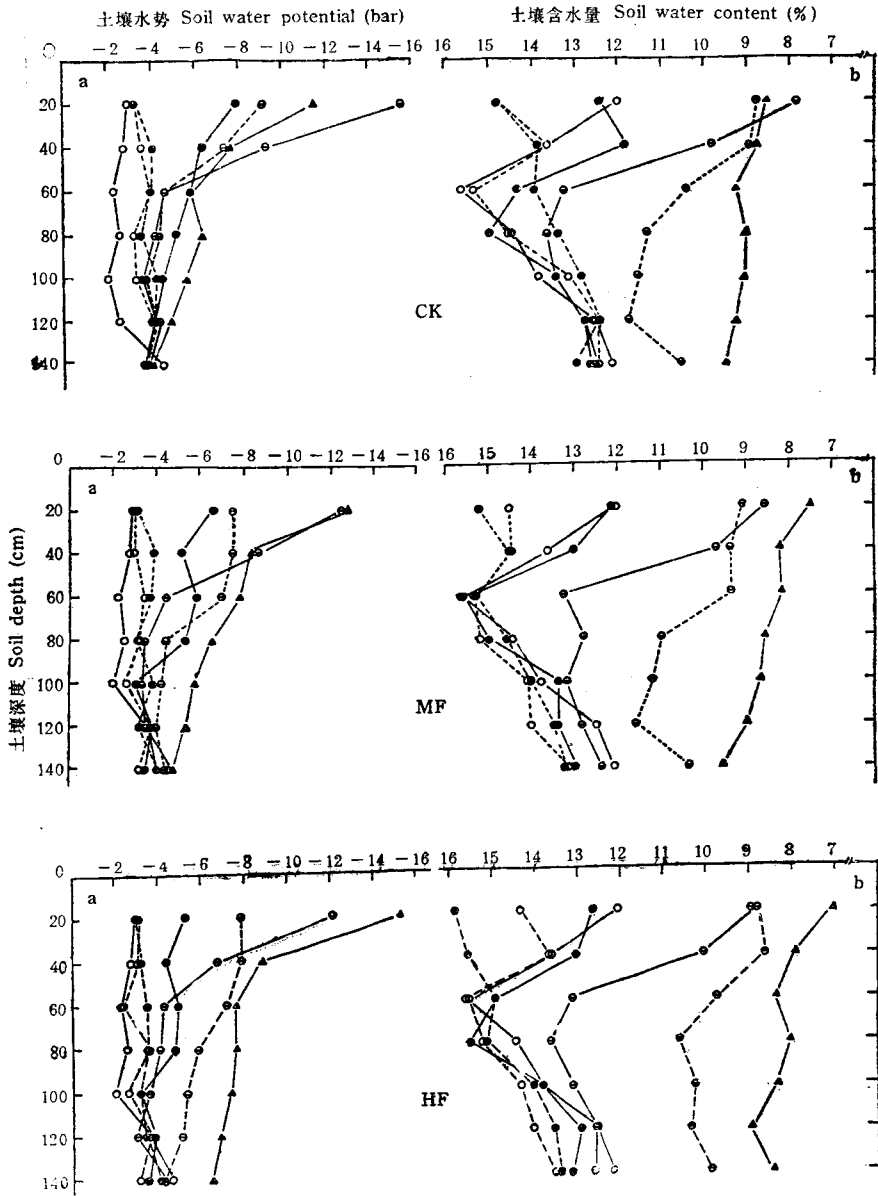


图3 不同施肥水平对土壤水分吸收的影响

Fig.3 Effects of different fertilization levels on seasonal changes in soil water extraction
DAS, 播种后天数 Days after sowing a: 土壤水势 Soil water potential b: 土壤含水量 Soil water content —○—: 2 DAS ---○---: 65 DAS —●—: 129DAS ---●---: 194 DAS —○—: 223 DAS; ---○---: 258 DAS; —▲—: 276 DAS

差异不太显著。盆栽试验进一步证明了这种影响,且差异显著或极显著¹⁾。

叶片水势受大气水势的影响较大。如播种后 65 天和 129 天,尽管土壤水势也较高,但施肥处理的叶片水势仍低于对照(表 1)。而播种后 193 天(表 2),当大气水势较高时

1) 赵立新等, 1991; 西北农业大学学报, (正在印刷)。

表 1 冬小麦生育期内不同施肥处理土壤-植物-大气连续体系中水分运转的变化(13:00—15:00时测定)

Table 1 Changes in water transports of different fertilization treatments in SPAC¹⁾ at the growth period of winter wheat

测定日期 Date of measurement (DAS ²⁾)		65	129	193	223	257
大气温度 Air temperature (°C)		11.5	7.2	8.3	19.5	27.5
大气水势 Water potential of water vapor in the atmosphere (bars)		-1338.97	-1784.26	-1288.41	-2998.91	-1120.84
光子流量密度 Photon flux density ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		856.1	1306	304.7	1781	1679
CK	土壤水势 Soil water potential (bars)	-3.67	-5.53	-3.88	-6.58	-5.39
	叶水势 Leaf water potential (bars)	-17.15	-22.53	-11.60	-18.84	-30.17
	气孔阻力 Stomatal resistance ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	6.112	155.3	9.056	20.40	2.420
	蒸腾强度 Transpiration rate ($\mu\text{gH}_2\text{Ocm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.366	0.080	1.058	1.068	7.191
MF	土壤水势 Soil water potential (bars)	-3.23	-4.79	-3.62	-5.75	-5.61
	叶水势 Leaf water potential (bars)	-17.67	-23.56	-10.08	-18.84	-29.50
	气孔阻力 Stomatal resistance ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	5.228	150.7	7.778	20.78	2.416
	蒸腾强度 Transpiration rate ($\mu\text{gH}_2\text{Ocm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.558	0.076	1.248	1.036	6.997
HF	土壤水势 Soil water potential (bars)	-3.09	-4.28	-3.40	-5.47	-6.22
	叶水势 Leaf water potential (bars)	-17.67	-24.07	-12.22	-21.67	-30.57
	气孔阻力 Stomatal resistance ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	5.212	141.7	7.842	22.40	2.384
	蒸腾强度 Transpiration rate ($\mu\text{gH}_2\text{Ocm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.630	0.083	1.314	0.904	6.952
备注 Remarks		晴间多云 ³⁾	晴 fine	阴 Cloudy	晴 Fine	晴间多云 ³⁾

1) SPAC: Soil-Plant-Atmosphere Continuum; 2) 播种后天数 Days After Sowing; 3) Fine with occasional clouds.

(09:00 测定结果), 中肥和高肥处理的叶片水势高于对照, 且均达极显著水平; 而当大气水势较低时 (13:00 测定结果), 高肥处理的叶片水势则显著低于对照。可见, 当土壤水势较高, 而大气水势较低时, 施肥降低叶片水势。因此, 在研究水分胁迫下施肥对叶片水分状况的影响时, 有必要将土壤水势和大气水势的影响分开。这方面的研究尚需进一步探讨。

表 2 不同施肥处理对冬小麦叶水势的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on leaf water potential of winter wheat

测定日数 Date of measurement (DAS)	测定时间 Time of measurement (h)	大气温度 Air temperature (°C)	大气水势 Water potential in the atmosphere (bars)	光子流密度 Photon flux density ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	CK		MF		HF		备注 Remarks
					土壤水势 Soil water potential (bars)	叶水势 Leaf water potential (bars)	土壤水势 Soil water potential (bars)	叶水势 Leaf water potential (bars)	土壤水势 Soil water potential (bars)	叶水势 Leaf water potential (bars)	
193	09:00	4.5	-727.59	107.2	-3.88	-6.90	-3.62	-3.35	-3.40	-5.57	阴 Cloudy
	13:00	8.3	-1288.41	304.7		-11.60		-11.08		-12.22	

三、不同施肥水平对旱地冬小麦叶面积指数、净同化率及干物质生产的影响

施肥可显著增大旱地冬小麦的叶面积指数, 延缓叶片衰老 (图 4)。不同施肥水平最大叶面积指数: 高肥为 3.5, 中肥为 2.8, 对照为 1.8。尽管旱地施肥增大了叶面积指数, 但远不及一般认为的高产应达到的叶面积指数 4—5 左右^[3]。

净同化率变化呈双峰曲线 (图 5)。第一个高峰出现在冬前幼苗期, 第二个高峰出现在乳熟期。在冬小麦的整个生育期内, 净同化率的变化幅度较大, 但平均净同化率变化不大 (对照、中肥、高肥处理的平均净同化率分别为 2.61, 2.90 和 2.59 $\text{g dw} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。可见, 旱地施肥并不一定提高冬小麦的净同化率。这与施肥后叶面积指数增大, 叶片互相遮荫有关。因此, 施肥提高旱地冬小麦的生物产量 (图 6) 主要是通过增大叶面积。

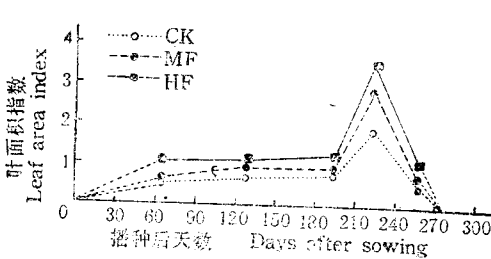


图 4 不同施肥水平对田间冬小麦叶面积指数的影响
Fig.4 Effects of different fertilization levels on seasonal changes in leaf area indices of winter wheat grown in the field

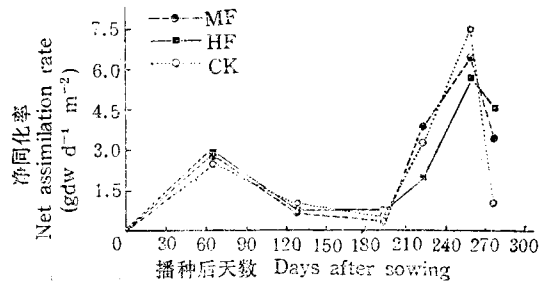


图 5 不同施肥水平对田间冬小麦净同化率 (以地上部生物量计) 变化的影响
Fig.5 Effects of different fertilization levels on seasonal changes in net assimilation rates (based on growth analysis of above ground biomass) of winter wheat grown in the field

四、不同施肥水平对旱地冬小麦干物质生产和水分利用之间关系的影响

1. 不同施肥水平对旱地冬小麦 ET 和 T 的影响: 图 7 表明, 在冬小麦生育前期, 中肥和高肥处理的 ET (蒸散量, 即总耗水量) 均低于对照。这是因为在冬小麦生育前期,

对照区的叶面积相对较小,土壤表面蒸发相对较多,而施肥区叶面积较大,减少土壤蒸发所致。在冬小麦生育后期,中肥和高肥处理的 ET 大于对照。这是由于此时蒸发较小,叶

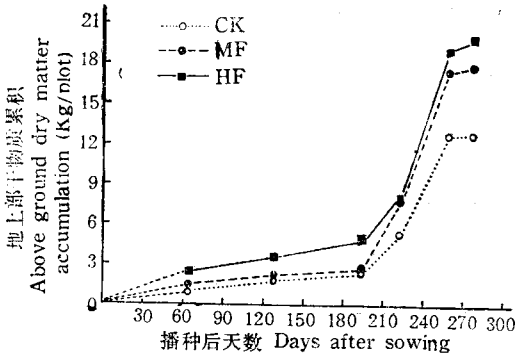


图 6 不同施肥水平对田间冬小麦地上部干物质累积的影响

Fig.6 Effects of different fertilization levels on above ground dry matter accumulation of winter wheat grown in the field

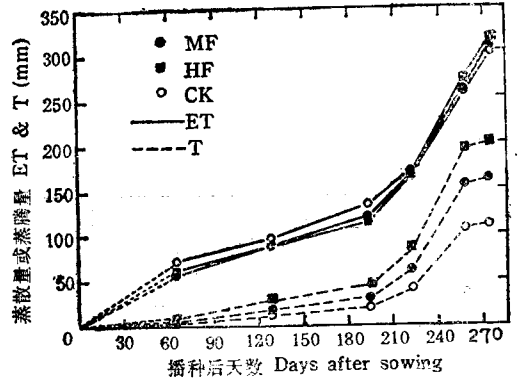


图 7 不同施肥水平对田间冬小麦累积蒸散量(从土壤含水量和降水量求得)和蒸腾量(从蒸腾速率求得)的影响

Fig.7 Effects of different fertilization levels on ET (derived from soil water contents and rainfalls) and T (derived from transpiration rates) accumulations of winter wheat grown in the field

片蒸腾占主导作用,而中肥和高肥处理的叶面积较大,蒸腾失水较多。可见,旱地施肥可显著增加作物的蒸腾耗水,使更多的水分用于作物生产。这主要与施肥增大总叶面积,延缓叶片衰老有关。

2.不同施肥水平对旱地冬小麦水分利用效率(WUE)的影响: 在冬小麦的整个生育期内,ET效率和T效率(图8)都是变化的,且表现出与净同化率变化基本一致的双峰曲线。以平均ET效率计算,中肥和高肥处理分别比对照提高24.65%和39.28%(表3);以经济产量计,则分别提高27.05%和48.36%。可见,旱地施肥可大幅度提高冬小麦的ET效率。

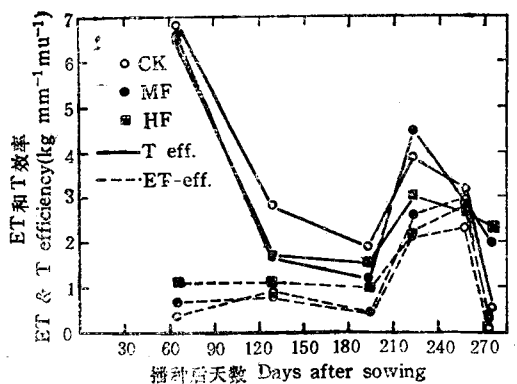


图 8 不同施肥水平对田间冬小麦ET和T效率变化的影响

Fig.8 Effects of different fertilization levels on seasonal changes in ET and T efficiency of winter wheat grown in the field

干物质生产和水分利用(ET或T)之间存在着强烈的线性关系(图9)。这与前人的研究是一致的。旱地施肥增大ET效率,而T效率有所减小(表3,图9)。这是因为旱地施肥以后,叶面积增大,地面蒸发减少,作物蒸腾用水增加,干物质

这是因为旱地施肥以后,叶面积增大,地面蒸发减少,作物蒸腾用水增加,干物质

生产增加。尽管ET也增加,但其幅度远不及干物质生产(表3),因此,ET效率提高。但由于叶面积增大以后,净同化率不一定提高,因此,T效率减小。

表3 不同施肥水平对旱地冬小麦水分利用效率的影响

Table 3 Effects of different fertilization levels on water use efficiency of winter wheat under dryland conditions

处 理 Treatment		CK	MF	HF
地上部生物量 Above ground biomass (kg/mu)		261.58±25.92A	325.53±22.83B	381.14±25.31C
籽粒产量 Seed yield (kg/mu)		73.72±10.22A ^a	96.11±12.81 ^b _B	114.75±6.75 ^c _B
ET (mm)		301.83	310.00	317.08
平均ET效率(以地上部生物量计) Mean ET efficiency(derived from above ground biomass)	平均ET效率 Mean ET efficiency (kg/mm·mu)	1.026	1.279	1.429
	增加百分率 Percent of increase(%)	—	24.65	39.28
ET效率(以籽粒产量计) ET efficiency(derived from seed yield)	ET效率 ET efficiency (kg/mm·mu)	0.244	0.310	0.362
	增加百分率 Percent of increase (%)	—	27.05	48.36
T (估算值 Estimation value) (mm)		109.91	160.46	201.51
平均T效率(以地上部生物量计) Mean T efficiency(derived from above ground biomass) (kg/mm·mu)		3.183	3.147	2.948
收获指数 Harvest index (%)		28.18	29.52	30.11

注 试验结果用SSR法进行统计。a、b、c代表 $P < 0.05$, A、B、C代表 $P < 0.01$ Treatment effects were assessed by SSR statistical analysis. a, b, c represented $P < 0.05$ and A, B, C, $P < 0.01$,

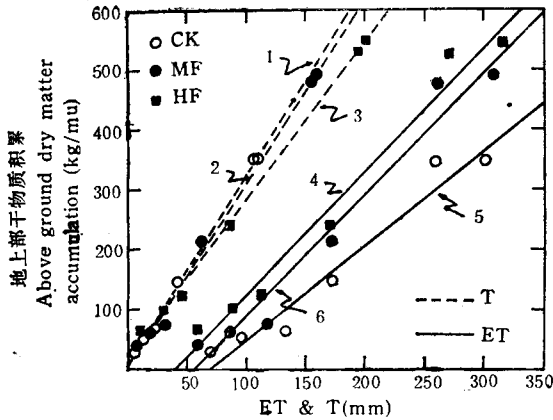


图9 不同施肥水平对田间冬小麦干物质生产和蒸散量及蒸腾关系的影响

Fig.9 Effects of different fertilization levels on the relations of dry matter production to ET and T of winter wheat grown in the field

1. $y=9.775+3.162x$ $r=0.9991^{**}$ 2. $y=7.257+3.053x$ $r=0.9971^{**}$ 3. $y=22.085+2.610x$ $r=0.9986^{**}$ 4. $y=-85.167+2.078x$ $r=0.9889^{**}$ 5. $y=-110.510+1.595x$ $r=0.9789^{**}$ 6. $y=-119.588+2.060x$ $r=0.9808^{**}$

讨 论

一、“以肥调水”的生理机制

植物对水分的利用受大气蒸发潜势、土壤中可利用水量和植物某些特性(如绿叶面积及其维持时间等)的影响^[14]。许多研究表明,旱地条件下,不论施用有机肥或化肥,均可使植物吸收利用更多的土壤水分^[5,8,15]。然而 Power^[14]认为,施肥增加水分利用的量通常较小(<25%)。因此,仅从这一方面来说明“以肥调水”的作用是不够的。

过去许多资料均用土壤含水量说明土壤水分有效性。由于土壤结构和质地条件的差异,相同的土壤含水量土壤水势相差较大。本世纪六十年代以来,多用土壤水分能量状况——水势大小来说明土壤水分有效性。从施肥是否影响旱地土壤水势的角度来说明“以肥调水”作用更为合理。然而,在天然降水有限的情况下,施肥对土壤水分有效性的影响的报道极少。本试验结果表明,施肥具有提高旱地土壤水势的作用,这种作用不仅在表层土壤,而且影响至深层土壤(140 cm)。施肥对深层土壤水势的影响可能是通过促进植物根系生长完成的。到冬小麦收获时,施肥处理的土壤水势低于对照(图3)。可见,土壤水分的有效性可以促进营养有效性的发挥和利用^[14],营养也可以促进旱地有限水分的有效利用。二者在一定程度上是相辅相成,互相受益的。从这种意义上来理解“以肥调水”的生理机制,有利于对该问题的进一步探讨,但尚需进一步研究。

水分胁迫下,施肥对冬小麦水势的影响报道不一^[5,8]。本试验结果(表1,2)表明,水分胁迫较严重时,施肥降低冬小麦叶片水势,而当土壤水势和大气水势较高时,施肥则提高叶片水势。表明施肥对植株在不同情况下的调节作用,从而使植物得以更好地适应干旱环境。然而,施肥对植株水势的影响是否存在一个土壤水势阈值问题,大气水势对施肥的效应有何影响,有待进一步研究。

旱地条件下,扩大根系延伸范围,提高根系吸水能力等,对开拓水源,更充分有效地利用土壤中有限的水分是有益的^[16]。这可减小间断性干旱期间限制植物生长的可能性。大量资料表明,土壤肥力状况可改变植物的生根习性,营养丰富的土壤上的植物根系比瘠薄地扎得深^[9,10]。这对增加土壤中有限水分的利用潜势是有好处的。虽然没有测定冬小麦根系的生长状况,但从土壤含水量变化发现,在冬小麦生育期结束时,施肥处理较对照从土壤中多吸走了水分,而高肥处理大于中肥处理(表3)。中肥和高肥处理的土壤含水量明显低于对照,且这种效应可深达140 cm(图3)。这间接说明旱地施肥具有促进冬小麦根系生长和吸水的作用。

气孔是植物失水的主要通道。本试验(表1)表明,在水分胁迫较为严重的情况下,施肥增大气孔阻力,减小蒸腾强度;而当土壤水势和大气水势相对高时,施肥则减小气孔阻力,增大蒸腾强度。水分胁迫下,施肥对蒸腾作用的影响与对植株水势的影响趋势一致。表明施肥对水分胁迫下植株体内水分平衡有调节作用,使得植物同时具有耗水和节水以抵御干旱的能力,这对更充分有效地利用水分是有益的。

叶片是光合和蒸腾的重要器官。旱地施肥使叶面积迅速扩大,延迟叶片衰老(图4),增加蒸腾用水潜势;另一方面,较大的叶面积迅速覆盖地面,减少地面蒸发失水,增大了光合面积,从而增加水分的有效利用,但净同化率不一定提高。因此,旱地施肥增产的主要作用在于提高叶面积和叶面积指数,增加光合势。

总之,旱地施肥同时具有提高土壤水势,从而提高土壤水分的有效性;扩大根系范围,增强根系吸水能力;调节植物体内水分平衡,使之更好地适应干旱环境等作用,这对开拓水源和有效利用水分是有利的,从而起到“以肥调水”的作用。此外,旱地施肥增大绿叶面积,延缓叶片衰老,增加光合势,干物质生产和籽粒产量增加(表3),因此,水分利用效率提高。

二、施肥对 SPAC 中水分运动的影响

SPAC中的水分运动可用 $Tr = -\Delta\psi/R$ (Tr 为蒸腾强度, $\Delta\psi$ 为水势梯度, R 为阻力) 来描述。本试验结果(表1)表明,当土壤水势和大气水势较高时,施肥提高叶片水势和蒸腾强度;当土壤和大气水势较低时,施肥则降低叶片水势和蒸腾强度。在前一情况下,虽然施肥提高土壤水势的幅度小于提高叶片水势,使土壤水势和叶片水势之差减小,但叶片和大气间的势差增大,加之水分吸收和运输的阻力减小,同时,气孔阻力也减小,因此, Tr 必然增大。在干旱条件下,虽然施肥提高土壤水势、降低叶片水势,使土壤和叶片间的水势差增大,但叶片和大气间的势差减小,而且从土壤经过整株植物的阻力和气孔阻力增大,因此, Tr 减小。随着干旱程度的加大,土壤阻力和植物阻力也随之增大,但植物阻力的增加远比土壤阻力的增加大得多^[7]。旱地施肥以后,从土壤经整株植物的水分运动阻力增大,而土壤中水分运动阻力决定于土壤质地、结构和孔隙状况等。施用有机肥具有改良土壤、减小土壤阻力的作用。即使施肥对此影响极小,也可推知,旱地施肥增加从土壤经株的水分运动阻力的作用主要在植物本身。Taylor^[16]认为,如果植物必须在有限水分供应的条件下生长和达到成熟,低的轴向阻力是不利的。Passioura^[12]指出,高的轴向阻力将合理分配有限的水分供应,而且在某些情况下,使得谷类作物生产比低的轴向阻力高的产量。我们的研究结果证明了这一假说。旱地施肥后,植株水势和蒸腾强

度均有不同程度的下降(表 1), 说明提高水分运动的轴向阻力对有效地利用水分是有利的。

本试验还表明, 蒸腾作用变化与大气水势、植株叶片水势密切相关(图 10)。但最大蒸腾强度并不在最高叶片水势和最高大气水势时发生, 而是在较高的叶片水势和中度大

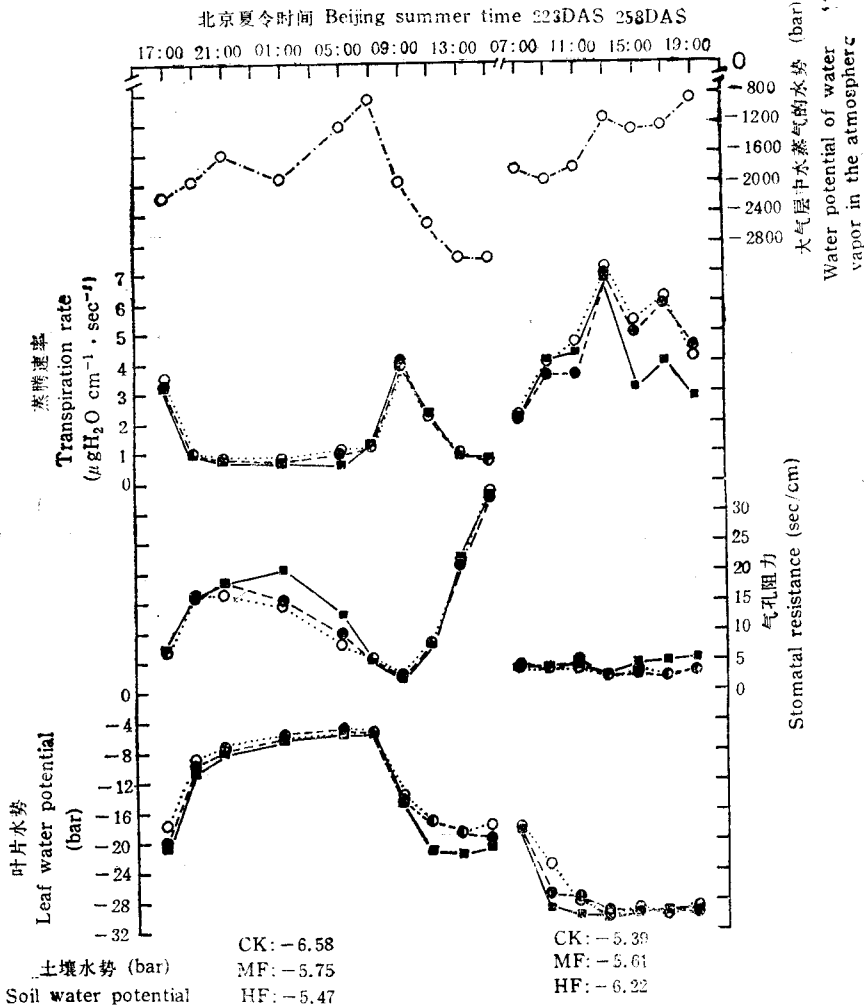


图 10 不同施肥水平对田间冬小麦 SPAC 中水分运转日变化的影响

Fig.10 Effects of different fertilization levels on the daily cycles of water transport in the SPAC of winter wheat grown in the field

...○...: CK --●--: MF —■—: HF CK, MF, HF: 参见图 2 See Fig.2

气水势下发生。在旱地条件下, SPAC 中水分运动的这种特征对节约和有效用水也是有利的。当叶片水势高时, 大气水势也较高, 大气蒸发力较小。因此, 蒸腾并不强烈, 具有保水节水作用; 当大气水势很低, 大气蒸发力很强时, 叶片水势则十分低下, 因此, 蒸腾也不强烈, 同样具有保水节水作用。

由上述分析可见, 水分运动是土壤-植物-大气三者之间综合作用的结果, 而且土壤-

植物-大气之间又彼此互相影响、互相制约,由此构成了结构和功能上完整统一的连续体系。因此,从土壤-植物-大气体系角度来讨论水分运动及其利用更为完整和合理。

参 考 文 献

- [1] 西北农业大学植物生理生化组, 1987: 植物生理学实验指导。陕西科技出版社, 4—8。
- [2] 许旭旦, 1985: 旱作农业中的合理施肥及其生理学基础。干旱地区农业研究, 2: 56—71。
- [3] 荆家海, 1963: 气象因素和农业技术措施对冬小麦争光合率的影响。作物学报, 2(3) 303—319。
- [4] 荆家海、肖庆德, 1986: 用热电偶湿度计测定水势。植物生理学通讯, 1: 51—53。
- [5] 程素云、乔存芬、韩广民、郭晓冬, 1987: 施肥在提高旱作小麦水分生产效率中的作用。干旱地区农业研究, 2: 58—66。
- [6] 薛青武、陈培元, 1989: 灌浆期土壤干旱条件下氮素营养对小麦旗叶光合作用的影响。干旱地区农业研究, 3: 86—93。
- [7] Blizzard, W. E. & Boyer, J. S. 1980: Comparative resistance of the soil and the plant to water transport. *Plant Physiol.* 66: 809—814.
- [8] Brown, P. J. 1972: Water use and soil water depletion by dry land wheat as affected by nitrogen fertilization. *Agron. J.* 63: 43—46.
- [9] Brown, S. C., Keatinge, J. D. H., Gregory, P. J. & Cooper, P. J. M. 1987: Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in northern Syria. 1. Root and shoot growth. *Field Crops Res.* 16: 53—66.
- [10] Campbell, C. A., Cameron, D. R., Nicholiachuk, W. & Davidson, H. R. 1977: Effects of fertilizer N and soil moisture on growth, N content, and moisture use by spring wheat. *Can. J. Soil Sci.* 57: 289—310.
- [11] Milburn, J. A. 1979: *Water Flow in Plants*. Longman Inc. New York, 193—194.
- [12] Passiora, J. B. 1982: Water in the soil-plant-atmosphere continuum. In Lane, O. L. et al. (eds) *Encyclopedia of Plant Physiology. New Series. Vol. 12B. Physiological Plant Ecology. II. Water Relations and Carbon Assimilation*. Springer-Verlag-Berlin Heideberg, 5—33.
- [13] Philip, J. R. 1966: Plant water relations: some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17: 245—268.
- [14] Power, J. F. 1983: Soil management for efficient water use: Soil fertility. In Taylor, H. M. et al. (eds) *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA USA, 87—113.
- [15] Ramig, R. E. & Rhoades, H. F. 1963: Interrelationship of soil moisture level at planting time and nitrogen fertilization on winter wheat production. *Agron. J.* 55: 123—127.
- [16] Taylor, H. M. 1983: Managing rooting systems for efficient water use: An overview. In Taylor, H. M. et al. (eds) *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA USA, 87—113.

EFFECTS OF DIFFERENT FERTILIZATION LEVELS ON WATER USE EFFICIENCY OF WINTER WHEAT UNDER DRYLAND CONDITIONS

Zhao Li-xin Jing Jia-hai Wang Shao-tang
(Group Plant Physiol. & Biochem., Northwestern Agri. Uni.)

Abstract

Experiments were carried out to study the effects of different fertilization levels on water use efficiency (WUE) of winter wheat (*Triticum aestivum* cv. Shaanhe No.6) grown in the field under dryland conditions at Luojiawa, Chengcheng, Shaanxi in 1987—1988 to explore the physiological mechanism of "regulating water using fertilizer". The results showed that: (1) Fertilization on dryland raised not only soil water content, but also soil water potential, thus increased water use. (2) Fertilization on dryland increased leaf area of winter wheat, delayed leaf senescence, thus reduced soil evaporation, increased the potential of water-use by transpiration and the potential of photosynthesis. However, the net assimilation rate was apparently not significantly affected. (3) Fertilization increased total water use (ET) and water-use by transpiration (T) of winter wheat under dryland conditions, increased above ground biomass yield and grain yield, so that WUE of winter wheat was improved. (4) Fertilization has the effect of regulation to winter wheat under dryland conditions, making the plants more efficient in water economy, and hence more adaptable to drought environment.

Key words Winter wheat, Regulating water using fertilizer, Water use efficiency, Soil water potential