

# 不同降水年型下长期施肥旱地小麦产量效应

胡雨彤<sup>1,2</sup> 郝明德<sup>1,3\*</sup> 王哲<sup>1</sup> 付威<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>4</sup>西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 以黄土高原 30 年长期肥料定位试验为基础, 依据降水将生育年划分为干旱年、平水年和丰水年, 研究不同施肥方式对黄土高原冬小麦产量、肥料贡献率和降水利用率的影响。结果表明: 小麦连续种植 30 年中, 氮磷配施和氮磷钾配施下小麦产量、肥料贡献率和降水利用率显著高于不施肥和单施肥处理, 氮磷钾配施下小麦产量、肥料贡献率和降水利用率分别达到  $3480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $61.45 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $6.13 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 不同降水年型下, 丰水年小麦产量、肥料贡献率和降水利用率相对较高; 使用逐步回归分析可知, 不同降水年型下小麦产量主要受氮磷肥施用量、休闲期降水和越冬期降水影响。黄土旱塬可以通过提高氮磷用量同时适当施用钾肥, 以及在休闲期做好蓄水保墒工作来提高小麦产量。

**关键词** 小麦产量; 降水年型; 肥料贡献率; 降水利用率; 逐步回归分析

**Effect of long-term fertilization on winter wheat yield from the dry land under different precipitation patterns.** HU Yu-tong<sup>1,2</sup>, HAO Ming-de<sup>1,3\*</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>, FU Wei<sup>4</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China*; <sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; <sup>3</sup>*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China*; <sup>4</sup>*College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China*).

**Abstract:** Based on 30 years long-term fertilization experiment on the semiarid Loess Plateau in China, we studied the effect of different fertilizer treatments on the winter wheat yield, fertilizer contribution rate (FCR) and precipitation use efficiency (PUE) in different precipitation years (drought, normal and wet years). The result showed that the wheat yield, FCR and PUE were significantly higher in nitrogen + phosphorus (NP) and nitrogen + phosphorus + potassium (NPK) treatments than in control (CK) and phosphorus (P) treatments when winter wheat was planted for 30 consecutive years. The wheat yield, FCR and PUE in NPK treatment were highest, with values of  $3480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $61.45 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $6.13 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively, and those in the wet years were higher than in drought and normal years. The stepwise regression analysis showed that wheat yield was mainly influenced by the amount of nitrogen, phosphorus input and precipitation during fallow period and wintering period. Accordingly, increasing nitrogen and phosphorus input accompanying with potassium and water conservation practices during the fallow period could improve the wheat yield on the semiarid Loess Plateau in China.

**Key words:** winter wheat yield; precipitation pattern; fertilizer contribution rate; precipitation use efficiency; stepwise regression analysis.

本文由国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01)、宁夏农业综合开发科技推广项目(NTKJ-2013-03-1)和西北农林科技大学科技成果推广项目(TGZX2015-24)资助 This work was supported by the National Science & Technology Support Plan (2015BAD22B01), Science and Technology Promotion Projects of Ningxia Agricultural Comprehensive Development (NTKJ-2013-03-1), and Scientific Achievements Promotion Project of Northwest A&F University (TGZX2015-24).

2016-06-03 Received, 2016-10-24 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn

近年来,随着我国农业结构调整的深化,旱作粮田占粮食总面积的比重呈增加趋势.黄土高原是我国典型旱作农业区,同时也是我国小麦主要生产区之一,该区域水土流失严重,土壤肥力低下,作物产量低,水分和养分是限制该区农业发展的主要因素,研究水肥对作物生长发育的调控效应,对实现作物增产具有重要意义<sup>[1-2]</sup>.研究表明,施肥是当前提高粮食产量的主要措施之一,化肥的增产作用占农作物产量的50%左右<sup>[3]</sup>.农田中增施一定氮磷钾肥可以提高肥料贡献率,一般随着施肥量的增加,作物产量呈现先增后减的趋势<sup>[4]</sup>;李芳林等<sup>[5]</sup>研究表明,肥料可以减缓旱地土壤水分对产量的影响,提高小麦产量和水分利用效率.水分和养分对作物产量的影响不是孤立的,而是互相影响的.研究表明,氮肥效益的发挥与农田水分状况密切相关,低供水水平下肥料的增产效益十分显著,但是氮肥贡献率随施肥量的增加呈现递减的趋势<sup>[6]</sup>.前人研究多是依据不同灌水定额和施肥水平对产量的影响来对两者进行调控<sup>[7-9]</sup>,而针对降水年际间变异大的雨养农业区,不同降水年型下冬小麦肥料增产效应的研究报道较少.因此,如何在黄土高原旱作小麦区根据不同降水年型合理施用肥料,提高籽粒产量和肥料效应成为诸多学者一直关注的焦点和热点问题.

本研究通过肥料长期定位试验,探讨了不同降水年型下长期施用化肥对小麦产量、肥料贡献率和降水利用率的影响;同时利用逐步回归法分析在不同降水年型下产量与施肥量和降水量的关系,以期在当地小麦在不同降水年型下合理施肥提供参考依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区自然概况

长期肥料定位试验(35°12' N, 107°40' E,海拔1200 m)于1984年在黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村开始实施.该地区为典型的旱作农业区,属暖温带半湿润大陆性季风气候,农业生产全部依赖天然降水.1984—2014年年平均降水量574.6 mm,降水季节性分布不均,7—9月降水量占全年降水量的55%,年均气温9.1℃.试验区土壤为黄盖黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,全剖面土均匀疏松,通透性好,肥力中等;试验地养分含量、地貌特征在黄土高原沟壑区有一定代表性.试验开始时,0~20 cm土壤养分含量为:有机质 10.5 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.8 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 37.0 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.7 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷 3.0 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 129.3

mg·kg<sup>-1</sup>,pH(H<sub>2</sub>O)为8.3.

### 1.2 试验设计

长期肥料定位试验设CK(不施肥)、P、N、NP和NPK 5个处理,施N量为90 kg·hm<sup>-2</sup>,施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>量90 kg·hm<sup>-2</sup>,施K<sub>2</sub>O量90 kg·hm<sup>-2</sup>.小区面积5.5 m×4 m,3次重复,随机排列.试验从1984年开始连续种植冬小麦(品种于1984、1985年为秦麦4号,1986—1995年为长武131,1996年后为长武134),播种期9月中、下旬,次年6月下旬收获,一年一熟.氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙,钾肥用硫酸钾,肥料在播种前一次性施入;试验区无灌溉,但是每年小麦收获后翻耕20 cm,田间管理同当地大田管理措施.气象数据来自距离试验田2 km左右的长武县气象站.

### 1.3 产量测定

于每年收获期测定小麦籽实产量.

### 1.4 数据处理

为了便于分析,我们采用小麦生育年[即休闲期(7—9月)+生育期(10月—次年6月)]概念,生育年降水量=休闲期降水量+生育期降水量.将生育年降水量划分为不同降水年型.用DI表示干旱指数,AnP表示生育年降水量,M<sub>i</sub>表示1984—2014年生育年平均降水量,σ表示多年生育年降水量的标准差.公式为:DI=(AnP-M<sub>i</sub>)/σ.当DI>0.35为丰水年,-0.35≤DI≤0.35为平水年,DI<-0.35为干旱年<sup>[10]</sup>.

为了方便后期月降水结合小麦生长期分析,将小麦生长期按照小麦生长习性主要划分为:苗期(10月),越冬期(11、12、1、2月),返青期(3月),拔节-孕穗期(4月),抽穗-扬花期(5月),灌浆-成熟期(6月).

1984—2014年间,小麦产量变化趋势用 $Y = a + bt$ 表示,其中:Y为小麦产量(kg·hm<sup>-2</sup>);a为常数项;t为收获时间;b为产量随时间的变化趋势<sup>[11]</sup>.肥料贡献率(kg·kg<sup>-1</sup>)=(施肥区产量-不施肥区产量)/施肥区产量<sup>[12]</sup>;降水利用率(kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>)=当年产量/生育年降水量;变异系数(CV)=标准差/平均值×100%<sup>[13]</sup>;不同降水年型下产量与降水和肥料之间的关系为: $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_iX_i$ ,其中:Y为小麦产量;b<sub>0</sub>为常数项;b<sub>i</sub>为回归方程的系数;X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>,...,X<sub>i</sub>为自变量(如不同月份降水量和不同用量施肥量等).

试验数据采用Microsoft Excel 2003和SPSS 18.0统计软件进行数据整理和分析.采用单因素

(one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ( $\alpha=0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 1985—2014 年间降水年型的分布

根据长武气象站数据分析可知, 生育年降水量在年际间差异较大, 1985—2014 年 30 年间, 在 2004 年生育年降水最大, 为 890.5 mm, 约是 1995 年生育年降水的 2.8 倍. 生育年降水年型可以划分为干旱年 (1986、1987、1992、1995、1996、2001、2003、2005、2007、2009、2013 年)、平水年 (1988、1990、1994、1997、1998、1999、2000、2006、2010 年)、丰水年 (1985、1989、1991、1993、2002、2004、2008、2011、2012、2014 年)<sup>[14]</sup>, 其中干旱年、平水年、丰水年平均降水量分别为 460、564.7 和 696.3 mm.

### 2.2 长期施肥对小麦产量、肥料贡献率和降水利用率的影响

**2.2.1 长期施肥对小麦产量的影响** 连续不施肥的小麦产量在 30 年间呈现降低趋势, 产量平均值为 1307 kg · hm<sup>-2</sup>, 年际间变异系数达到 48.8% (表 1). 连续施磷和施氮的产量变化趋势与不施肥的产量类似, 呈现降低趋势; 而氮磷和氮磷钾配施的产量年际间呈现增加趋势, 其中氮磷配施下为 51.61 kg · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, 达到显著水平 ( $P<0.05$ ). 连续施磷的产量比不施肥的产量降低了 7.7%, 连续施氮的产量比不施肥的产量提高了 77.0%; 氮磷和氮磷钾配施的产量分别比单施磷的产量高 183.8% 和 188.3%, 氮磷和氮磷钾配施的产量分别比单施氮的产量高 48.1% 和 50.5%. 单施氮、磷的产量年际间变异系数在 41.9%~54.3% 之间波动, 氮磷配施和磷钾配施的产量年际间变异系数在 36.6%~38.2% 之间波动.

### 2.2.2 长期施肥对肥料贡献率的影响

表 1 1985—2014 年不同肥料处理下小麦产量

Table 1 Wheat yield under different fertilization treatments during 1985–2014 (mean±SE)

处理 Treatment	平均值 Mean (kg · hm <sup>-2</sup> )	变异系数 CV (%)	趋势 Trend (kg · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
CK	1307±116c	48.8	-6.66±13.62
P	1207±125c	54.3	-16.47±13.72
N	2313±177b	41.9	-14.06±20.63
NP	3425±229a	36.6	51.61±25.11*
NPK	3480±242a	38.2	47.88±27.03

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters within columns indicate significant difference among treatments at 0.05 level. \*  $P<0.05$ . 下同 The same below.

肥的肥料贡献率为 -14.10 kg · kg<sup>-1</sup>, 肥料贡献率在年际间呈现降低趋势, 降低幅度为 0.95 kg · kg<sup>-1</sup> · a<sup>-1</sup>, 年际间变异系数的绝对值达到 249.2% (表 2). 长期单施氮肥的肥料贡献率年际间变化趋于稳定, 但是肥料贡献率达到 38.67 kg · kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 66.3%; 氮磷配施和氮磷钾配施的肥料贡献率年际间呈现出显著增加趋势 ( $P<0.05$ ), 肥料贡献率较高, 达到 61 kg · kg<sup>-1</sup> 以上, 年际间变异系数在 20.4%~21.0% 之间波动.

**2.2.3 长期施肥对降水利用率的影响** 连续不施肥的降水利用率在 30 年间呈现降低趋势, 降水利用率平均值为 2.32 kg · mm<sup>-1</sup> · hm<sup>-2</sup>, 年际间变异系数达到 49.7% (表 3). 连续施磷和施氮 30 年的降水利用率变化趋势与不施肥下呈现类似趋势, 而氮磷和氮磷钾配施的降水利用率年际间呈现增加趋势, 均为 0.07 kg · mm<sup>-1</sup> · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>. 连续施磷的降水利用率比不施肥的降低了 6.9%, 连续施氮的降水利用率比不施肥的提高了 75.4%; 氮磷和氮磷钾配施的降水利用率分别比单施磷的降水利用率提高了 181.0%、183.8%, 氮磷和氮磷钾配施的降水利用率分别比单施氮的降水利用率提高了 49.1%、50.6%. 单施氮磷的降水利用率年际间变异系数在 39.2%~57.2% 之间波动, 氮磷配施和磷钾配施的降水利用率年际间变异系数在 32.1%~32.8% 之间波动.

### 2.3 不同降水年型对小麦产量、肥料贡献率和降水利用率的影响

#### 2.3.1 不同降水年型对小麦产量的影响

表 2 1985—2014 年不同肥料处理下肥料贡献率

Table 2 Fertilizer contribution rate under different fertilization treatments during 1985–2014 (mean±SE)

处理 Treatment	平均值 Mean (kg · kg <sup>-1</sup> )	变异系数 CV (%)	趋势 Trend (kg · kg <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> )
P	-14.10±6.50c	-249.2	-0.95±0.73
N	38.67±4.68b	66.3	0.00±0.55
NP	61.29±2.35a	21.0	0.61±0.25*
NPK	61.45±2.28a	20.4	0.62±0.24*

表 3 1985—2014 年不同肥料处理下降水利用率

Table 3 Precipitation use efficiency under different fertilization treatments during 1985–2014 (mean±SE)

处理 Treatment	平均值 Mean (kg · mm <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )	变异系数 CV (%)	趋势 Trend (kg · mm <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
CK	2.32±0.21c	49.7	-0.02±0.02
P	2.16±0.23c	57.2	-0.04±0.03
N	4.07±0.29b	39.2	-0.03±0.03
NP	6.07±0.36a	32.1	0.07±0.04
NPK	6.13±0.37a	32.8	0.07±0.04



年型下,单施磷肥的小麦产量在干旱年、平水年和丰水年3种降水年型下分别比不施肥的产量降低了10.8%、8.5%和3.8%,连续施氮的小麦产量在3种降水年型下分别比不施肥的产量高63.6%、81.1%和87.8%,而氮磷和氮磷钾配施的产量在3种降水年型下分别比单施磷肥的产量高157.0%~228.9%,而氮磷和氮磷钾配施的产量在3种降水年型下,分别比单施氮肥的产量高40.1%~66.2%(图1)。整体来说,同一施肥条件下小麦产量在丰水年显著高于干旱年,但是平水年和干旱年之间差异不显著。不施肥的产量在丰水年比干旱年高8.0%,单施磷肥和氮肥的产量在丰水年比干旱年高16.4%和23.9%,氮

磷和氮磷钾配施的产量则在丰水年比干旱年高21.9%和31.3%。

**2.3.2 不同降水年型对肥料贡献率的影响** 同一降水年型下,肥料配施处理的肥料贡献率显著高于单施肥料处理的肥料贡献率,其中单施磷肥处理的肥料贡献率最低(图1)。氮磷钾配施处理的肥料贡献率在3种降水年型下分别比单施氮肥处理高23.66、26.37和18.90  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,分别比单施磷肥处理高80.03、78.88和68.68  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同一施肥处理的肥料贡献率在不同降水年型之间差异不显著。

**2.3.3 不同降水年型对降水利用率的影响** 同一降水年型下,单施磷肥的降水利用率在干旱年、平水年和丰水年3种降水年型下分别比不施肥的降水利用率降低了9.7%、8.3%和2.4%,连续施氮的降水利用率在3种降水年型下分别比不施肥处理高62.7%、79.6%和90.2%,而氮磷和氮磷钾配施的降水利用率在3种降水年型下比单施磷肥的降水利用率高154.4%~227.5%,而氮磷和氮磷钾配施的降水利用率在3种降水年型下比单施氮肥的降水利用率高41.2%~67.3%(图1)。整体来说,同一施肥条件下干旱年的降水利用率大于丰水年,但是差异不显著。

#### 2.4 小麦产量与施肥量和降水量之间的关系

相关分析表明,连续30年不施肥的小麦产量与9、10月和生育年降水呈现显著相关关系,相关系数分别为0.255、0.211和0.219;连续单施磷肥的小麦产量与6、9、10、12月、生育期降水呈显著相关关系,相关系数分别为0.268、0.224、0.230、-0.218和0.245,连续单施氮肥的小麦产量与4月、休闲期、生育年降水呈现极显著相关关系,相关系数分别为0.339、0.282和0.346,与2、7和12月降水呈现显著相关关系;氮磷配施的小麦产量与2、4、7月、休闲期和生育期年降水呈极显著正相关关系,相关系数分别达到0.394、0.340、0.392、0.322和0.323,与12月降水呈极显著负相关关系,与9月降水呈显著相关关系,氮磷钾配施的小麦产量与2、4、7、9月、休闲期和生育期年降水呈极显著正相关关系,相关系数分别达到0.448、0.310、0.341、0.379、0.373和0.389,与12月降水呈极显著负相关关系,与5月和11月降水呈显著相关关系(表4)。

用逐步回归法分析不同降水年型下肥料和降水对小麦产量( $Y$ )的影响,分别用 $x_N$ 、 $x_P$ 、 $x_K$ 表示施氮、磷、钾量,分别用 $P_n$ ( $n=1,2,3,\dots,12$ )、 $P_{FS}$ 、 $P_{GS}$ 、 $P_{An}$ 表示各月、休闲期、生育期、生育年降水量。结果表

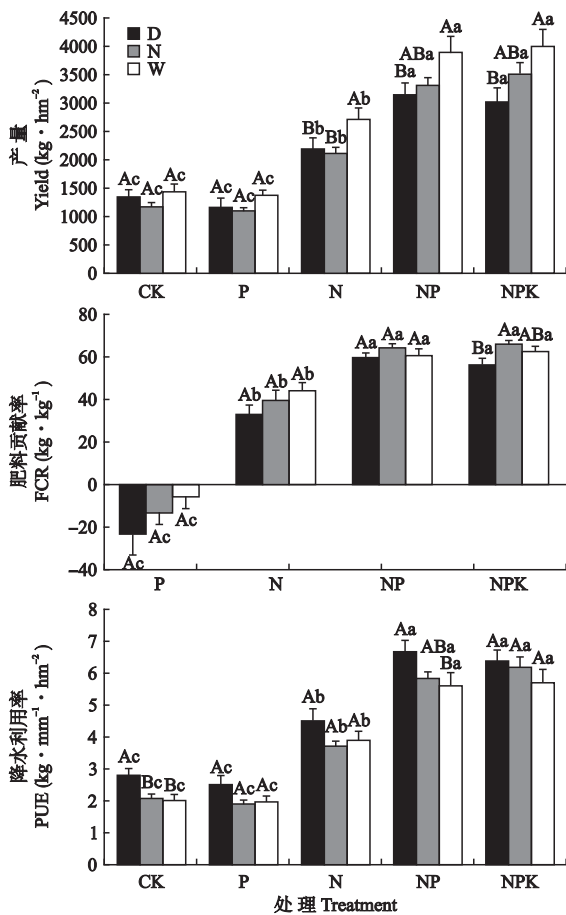


图1 不同降水年型下各施肥处理的小麦产量、肥料贡献率和降水利用率

**Fig.1** Wheat yield, fertilizer contribution rate and precipitation use efficiency under different fertilization treatments in different precipitation patterns.

D: 干旱年 Dry year; N: 平水年 Normal year; W: 丰水年 Wet year. 不同大写字母表示同一施肥水平下不同降水年型差异显著,不同小写字母表示同一降水年型下不同施肥处理差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different capital letters meant significant difference among different precipitation patterns under the same fertilization treatment, and different small letters meant significant difference among different fertilization treatments in the same precipitation pattern at 0.05 level. 下同 The same below.

表 4 不同处理小麦产量与不同时期降水的相关系数  
Table 4 Correlation coefficients of wheat yield under different treatments with precipitation in different periods

降水 Precipitation	CK	P	N	NP	NPK
7月 July	0.071	-0.087	0.266*	0.392**	0.341**
8月 August	0.020	-0.004	0.116	0.012	0.043
9月 September	0.255*	0.224*	0.177	0.261*	0.379**
10月 October	0.211*	0.230*	-0.004	-0.017	0.038
11月 November	-0.076	-0.062	-0.083	0.197	0.214*
12月 December	-0.192	-0.218*	-0.222*	-0.340**	-0.331**
1月 January	0.059	-0.054	0.017	-0.014	0.088
2月 February	0.112	0.007	0.265*	0.394**	0.448**
3月 March	-0.087	0.085	0.109	-0.051	-0.135
4月 April	0.083	0.025	0.339**	0.340**	0.310**
5月 May	-0.173	-0.100	-0.195	-0.206	-0.208*
6月 June	0.192	0.268*	0.189	-0.041	-0.020
休闲期 Fallow season	0.169	0.063	0.282**	0.322**	0.373**
生育期 Growing season	0.146	0.245*	0.198	0.058	0.101
生育年 Whole growing year	0.219*	0.162	0.346**	0.323**	0.389**

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .  $n = 90$ .

明, 在干旱年,  $Y = -5200.782 + 16.137x_N + 5.223x_P + 7.957P_{An} - 23.618P_1 + 8.753P_5 + 9.299P_6 + 12.530P_9 + 20.638P_{10}$  ( $R^2 = 0.821$ ,  $F = 89.684$ ,  $P < 0.05$ ); 在平水年,  $Y = -374.8 + 17.636x_N + 6.111x_P + 5.715x_K - 4.252P_{FS} + 10.520P_7 + 12.131P_9 + 12.035P_{11}$  ( $R^2 = 0.761$ ,  $F = 57.75$ ,  $P < 0.05$ ); 在丰水年,  $Y = 1749.363 + 20.676x_N + 6.171x_P + 4.86x_K + 15.483P_4 - 33.995P_5 + 4.269P_8 + 12.118P_9 - 31.513P_{10} + 35.254P_{12}$  ( $R^2 = 0.801$ ,  $F = 62.703$ ,  $P < 0.05$ ).

在干旱年, 小麦产量与施氮量、施磷量、生育期年降水、6月、9月和10月降水呈现极显著正相关关系, 偏相关系数达到 0.785、0.379、0.446、0.359、0.436和 0.513; 小麦产量与1月降水呈现极显著负相关关系, 偏相关系数达到-0.474; 与5月降水呈现显著正相关关系, 相关系数达到 0.182. 在平水年, 小麦产量分别与施氮量、施磷量、施钾量、7月、9月和11月降水呈极显著相关关系, 与休闲期降水之间呈现显著负相关关系, 小麦产量与7个指标间的偏相关系数分别达到 0.769、0.385、0.283、0.362、0.466、0.309和-0.222. 在丰水年, 小麦产量与施氮量、施磷量、4月、8月和9月降水呈现出极显著正相关关系, 偏相关系数分别达到 0.757、0.327、0.402、0.308和 0.478; 与5月和10月降水呈极显著负相关关系, 偏相关系数分别达到-0.710和-0.601; 与施钾量和12月降水呈显著相关关系, 偏相关系数分别为 0.202和 0.180.

### 3 讨 论

#### 3.1 不同施肥方式对小麦产量、肥料贡献率和降水利用率的影响

本研究中长期不施肥和单施肥中小麦产量呈现降低趋势, 且肥料配施下小麦产量和肥料贡献率显著高于不施肥, 这与 Manna 等<sup>[11]</sup>和俄胜哲等<sup>[15]</sup>在长期定位试验中的研究结果类似. 只是本研究中单施磷肥的小麦产量、降水利用率小于不施肥的产量和降水利用率, 这可能由于磷肥移动性差, 易在土壤中富集; 单施磷肥时, 土壤中其他元素难以得到补充, 土壤养分间比例严重失衡, 作物不能有效利用, 导致小麦产量、肥料贡献率和降水利用率随之降低<sup>[16-18]</sup>.

#### 3.2 不同降水年型对小麦产量、肥料贡献率和降水利用率的影响

本研究表明, 丰水年和平水年中小麦产量和肥料贡献率高于干旱年, 且产量在丰水年与干旱年之间达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), Hu 等<sup>[14]</sup>在长期无机和有机肥配施对小麦产量影响中同样显示该趋势, 这可能是由于降水增多时, 促进了土壤中养分元素的溶解, 有利于作物吸收, 促进根系伸展和作物生长, 从而促进产量的提高<sup>[19]</sup>. 研究表明, 氮磷或氮磷钾配施可显著提高作物产量<sup>[20-22]</sup>. 本研究中同样显示, 在同一降水年型下, 肥料配施显著高于不施肥或者单施化肥的小麦产量、肥料贡献率和降水利用率, 这可能是由于肥料配施时, 不仅满足了作物生长所需的元素, 同时使养分达到平衡模式, 促进作物对养分元素的吸收, 提高了作物产量<sup>[23]</sup>, 同时肥料配施不仅可以提高单一肥料利用率, 肥料之间也可能发生交互作用, 从而间接提高作物产量<sup>[24]</sup>.

#### 3.3 小麦产量与施肥量和降水量之间的关系

本研究中利用相关分析和逐步回归分析可知, 在不同降水年型下, 小麦产量均受到氮肥和磷肥的显著影响, 而在平水年和丰水年中钾肥的影响程度增大; 不同降水年型下, 小麦产量主要受苗期(10月)、越冬期(11、12、2月)、拔节期-孕穗期(4月)、抽穗期-扬花期(5月)、休闲期(7、8、9月)降水影响较大. 一些研究中同样表明, 黄土旱塬小麦产量主要受水肥影响, 肥料中氮、磷对小麦产量的影响较大, 降水中夏闲期降水和越冬期降水对小麦产量的影响较大<sup>[25-27]</sup>. 肥料因素的制约可能与该区域土壤母质中缺氮少磷富钾有关, 而在平水年和丰水年钾肥影响产量的效应增大, 可能与产量增多, 作物从土壤中

带走的钾素增多,导致部分缺钾,施用钾肥时,其对产量的作用会得到提高<sup>[28-29]</sup>.降水因素的制约可能是因为休闲期降水影响播种时土壤墒情;苗期降水影响小麦出苗率,从而影响后期产量;越冬期降水少时会抑制基本苗的生长,最终影响产量;抽穗扬花期降水较多时会影响小麦受精率,增加赤霉病及锈病的暴发,抑制小麦产量<sup>[30-31]</sup>.越冬期降水和拔节期降水保墒措施在雨养农业区不易控制,而休闲期降水通过覆盖、深松等措施可储存在土壤中.陈梦楠等<sup>[32]</sup>研究表明,休闲期覆盖后,土壤蓄水效率显著提高,相比不覆盖处理,在丰水年中提高35%,平水年可提高48%,干旱年中提高101%,休闲期覆盖后,小麦产量和产量构成因素可得到显著提高.邓妍等<sup>[33]</sup>研究表明,夏闲期深翻覆盖可显著提高土壤水分及产量.

总的来说,该区域小麦产量在不同降水年型下主要受氮、磷肥施用量及休闲期和越冬期降水的影响,在指导农户施肥和耕作措施中,应注意氮、磷肥的配施,同时注意钾肥的投入,在休闲期可通过深翻或者覆盖等措施做好蓄水保墒工作来提高作物产量.

#### 参考文献

- [1] He X-Y (何晓雁), Hao M-D (郝明德), Li H-C (李慧成), *et al.* Effects of different fertilization on yield of wheat and water and fertilizer use efficiency in the Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(6): 1333-1340 (in Chinese)
- [2] Wang XP, Li XR, Zhang JG, *et al.* Measurement of rainfall interception by xerophytic shrubs in re-vegetated sand dunes. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, **50**: 897-910
- [3] Shi Y-L (石元亮), Wang L-L (王玲莉), Liu S-B (刘世彬), *et al.* Development of chemical fertilizer industry and its effect on agriculture of China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 852-864 (in Chinese)
- [4] Liu F (刘芬), Tong Y-A (同延安), Wang X-Y (王小英), *et al.* Effects of N, P and K fertilization on spring maize yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2014, **20**(1): 48-55 (in Chinese)
- [5] Li F-L (李芳林), Hao M-D (郝明德), Yang X (杨晓), *et al.* Effects of fertilization on soil water and winter wheat yield in dry land of Loess Plateau. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2010, **30**(1): 154-157 (in Chinese)
- [6] Shen R-K (沈荣开), Wang K (王康), Zhang Y-F (张瑜芳), *et al.* Field test and study on yield, water use and N uptake under varied irrigation and fertilizer in crops. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2001, **17**(5): 35-38 (in Chinese)
- [7] Wang Z-L (王增丽), Feng H (冯浩), Wen G-G (温广贵). Effects of different water and nutrient schedules on farmland moisture and seed maize yield. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* (排灌机械工程学报), 2015, **33**(2): 152-157 (in Chinese)
- [8] Zhang L-Q (张立勤), Ma Z-M (马忠明), Yang J-L (杨君林), *et al.* Effect of irrigation and fertilizer on yield and water use efficiency of malting barley cultivated by raised bed planting. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2015, **35**(10): 1419-1425 (in Chinese)
- [9] Sui J (隋娟), Wang J-D (王建东), Gong S-H (龚时宏), *et al.* Coupling effects of water-fertilizer on utilizing of moisture and fertilizer under drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2015, **34**(12): 38-41, 46 (in Chinese)
- [10] Guo SL, Zhu HH, Dang TH, *et al.* Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China. *Geoderma*, 2012, **189/190**: 442-450
- [11] Manna MC, Swarup A, Wanjar RH, *et al.* Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil & Tillage Research*, 2007, **94**: 397-409
- [12] Wang W-N (王伟妮), Lu J-W (鲁剑巍), Li Y-S (李银水), *et al.* Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(19): 3997-4007 (in Chinese)
- [13] Chloupek O, Hrstkova P, Schweigert P. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Research*, 2004, **85**: 167-190
- [14] Hu YT, Hao MD, Wei XR, *et al.* Contribution of fertilisation, precipitation, and variety to grain yield in winter wheat on the semiarid Loess Plateau of China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*, 2016, **66**: 406-416
- [15] E S-Z (俄胜哲), Yang Z-Q (杨志奇), Luo Z-X (罗照霞), *et al.* Effects of long-term fertilization on wheat yield and nutrient content of Loessial soil on Loess Plateau. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2016, **36**(1): 104-110 (in Chinese)
- [16] Ladha JK, Dawe D, Pathak H, *et al.* How extensive are yield decline in long-term rice-wheat experiments in Asia? *Field Crops Research*, 2003, **81**: 159-180
- [17] Guo Z-L (郭战玲), Kou C-L (寇长林), Yang Z-P (杨占平), *et al.* Phosphate fertilizer application amount for high yield of wheat and environmental safety in fluvo-aquic soil region. *Journal of Henan Agricultural Sciences* (河南农业科学), 2015, **44**(2): 52-55 (in Chinese)



- Chinese)
- [18] Zhang S-Q (张树清). Research on NPK nutrients and rational fertilization technique in China. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 2004, **19**(2): 65-69 (in Chinese)
- [19] Zhan A (占 爱). Improve Nutrient and Water Uptake by Regulating Root Morphology and Physiology. Yangling: Northwest A&F University, 2015 (in Chinese)
- [20] Jiang D (姜 东), Dai T-B (戴廷波), Jing Q (荆奇), *et al.* Effects of long-term combined application of N, P and K fertilizer on grain quality in winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(4): 566-571 (in Chinese)
- [21] Liu S-T (刘树堂), Sui F-G (隋方功), Han X-R (韩晓日), *et al.* Effects of long term position fertilization on the quality and yield components of winter wheat. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2005, **25**(6): 1178-1183 (in Chinese)
- [22] Zhao G-C (赵广才), Chang X-H (常旭虹), Yang Y-S (杨玉双), *et al.* Adjustment effect of nitrogen phosphorus potassium operation on grain yield and quality in different variety of wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2011, **31**(1): 106-112 (in Chinese)
- [23] Shang C-B (尚成柏), Liu S-Y (刘淑英), Wang P (王 平). Effects of organic and chemical fertilization on spring wheat nutrient uptake and yield components in Hemi-dry-land. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2009, **18**(3): 97-102 (in Chinese)
- [24] Liu Y (刘 一). Influences of fertilization on the yield of winter wheat and soil fertility in dryland of Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2003, **10**(1): 40-42 (in Chinese)
- [25] Huang MB, Dang TH, Gallichand J, *et al.* Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2003, **58**: 267-278
- [26] Wang Q-J (王全九), Chai J (柴 晶), Wang X-X (王翔翔). Influence of rainfall in summer fallow period on water and nitrogen use efficiency of winter wheat on Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2015, **31**(24): 82-88 (in Chinese)
- [27] Dang T-H (党廷辉), Gao C-Q (高长青). Study on key water factors of affecting wheat yield in Weibei dry highland. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2003, **10**(1): 9-11 (in Chinese)
- [28] She X-Y (摄晓燕), Xie Y-S (谢永生), Wang H (王辉), *et al.* Characteristics of nutrient distribution on typical dark Loessial soil profile and its historical evolution. *Acta Agriculturae Jiangxi* (江西农业学报), 2011, **23**(8): 1-4 (in Chinese)
- [29] Wang T (王 婷), Zhou H-Y (周海燕), Li L-L (李利利), *et al.* Effect of different long-term fertilizations without chemical potassium on crop yield and soil available potassium contents in Loess Plateau of Eastern Gansu. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2015(5): 44-49 (in Chinese)
- [30] Dong J-C (董计成), Lu J-Z (陆建洲), Cao Y (曹阳), *et al.* The influence of rainfall on winter wheat yield formation. The Tenth Meteorological Science and Technology BBS on Yangtze River Delta, Hangzhou, 2013 (in Chinese)
- [31] Fan Y-Y (樊有义), Gao Y-Z (高玉振), Chen G (陈刚), *et al.* Effect of the rainfall in the wheat growth period on its yield. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2001, **29**(6): 742-743 (in Chinese)
- [32] Chen M-N (陈梦楠), Sun M (孙 敏), Gao Z-Q (高志强), *et al.* Effects of mulching during fallow period on soil water storage and consumption and its relationship with wheat yield of dryland. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2016, **49**(13): 2572-2582 (in Chinese)
- [33] Deng Y (邓 妍), Gao Z-Q (高志强), Sun M (孙敏), *et al.* Effects of deep plowing and mulch in fallow period on soil water and yield of wheat in dryland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(1): 132-138 (in Chinese)
- 
- 作者简介 胡雨彤,女,1989年生,博士研究生. 主要从事黄土旱塬粮食增产效应研究. E-mail: shihezidetian@126.com
- 责任编辑 张凤丽
- 

胡雨彤,郝明德,王哲,等. 不同降水年型下长期施肥旱地小麦产量效应. 应用生态学报, 2017, **28**(1): 135-141

Hu Y-T, Hao M-D, Wang Z, *et al.* Effect of long-term fertilization on winter wheat yield from the dry land under different precipitation patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(1): 135-141 (in Chinese)