

# 黄土塬区旱作农田长期定位施肥对冬小麦水分利用的影响

王兵<sup>1,2</sup>, 刘文兆<sup>1\*</sup>, 党廷辉<sup>1</sup>, 高长青<sup>3</sup>, 陈杰<sup>1</sup>, 甘卓亭<sup>1,2,4</sup>

(1 中国科学院 水利部水土保持研究所 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院研究生院, 北京 100089; 3 长武县农业技术推广中心, 陕西长武 713600; 4 宝鸡文理学院 陕西宝鸡 710000)

**摘要:**对长期定位施肥试验第 22 年度的测定数据进行了分析,探讨了旱地施肥对冬小麦水分利用的影响。试验结果表明,测定年份冬小麦的耗水深度受播种前雨季降雨入渗深度的影响位于地下 200 cm 左右。长期单施磷肥处理,播种期土壤有效贮水量与不施肥的对照接近,而单施氮肥、氮磷配施和氮磷钾配施均显著低于对照;在施  $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup> 配施氮肥或施 N 90 kg/hm<sup>2</sup> 配施磷肥,随着施氮量或施磷量从 0 增加到 180 kg/hm<sup>2</sup>,播种期土壤有效贮水量均逐渐降低,但前者作物的土壤水分消耗表现出降低趋势,而后者表现出增加趋势。与对照相比,各施肥处理均提高了土壤有效底墒的利用率。氮磷配施比单施磷肥降低了土壤供水占作物耗水的比例,使得作物生长和产量的形成对当季降水的依赖性增加。与对照相比,氮磷配施及氮磷钾配施显著提高了冬小麦收获指数、产量和水分利用效率,而单施磷肥和氮肥使收获指数、产量和水分利用效率显著降低。施  $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup> 的条件下,不同施氮量之间收获指数差异较小,而产量和水分利用效率均高于单施磷肥;施 N 90 kg/hm<sup>2</sup> 的条件下,不同施磷量作物的收获指数、产量和水分利用效率均得到提高。

**关键词:**黄土高原;长期定位施肥;土壤水分;水分利用;冬小麦

中图分类号:S512.1<sup>+</sup>1;S147.21

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)05-0829-06

## Effect of long-term fertilization on winter wheat water utilization in rain-fed farmland of the Loess Tableland

WANG Bing<sup>1,2</sup>, LIU Wen-zhao<sup>1\*</sup>, DANG Ting-hui<sup>1</sup>, GAO Chang-qing<sup>3</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, GAN Zhuo-ting<sup>1,2,4</sup>

(1 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR and Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China; 3 Changwu Agricultural Technology Extension Centre, Changwu, Shaanxi 713600, China; 4 Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** The water utilization of winter wheat in dryland farming was studied according to the data measured at the long-term fertilization experiment, which has been established for 22 years on the Loess Plateau. The results indicated that soil water consumption depth was affected by the infiltration depth during raining season before seeding, and it was as deep as 200 cm in the soil profile in the study year. As for ASWS (available soil water storage) at seeding stage after long-term fertilization, single phosphorus application treatment was similar to the controlled treatment, while single nitrogen application or mixed nitrogen-phosphorous application or mixed nitrogen-phosphorous-potassium application was less than the control treatment. For the mixed nitrogen with 90 kg/ha phosphorus or mixed phosphorus with 90 kg/ha nitrogen treatment, ASWS at seeding stage took a descendant trend as the nitrogen rates or the phosphorus rates increased from 0 to 180 kg/ha, while for this experiment year, soil water consumption by crop was decreased by the former treatments contrary to the latter. For phosphorus application of 90 kg/ha, both available soil water content and soil water consumption

收稿日期:2007-11-23 接受日期:2008-03-24

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-424-1);国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD09B09)资助。

作者简介:王兵(1979—),女,河北邢台人,博士研究生,主要研究农田生态系统水碳氮耦合及生态环境效应。

Tel: 029-87011683, E-mail: wang-bing1996@163.com. \* 通讯作者 E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

of winter wheat in the study year were significantly decreased by increasing nitrogen application. For nitrogen application of 90 kg/ha, available soil water content was decreased with increased phosphorus application, while soil water consumption of winter wheat was increased. Compared with the control treatment, single phosphorus application, mixed nitrogen-phosphorous application, and mixed nitrogen-phosphorous-potassium application increased utilization rate of available soil water content. Mixed nitrogen-phosphorus application increased utilization rate of available soil water content in comparison with the single applications of the two fertilizers, but compared with single phosphorus application, mixed nitrogen-phosphorus application decreased the proportion of soil water consumption to crop water consumption and increased the dependency of crop yield on precipitation during the growing season. Harvest index, grain yield, and water use efficiency for mixed nitrogen-phosphorus application and mixed nitrogen-phosphorus-potassium application were all increased in comparison with single nitrogen application or single phosphorus application treatments. When phosphorus was applied at 90 kg/ha, the difference in harvest index for various nitrogen application rates was not significant, while grain yield and water use efficiency were higher than those in the case of single phosphorus application. When nitrogen was applied at 90 kg/ha, harvest index, grain yield, and water use efficiency at different phosphorus application rates were all increased in comparison with single nitrogen application.

**Key words:** Loess Plateau; long-term fertilization; soil water; water use; winter wheat

我国北方地区水资源亏缺是限制农业生产力提高的主要因素,水分不足带来了一系列的环境问题。因此,作物水分关系的研究一直是农业生态系统研究的重要问题<sup>[1]</sup>。

水肥之间存在着耦合效应,尤其在旱地农业研究中。如何在水分限制的条件下,通过合理施肥提高作物产量和水分利用效率一直是国内外研究的热点。土壤水分是旱地农田作物生长重要的水分来源。Lahiri 认为,在土壤干旱状况下施用氮肥可以促进作物对深层土壤水分的利用从而提高产量;而 Begg 等和 Bhan 等认为在土壤水分有限条件下增施氮肥会使作物水分胁迫加重,对产量造成不利影响<sup>[2]</sup>。长期定位试验研究中关于土壤肥力、产量效应方面的报道较多<sup>[3-6]</sup>,本研究以黄土塬区旱作农田的长期定位试验为基础,研究了长期施肥后的农田土壤水分状况及对当季冬小麦水分利用的影响,以期旱地农业有效地利用有限的水资源提供科学依据。

## 1 材料与方法

试验地位于黄土高原南部的长武塬区中国科学院长武农业生态试验站十里铺轮作与肥料长期定位试验场(107°44.703'E, 35°12.787'N)。塬面地势平坦,属暖温带半湿润大陆性季风气候,农业生产主要依赖生育期的天然降水和前期土壤蓄水,属于典型的旱作农业区;海拔 1220 m,多年平均降水 578.5 mm,且季节性分布不均,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。土壤属黄盖粘黑垆土,母质为中壤质马兰黄

土,土层深厚,土质疏松,肥力中等,田间持水量为 22.4%,凋萎湿度 9%。

长期定位试验始于 1984 年秋,试验时耕层土壤有机质含量 10.5 g/kg,全氮 0.8 g/kg,速效磷 4.58 mg/kg,速效钾 129.3 mg/kg,地下水埋深 60 m。本研究选取了长期肥料试验中的 11 个处理,即:CK、P90、N45P90、N90P90、N135P90、N180P90、N90、N90P45、N90P135、N90P180 及 N90P90K90;其中 CK 表示不施肥的对照,N90、P90、K90 分别表示是施用 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 90 kg/hm<sup>2</sup>。每个处理 3 个重复,小区面积为 22 m<sup>2</sup>。试验作物为冬小麦,小麦品种 1984、1985 年用秦麦 4 号,1986~1995 年用长武 131 号,1996 年以后用长武 134 号,播种期为 9 月 12 日至 9 月 29 日,小麦收获期为 6 月下旬,试验管理措施同大田。试验年份的 2005 年冬小麦收获后 7 月初到 2006 年冬小麦收获期的 6 月下旬的降水量仅为 477.9 mm,比同期的多年平均值低 100.6 mm。

试验测定年份为 2005~2006 年,生物量和产量为每个小区中间 8 行计产折算而来。

土壤含水量测定采用中子仪法,测定深度为 600 cm;0—100 cm 每 10 cm 为 1 层,100 cm 以下每 20 cm 为 1 层。2005 年 9 月冬小麦播种期 0—300 cm 土层的土壤储水量按下式计算:

$$W = h \times a \times \theta \times 10$$

式中,W—土壤储水量(mm);h—土层深度(cm);a—土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);θ—土壤重量含水量(%)。

土壤水分消耗 = 播种期土壤贮水量 - 收获期土壤贮水量;

土壤有效贮水量 = 播种期土壤贮水量 - 萎蔫湿度土壤储水量 ;

作物耗水量 = 土壤水分消耗 + 生育期降水 ;

水分利用效率 = 产量 / 耗水量。

数据采用 SAS 软件进行回归分析和单因素方差分析 (LSD 进行多重比较)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同施肥条件下土壤有效贮水量

根据 2005 年 9 月冬小麦播种期的土壤水分测定结果来说明长期施肥不同施肥处理土壤有效贮水量的情况。结果 (图 1) 显示,不同施肥条件对作物生长有不同的影响,因此对播种期土壤有效贮水量的影响也有差别。与不施肥的对照处理相比,单施磷肥没有显著影响播种期土壤有效贮水量;而氮肥单施或与磷钾肥配施均降低了播种期土壤有效贮水量;与氮磷配施相比,氮磷钾配施对播种期土壤有效贮水量基本没有影响。从图 1 还可以看出,与氮磷肥单施相比,氮磷配施显著降低了播种期的土壤

有效底墒。

对施  $P_2O_5$  90  $kg/hm^2$  条件下的氮肥用量和施 N 90  $kg/hm^2$  的条件下的磷肥用量分别与播种期的土壤有效底墒进行回归分析,得到二次多项式方程,分别为:

$$Z_x = 381.5886 + 0.0066x^2 - 1.9326x, R_x^2 = 0.9834, sigF = 0.0166;$$

$$Z_y = 305.1314 + 0.0041y^2 - 1.3006y, R_y^2 = 0.9637, sigF = 0.0363;$$

式中  $x, y$  分别表示氮肥和磷肥的用量,  $Z$  表示播种期土壤有效贮水量。

由以上方程可知,在施肥量为 0~135  $kg/hm^2$  之间,播种期土壤有效底墒均随氮磷用量增加而降低,变化趋势分别是,施氮量在 0~90  $kg/hm^2$  之间播种期土壤有效贮水量降低较快,而在 90~135  $kg/hm^2$  之间处理间差异很小;在施 N 90  $kg/hm^2$  的情况下,施磷量从 0 增加到 45  $kg/hm^2$ ,播种期土壤有效贮水量降低较快,而当施磷量继续增加土壤有效贮水量的变化不大。

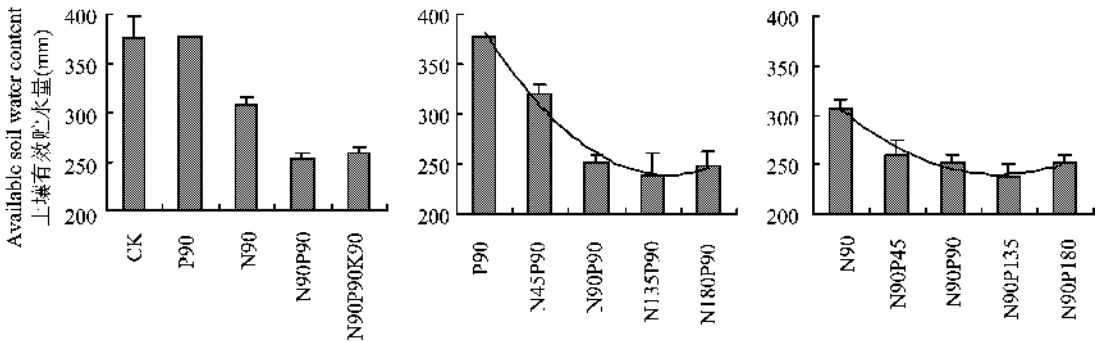


图 1 不同施肥条件下土壤有效贮水量

Fig. 1 Available soil water content under different fertilization

### 2.2 不同施肥条件下的冬小麦耗水特征

作物对土壤水分的利用受到土壤底墒和作物生长状况的共同影响。施肥在促进作物生长和提高产量的同时,导致土壤供水能力的下降,下层土壤的干燥化程度增加,也降低了降水的入渗深度。已有研究表明,冬小麦的耗水深度可达到 3 m<sup>[7-9]</sup>。在降雨量不足的情况下土壤水分入渗深度变浅,由于 2004~2005 年度冬小麦收获后雨季土壤水分的入渗深度在 200 cm 左右,使得 2005~2006 年度冬小麦耗水深度变浅,CK、P90、N45P90、N90、N90P90 和 N90P90K90 处理的分别为 200、220、200、160、160 和 160 cm (图

2)。因此,长期种植小麦后不同施肥条件下土壤水分和作物耗水达到了一种相对平衡状态。受雨季土壤水分恢复程度的影响,作物的耗水深度变浅,当季的冬小麦耗水深度均在 200 cm 左右。单施磷肥作物耗水深度比对照深 20 cm,而单施氮肥则比对照浅 40 cm。与单施磷肥相比,在施用磷肥的基础上施用氮肥,作物的耗水深度变浅,且施 N 90  $kg/hm^2$  处理耗水深度较施 N 45  $kg/hm^2$  处理浅。与单施氮肥比,在施氮的基础上施  $P_2O_5$  90  $kg/hm^2$ ,没有影响冬小麦的耗水深度;相同氮磷用量条件下,施用钾肥对作物耗水深度没有影响。

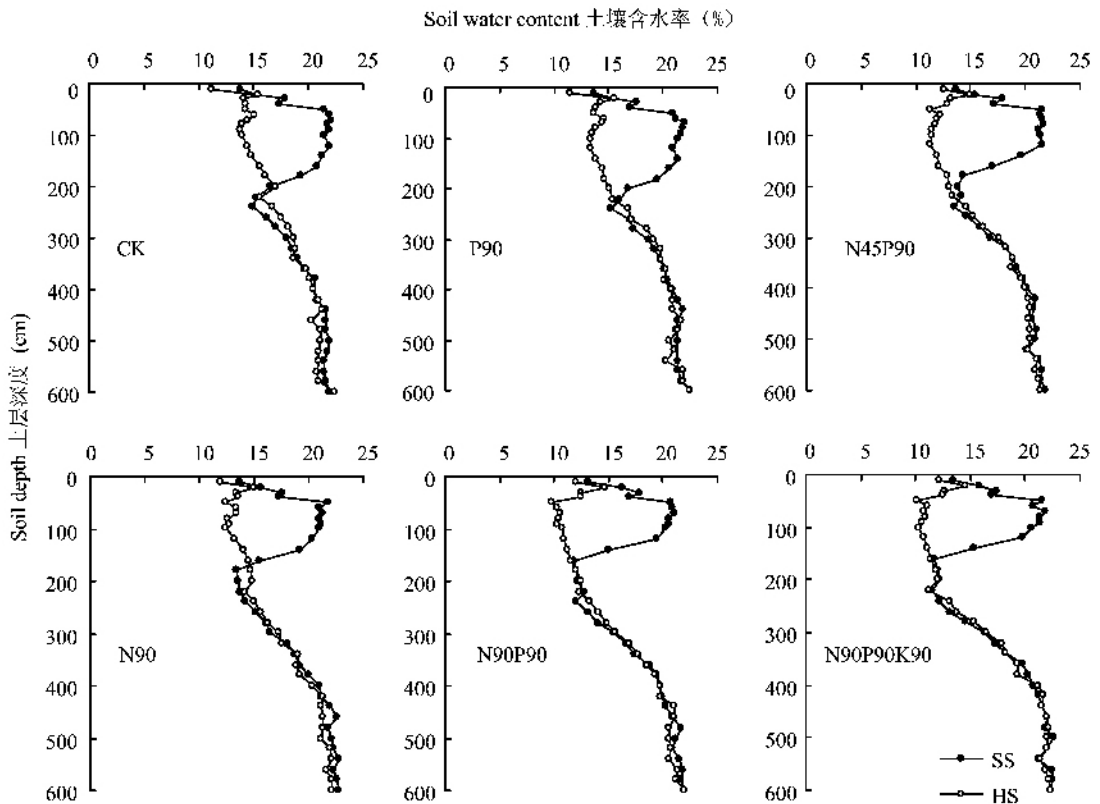


图2 不同施肥条件下的冬小麦耗水深度

Fig.2 Water consumption depth under different fertilization

与不施肥的对照相比,只有单施磷肥显著提高了当季作物对土壤贮水的消耗,单施氮肥处理土壤贮水消耗显著低于单施磷肥的处理。从图1的播种期土壤有效贮水量情况看,应当是较低的土壤底墒限制了作物对土壤水分的利用;氮磷配施基础上施用钾肥(N90P90K90)对作物当季土壤贮水的消耗没有显著影响。不同施氮量处理中,结合图1从长期试验的结果看,在施 $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>的条件下施N 45~180 kg/hm<sup>2</sup>,作物消耗土壤水分均高于单施磷肥的处理。而从长期施肥后的本试验年份看(表1),在施N 45 kg/hm<sup>2</sup>时,当季作物消耗的土壤水分与单施磷肥处理差异不显著;当在施氮量增加到N 90 kg/hm<sup>2</sup>后,土壤贮水的消耗量显著低于单施磷肥的处理。结合图1的土壤有效底墒的供应情况分析,可能是由于施 $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>的基础上施N 45~180 kg/hm<sup>2</sup>使得播种期土壤有效贮水量降低,从而降低了土壤有效底墒的供应,限制了作物对土壤贮水的利用。在施N 90 kg/hm<sup>2</sup>的基础上施 $P_2O_5$  0~90 kg/hm<sup>2</sup>,随着施磷量的增加尽管土壤有效底墒供应降低,作物对土壤贮水的利用仍然逐渐增加(表1)。这主要是由于在这个土壤水分范围内,随着施

磷量的增加仍然可以促进作物生长从而使其需水量增加引起的。当在施 $P_2O_5$  90~180 kg/hm<sup>2</sup>范围内逐渐增加时,各处理的土壤水分消耗之间没有显著差异,可能是由于较低的土壤有效贮水量限制了土壤对作物的供水能力。总的来说,所有处理土壤供水占作物总耗水量的百分比在30.4到40.0个百分点范围内,相应的生育期降雨所占的百分比为60.0到69.6个百分点范围内,处理之间差异较小。

从表1还可看出,与对照相比,单施磷肥、氮磷肥配施和氮磷钾配施均显著提高了土壤有效底墒利用率,分别提高了5.5、17.6和19.2个百分点;单施氮肥对土壤有效底墒利用率没有显著影响。与单施磷肥相比,在施 $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>的基础上施氮,显著提高了土壤有效底墒的利用率,当施N 45 kg/hm<sup>2</sup>后再提高施氮量各处理间差异不显著。结合图1来看,与单施 $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>相比,施氮虽然降低了播种期的土壤有效底墒但却提高了土壤底墒利用效率。与单施氮肥相比,在施N 90 kg/hm<sup>2</sup>的条件下,不同施磷量均显著提高了土壤底墒利用率,当施 $P_2O_5$  90 kg/hm<sup>2</sup>后再提高施磷量,各处理之间的有效底墒利用率没有显著差异。与施N 90 kg/hm<sup>2</sup>相比,

表 1 不同施肥条件下土壤水分消耗及有效底墒利用情况

Table 1 Soil water consumption and utilization of available soil water under different fertilization

施肥方式 Fertilization modes	土壤贮水 消耗	有效底墒 利用率	施氮处理 N rate	土壤贮水 消耗	有效底墒 利用率	施磷处理 P rate	土壤贮水 消耗	有效底墒 利用率
	SWC (mm)	WUR (%)		SWC (mm)	WUR (%)		SWC (mm)	WUR (%)
CK	114.7 bc	30.5 c	P90	135.8 ab	36.0 b	N90	98.4 c	32.0 c
P90	135.8 a	36.0 b	P90N45	150.4 a	47.0 a	N90P45	108.1 bc	41.6 b
N90	98.4 c	32.0 bc	P90N90	121.1 b	48.1 a	N90P90	121.1 bc	48.1 a
N90P90	121.1 ab	48.1 a	P90N135	117.9 b	49.1 a	N90P135	123.9 ab	52.1 a
N90P90K90	128.5 ab	49.7 a	P90N180	117.3 b	47.2 a	N90P180	129.7 a	51.5 a

注 (Note): SWC—Soil water consumption; WUR—Available soil water use rate. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平,下同 Values followed by different letters mean significant among the treatments at 5% level. The same below.

长期施磷降低了播种期的土壤底墒,但却提高了土壤底墒的利用率。

### 2.3 不同施肥条件下的产量效应和水分利用效率

在本试验年份,与对照相比,单施氮肥、磷肥和氮磷配施均显著降低了冬小麦的收获指数(表 2)。导致收获指数降低主要是氮磷配施对子粒产量增加的作用小于对生物产量的提高作用;单施磷肥和单施氮肥主要是由于产量较对照低;而单施氮肥收获

指数低于单施磷肥处理是因生物产量较高而子粒产量较低所致。氮磷钾配施与对照之间没有显著差异,其中施 N 90 kg/hm<sup>2</sup> 收获指数最低;在施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup> 的基础上施 N 45、90、135、180 kg/hm<sup>2</sup> 均比不施氮的处理显著提高了小麦的收获指数;在施 N 90 kg/hm<sup>2</sup> 的基础上配施磷均显著提高了收获指数,施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45~180 kg/hm<sup>2</sup> 各处理差异不显著。

表 2 不同施肥条件下的收获指数、产量与水分利用效率

Table 2 Harvest index, yield and water use efficiency under different fertilization

施肥方式 Fertilization modes	产量			施氮处理 N rates	产量			施磷处理 P rates	产量		
	HI	Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	WUE		HI	Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	WUE		HI	Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	WUE
CK	0.48 a	1705 c	5.0 c	P90	0.34 c	1485 d	4.1 c	N90	0.19 d	1485 e	4.6 d
P90	0.34 c	1485 d	4.1 e	P90N45	0.39 a	3561 b	9.5 b	N90P45	0.37 b	3136 d	9.4 c
N90	0.19 d	1485 d	4.6 d	P90N90	0.37 b	3409 c	9.9 b	N90P90	0.36 c	3409 c	9.9 c
N90P90	0.37 b	3409 b	9.9 b	P90N135	0.39 a	3439 c	9.7 b	N90P135	0.40 a	4000 a	11.5 a
N90P90K90	0.47 a	4402 a	12.5 a	P90N180	0.38 a	3659 a	10.4 a	N90P180	0.38 b	3879 b	11.0 b

注 (Note): HI—收获指数 Harvest index; WUE—水分利用效率 Water use efficiency, 单位 (Unit): [kg/(hm<sup>2</sup>·mm)].

单施 90 kg/hm<sup>2</sup> 磷肥或氮肥,小麦产量均显著低于不施肥处理,而氮磷配施和氮磷钾配施均显著高于对照;单施磷肥或氮肥产量无显著差异,在氮磷配施的基础上施钾产量比氮磷配施明显提高。在施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup> 基础上配施 N 45、90、135 和 180 kg/hm<sup>2</sup>,各处理产量均有显著提高。配施 N 45 kg/hm<sup>2</sup>,显著提高了小麦的产量;而当施氮量大于 N 45 kg/hm<sup>2</sup> 后,随着施氮量的增加各处理间的产量差异减小。与单施氮肥相比,在施 N 90 kg/hm<sup>2</sup> 的基础上施磷,产量均显著提高,施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45 kg/hm<sup>2</sup> 时,产

量提高幅度最大,当施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 180 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量较施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg/hm<sup>2</sup> 时略有降低(表 2)。

提高单位耗水量的生产效率也是旱作农业追求的目标之一<sup>[10]</sup>。长期施肥后,不同施肥方式处理中,单施磷肥由于作物产量降低而当季作物对土壤水分的消耗增加,使得水分利用效率低于对照处理;单施氮肥虽然土壤水分消耗比对照降低,而产量降低,使得水分利用效率也低于对照。氮磷配施及氮磷钾配施提高了作物产量,而由于受到土壤水分的限制,作物消耗土壤水分较少,因此水分利用效率均

显著高于对照;在氮磷配施的基础上施钾由于提高了产量而使水分利用效率比不施钾处理显著提高。不同施氮量的处理中,在施  $P_2O_5$   $90\text{ kg/hm}^2$  的基础上配施氮,各处理的水分利用效率均显著高于单施磷肥的处理。其中配施  $N$   $45\text{ kg/hm}^2$ ,由于显著提高了作物产量而土壤水分消耗降低,因此水分利用效率显著提高;大于  $N$   $45\text{ kg/hm}^2$  处理,随着施氮量增加产量和作物耗水量的增加幅度均较小,因此水分利用效率相互间差异也较小。不同施磷量处理中,在施  $N$   $90\text{ kg/hm}^2$  的基础上施磷,随施磷量的增加水分利用效率也随之增加。

### 3 结论

与对照相比,氮磷配施及氮磷钾配施在土壤底墒较低的情况下仍然能显著提高冬小麦的产量,这与多年长期试验的结果是一致的<sup>[11]</sup>,同时也能提高收获指数和水分利用效率;而单施磷肥和氮肥均显著降低了收获指数、产量和水分利用效率。

从长期施肥处理间的差异看,冬小麦耗水深度超过  $300\text{ cm}$ ,而本试验年份由于降水量较低,冬小麦的耗水深度受到降水入渗深度较浅的影响仅在  $200\text{ cm}$  左右,深层的土壤水分很难被利用。长期定位试验的结果表明,15年连续种植冬小麦,0—400 cm 土壤剩余贮水量与平均产量之间存在极显著的负相关关系<sup>[12]</sup>,即平均产量与土壤水分消耗之间呈正相关关系。从本试验结果看,长期施肥后在氮磷肥配施与氮磷单施相比仍能大幅提高作物产量,而土壤水分消耗则与其没有显著的差异或者差异较小,说明产量和土壤水分消耗之间没有这种显著的相关关系。这主要是由于长期氮磷配施提高产量的同时降低了土壤的供水能力,限制了作物对土壤水分的利用,从而提高了作物产量对当季降水的依赖性,使得高产田由于土壤供水能力受到限制,而发生产量随降雨量的波动性<sup>[4]</sup>,达不到高产、稳产的目标。同时由于较高的施肥量使得土壤中硝态氮累积,不仅降低了肥料的利用效率,对环境造成潜在的威胁<sup>[6]</sup>,也不利于旱作条件下农业的健康可持续发展。

### 参考文献:

[1] 谢贤群. 我国 13 北方地区农业生态系统水分运行及区域分异规律研究的内涵和研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 440-446.  
Xie X Q. Connotation and some advances of the research on the water

movement and its regional change regular in agro-ecosystem of north China[J]. Adv. Earth Sci., 2003, 18(3): 440-446.

[2] 马强, 宇万太, 沈善敏, 等. 旱地农田水肥效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 675-683.  
Ma Q, Yu W T, Shen S M et al. Research advances in water fertilizer effect on dry land farmland[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 18(3): 675-683.

[3] 徐振剑, 华玲, 蔡典雄, 等. 农田水肥关系研究现状[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 83-88.  
Xu Z J, Hua L, Cai D X et al. Research of relationship between water and fertilizers on dry land[J]. J. Capital Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 28(1): 83-88.

[4] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.  
Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland[J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 38(3): 353-356.

[5] 郝明德, 来璐, 王改玲, 等. 黄土高原塬区旱地长期施肥对小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1893-1896.  
Hao M D, Lai L, Wang G L et al. Effects of long-term fertilization on wheat yield on Loess Plateau[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(11): 1893-1896.

[6] 郭胜利, 吴金水. 长期施肥对  $NO_3^- - N$  深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 75-78.  
Guo S L, Wu J S. Effect of long-term fertilization on  $NO_3^- - N$  accumulation and moisture distribution in soil profiles.[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(11): 75-78.

[7] 王兵, 刘文光, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱地农田土壤水分剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 411-416.  
Wang B, Liu W Z, Dang T H et al. Distribution features of soil water content in the profile of rainfed cropland with long-term fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(3): 411-416.

[8] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54.  
Huang M B, Dang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the loess plateau on soil water cycle[J]. Trans. CSAE, 2002, 18(6): 50-54.

[9] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.  
Fan J, Hao M D, Shao M A. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau[J]. Trans. CSAE, 2004, 20(1): 61-64.

[10] 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991. 119.  
Li Y S, Su S M. Efficient ecological and economic system in wangdong watershed of Changwu County[M], Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1991, 119

[11] 郝明德, 王旭刚, 党廷辉, 李丽霞. 黄土高原旱地小麦多年定位施用化肥的产量效应分析[J]. 作物学报, 2004, 30(11): 1108-1112.  
Hao M D, Wang X G, Dang T H, Li L X. Analysis of long term fertilization effect on yield of wheat in dry land on Loess Plateau[J]. Acta Agron. Sin., 2004, 30(11): 1108-1112.

[12] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对冬麦水分利用的影响研究[J]. 土壤, 2000(6): 315-322.  
Fan J, Hao M D, Dang T H. A study on the effect of long-term fertilization on winter wheat water use in dryland[J]. Soils, 2000, (6): 315-322.