

## 不同降水年型和施磷水平对小麦产量的效应

胡雨彤<sup>1,2</sup>, 郝明德<sup>1,3</sup>, 付威<sup>4</sup>, 赵晶<sup>1,2</sup>, 王哲<sup>3</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:**【目的】水肥是黄土旱塬小麦产量提高的两大限制因子。探讨长期定位施肥下不同降水年型和施磷水平对黄土高原旱作小麦产量效应, 可为不同降水年型下合理施用磷肥和提高旱塬小麦产量提供理论依据。【方法】以黄土高原 30 年长期磷肥定位试验为基础, 并将冬小麦生育年降水划分为干旱年型、平水年型和丰水年型, 深入分析不同降水年型和施磷水平对小麦产量、产量构成因素及磷肥贡献率的影响。【结果】干旱年型下各处理的小麦产量、千粒重、穗粒数、公顷有效穗数与平水年型相比呈降低趋势, 丰水年型下则呈增加趋势; 与平水年型相比, 干旱年型的肥料贡献率呈增加趋势, 丰水年型的肥料贡献率呈降低趋势; 干旱年型、平水年型、丰水年型以及 30 年均值中, 随施磷水平的提高, 小麦产量、千粒重、穗粒数呈现出先增后降的趋势; 公顷有效穗数在干旱年型呈现先增后降的趋势, 平水年型、丰水年型和 30 年均值中呈直线上升变化; 磷肥贡献率在干旱年型呈现先增后降的趋势, 平水年型呈现直线上升变化, 丰水年型呈现直线下降变化。进一步对各处理的产量与产量构成因素相关分析可知, 不同降水年型和施磷水平处理主要通过调控公顷有效穗数进而影响小麦产量, 公顷有效穗数与干旱年型、平水年型、丰水年型和连续种植 30 年产量的偏回归系数分别为 0.713、0.294、0.692 和 0.643。【结论】不同降水年型和施磷水平对小麦产量具有显著调控效应, 不同降水年型下施磷水平在 125—137 kg·hm<sup>-2</sup>时小麦增产效果较好, 且以连续种植 30 年施磷 131 kg·hm<sup>-2</sup>处理的增产效果最佳; 降水年型和施磷水平主要通过调控小麦产量构成三因素中的公顷有效穗数而影响小麦产量。

**关键词:** 冬小麦; 降水年型; 施磷水平; 磷肥贡献率; 产量及其构成因素

## Effect of Precipitation Patterns and Different Phosphorus Nutrition Levels on Winter Wheat Yield

HU YuTong<sup>1,2</sup>, HAO MingDe<sup>1,3</sup>, FU Wei<sup>4</sup>, ZHAO Jing<sup>1,2</sup>, WANG Zhe<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; <sup>3</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>4</sup>College of Natural Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract:**【Objective】Water and fertilisation are the main two factors limiting wheat production in arid and semiarid regions of the Loess Plateau. The effects of precipitation patterns and phosphorus nutrition levels on wheat yield under long-term fertilizer field experiment were studied. The result will provide a theoretical basis for improving wheat yield with a reasonable phosphorus level with different precipitation patterns in the semiarid regions.【Method】Growth years precipitation were divided into dry years, normal years and wet years based on 30 years long-term fertilizer field experiment on the semiarid Loess Plateau in China. Effects of precipitation patterns and phosphorus nutrition levels on the winter wheat yield, yield component and phosphorus contribution rate

收稿日期: 2016-07-19; 接受日期: 2016-09-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01)、西北农林科技大学科技成果推广项目(TGZX2015-24)、宁夏农业综合开发可以推广项目(NTKJ-2013-03-1)

联系方式: 胡雨彤, E-mail: shihezedietan@126.com. 通信作者郝明德, E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn

(PCR) were deeply studied on the semiarid Loess Plateau. 【Result】 Wheat yield, 1000-grain weight, grains per spike and spike numbers in the dry years were lower than the normal years, higher in the wet years than the normal years. PCR in the dry years was higher than the normal years, lower in the wet years than the normal years. Wheat yield, 1000-grain weight and grains per spike in the dry, normal, wet and 30 years planting showed a trend of increase first and fall later with the adding of phosphorus. Spike numbers were increased first and fall later in the dry years, presented a rise perpendicularly in the normal years, wet years and 30 years planting. PCR was increased first and fall later in the dry years, presented a rise perpendicularly in the normal years, linear decrease in the wet years. The correlation coefficient between the yield and yield components showed that different precipitation patterns mainly through affecting the spike numbers to influence the yield. The partial regression coefficient among spike numbers and dry, normal, wet years and 30 years planting was 0.713, 0.294, 0.692 and 0.643, respectively. 【Conclusion】 Phosphorus nutrition levels and precipitation patterns could significantly impact the wheat yield. The yield in the 125-137 kg·hm<sup>-2</sup> phosphorus treatment was the best in different precipitation patterns. The yield in the 131 kg·hm<sup>-2</sup> phosphorus treatment was the best with the 30 years continuous planting. Precipitation patterns and phosphorus nutrition levels mainly through regulating the spike numbers of wheat yield components to influence the yields.

**Key words:** winter wheat; precipitation patterns; phosphate fertilizer treatment; phosphorus contribution rate; yield and yield component

## 0 引言

【研究意义】黄土旱塬属于雨养农业区,但水土流失严重,土壤肥力低下,水肥是限制黄土旱塬作物生长的主要因素<sup>[1-2]</sup>。磷是植物生长必需的三大营养元素之一,但磷肥的利用率低,通过水分和磷素状况有效互动,可达到“以水促磷”和“以磷促水”目的<sup>[3]</sup>。研究水、磷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。【前人研究进展】已有研究表明,低磷土壤中,施磷可以有效提高小麦瞬时水分利用效率和叶水势而增加产量,且在同一灌水条件下,施磷可实现小麦水分利用效率和产量的同步提高<sup>[4-6]</sup>。同时适度施磷范围内,适水处理能显著提高植株磷素吸收积累总量,但对植株磷含量影响不大;在水分胁迫下,降低作物对磷素吸收积累<sup>[7]</sup>。适水处理下,过量施磷会导致植株对磷素奢侈吸收,土壤中被固定的磷素越多,磷肥利用率降低,可导致小麦后期出现贪青晚熟,限制磷素养分向子粒中充分分配,降低成穗数和千粒重,从而抑制经济产量的提高<sup>[8-9]</sup>。

【本研究切入点】适宜的水分与磷素配合可提高小麦生物产量和水分生产效率;而缺水高磷或高水低磷组合中产量和水分生产效率较低<sup>[3]</sup>。前人研究多是基于不同灌水定额和施磷下对产量的影响对二者进行调控<sup>[10-13]</sup>,而针对不同降水年型下冬小麦磷肥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,合理施用磷肥,提高籽粒产量和磷肥效应成为诸多学者一直关注的焦点和热点问题。【拟解决的关键问题】本研究借助长期肥料定位

试验,研究分析了不同降水年型下施磷水平对冬小麦产量、产量构成因素和磷肥贡献率的影响,并探讨不同降水年型下施磷水平、产量构成因素与产量之间的内在关系,旨在为黄土旱塬区冬小麦不同降水年型下科学施肥提供理论技术和数据参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

本研究开始于 1984 年黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村的长期肥料定位试验(北纬 35°12',东经 107°40',海拔 1 200 m),整理分析数据截至 2014 年。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。本研究 30 年试验期间,年平均降水量 574.6 mm,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,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具有一定代表性。试验开始时,0—20 cm 土壤养分含量为:全氮 0.8 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 37.0 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质 10.5 g·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。

长期肥料定位试验以磷肥为基本供试因子,设 P<sub>0</sub>、P<sub>45</sub>、P<sub>90</sub>、P<sub>135</sub> 和 P<sub>180</sub> 5 个处理,施磷量(按 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)分别为 0、45、90、135 和 180 kg·hm<sup>-2</sup>;氮肥基施,氮用量为 90 kg·hm<sup>-2</sup>。试验小区面积 22.2 m<sup>2</sup>,3 次重复,随机排列。试验从 1984 年开始连续种植冬小麦(品种:1984、1985 年用秦麦 4 号,1986—1995 年用长武

131, 1996年后用长武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, 肥料在播种前一次性施入土中; 试验区无灌溉, 但是每年小麦收获后翻耕20 cm, 田间管理同大田。

### 1.2 土壤样品采集与分析

本实验于2013年播种前采集各处理0—20 cm土壤样品, 自然风干, 分别过1 mm和0.25 mm的筛。全氮采用凯氏定氮法; 有机质采用重铬酸钾外加热法; 全磷采用酸溶-钼锑抗比色法; 速效磷采用0.5 mol·L<sup>-1</sup>碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法; 速效钾采用1 mol·L<sup>-1</sup>NH<sub>4</sub>OAc浸提-火焰光度法<sup>[14]</sup>。

### 1.3 计产与考种

每年收获期测定小麦产量以及每株穗粒数、单位面积有效穗数、千粒重。产量为收获时晒干的籽粒重。

气象数据来自距离试验田2 km左右的长武县气象站。

### 1.4 数据分析

黄土旱塬区作物产量受施肥影响较大, 但是不同施肥量和部分年份间产量变异性较大, 这与不平衡施肥以及该区域降水变异性大有关<sup>[15-16]</sup>。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月至次年6月))概念。1984—2014年30年间, 生育年降水量最高值在2014年达到890.5 mm, 1995年最低, 为318.4 mm。将生育年降水量划分为干旱年型、平水年型和丰水年型3种类型。用 $DI$ 表示干旱指数,  $AnP$ 表示生育年降水量,  $M_I$ 表示1984—2014年生育年平均降水量,  $\sigma$ 表示多年生育年降水量的标准差。

$$DI = (AnP - M_I) / \sigma$$

当 $DI > 0.35$ 为丰水年型,  $-0.35 < DI < 0.35$ 为平水年型,  $DI < -0.35$ 为干旱年型<sup>[17]</sup>。

30年间, 丰水、平水、干旱三者年型出现频率很近。干旱年型11年, 分别是1986、1987、1992、1995、1996、2001、2003、2005、2007、2009、2013年; 平水年型9年, 分别是1988、1990、1994、1997、1998、1999、2000、2006、2010年; 丰水年型10年, 分别是1985、1989、1991、1993、2002、2004、2008、2011、2012、2014年<sup>[18]</sup>。

磷肥贡献率( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) = (施磷区产量 - 不施磷区产量) / 施磷区产量<sup>[19]</sup>

1984—2014年, 不同降水年型下, 小麦产量变化趋势用 $y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ 表示, 其中,  $y$ 为小麦产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $x$ 为施磷量( $\text{P}_2\text{O}_5$ ),  $b_0$ 为不施肥时小麦产量,  $b_1$ 为主效应系数, 即低施肥量时作物增产趋势,  $b_2$ 表示抛物线曲率大小和方向, 即小麦产量随施肥量的增加而达到的最高前后的变化趋势<sup>[20]</sup>。

试验数据采用Microsoft Excel 2003和SPSS18.0统计软件进行数据整理和分析。

## 2 结果

### 2.1 不同施磷水平下30年后土壤养分状况

连续种植小麦30年后土壤养分, 见表1。由表1可知, 不同磷素水平连续施用30年后, 土壤中全氮在不同处理之间差异不显著; 土壤中有有机质在施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )90和135  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 显著高于不施磷处理, 分别高出8.03%和8.60%; 土壤中全磷在施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )90、135和180  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 显著高于不施磷处理, 分别高出36.49%、51.35%和77.03%; 土壤中速效磷在施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )45、90、135和180  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 分别比不施磷处理高出1.84、4.21、9.79和11.22倍; 土壤速效钾在不同施磷水平下呈现趋势不一致, 整体来说, 随着施磷水平的提高, 其含量分别比不施磷处理中降低了6.08%、13.78%、10.76%和9.11%。

表1 不同施磷水平30年后土壤肥力差异

Table 1 Effect of long-term different phosphate fertilizer levels on soil fertility

处理	全氮	有机质	全磷	有效磷	速效钾
Treatment	Total Nitrogen ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Organic matter ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Total phosphorus ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Available phosphorus ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Available potassium ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
P <sub>0</sub>	0.92±0.02a	12.21±0.40b	0.74±0.00c	4.14±0.42e	142.86±6.42a
P <sub>45</sub>	0.96±0.03a	13.01±0.67ab	0.85±0.01c	11.77±1.27d	134.17±6.55ab
P <sub>90</sub>	0.95±0.01a	13.19±0.17a	1.01±0.01b	21.59±1.65c	123.17±5.81b
P <sub>135</sub>	0.93±0.01a	13.26±0.01a	1.12±0.04b	44.69±2.01b	127.49±3.23ab
P <sub>180</sub>	0.92±0.02a	12.71±0.48ab	1.31±0.10a	50.59±0.67a	129.85±5.98ab

同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 平均值±标准误

Different letters in the same column show significant difference ( $P < 0.05$ ), average±standard error

2.2 不同降水年型和施磷水平对小麦产量的影响

由表 2 和图 1 可知,降水年型和施磷水平对小麦产量具有显著的调控作用,但是二者的交互作用对产量影响不明显。不同降水年型相比,冬小麦平均产量以丰水年型最高,在 2 676.73—3 941.13kg·hm<sup>-2</sup> 波动,显著高于干旱年型和平水年型。不同施磷水平下,丰水年型的冬小麦平均产量比干旱年型增加 516.63—709.65 kg·hm<sup>-2</sup>,增产率达 21.09%—29.50%;而丰水年型比平水年型增加 473.51—787.87 kg·hm<sup>-2</sup>,增产率达 13.67%—27.66%。且施磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 水平超过 90

kg·hm<sup>-2</sup>,小麦增产幅度减小,丰水年型与干旱年型相比,增幅稳定在 21%左右;丰水年型与平水年型相比,增幅稳定在 14%。小麦产量在不同降水年型和施磷水平处理间的变异系数波动范围较大,如在干旱年型、平水年型和丰水年型分别达到 33.39%—51.18%、21.44%—26.09% 和 38.59%—43.04%,整体来说,变异系数平水年型 < 干旱年型 < 丰水年型。

同一降水年型下冬小麦平均产量随施磷水平的增加均呈先升后降的抛物线变化曲线,从不同降水年型

表 2 磷肥水平和降水年型对产量、产量构成因素的影响

Table 2 Effects of phosphate fertilizer and precipitation patterns on yield and yield component

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	自由度 <i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
产量 Yield	磷肥 Phosphorus fertilization	4	25.806	0.000
	降水年型 Precipitation patterns	2	17.499	0.000
	磷肥 × 降水年型 Phosphorus fertilization×Precipitation patterns	8	0.249	0.981
千粒重 1000-grain weight	磷肥 Phosphorus fertilization	4	2.601	0.036
	降水年型 Precipitation patterns	2	24.903	0.000
	磷肥 × 降水年型 Phosphorus fertilization×Precipitation patterns	8	0.281	0.972
穗粒数 Grains per spike	磷肥 Phosphorus fertilization	4	2.376	0.051
	降水年型 Precipitation patterns	2	18.523	0.000
	磷肥 × 降水年型 Phosphorus fertilization×Precipitation patterns	8	1.714	0.093
公顷有效穗数 Spike numbers	磷肥 Phosphorus fertilization	4	19.400	0.000
	降水年型 Precipitation patterns	2	22.326	0.000
	磷肥 × 降水年型 Phosphorus fertilization×Precipitation patterns	8	0.209	0.989

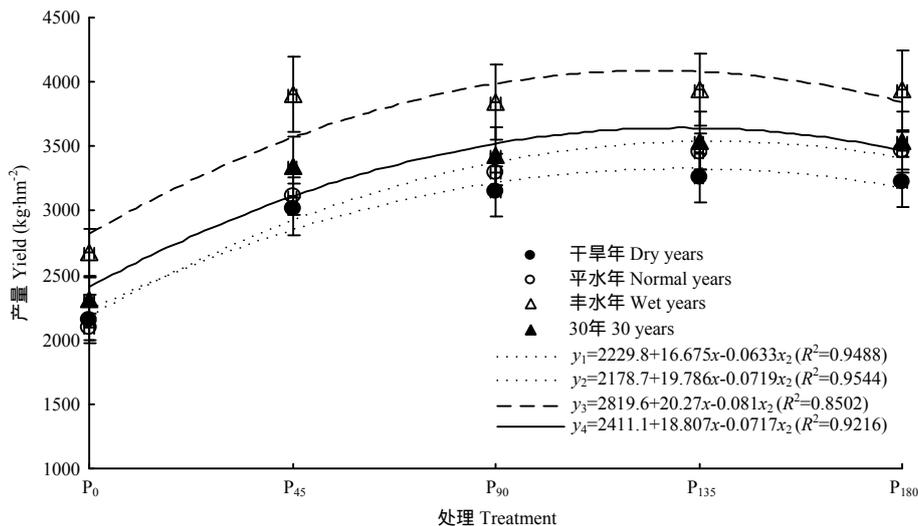


图 1 不同降水年型下各施肥处理中的小麦产量

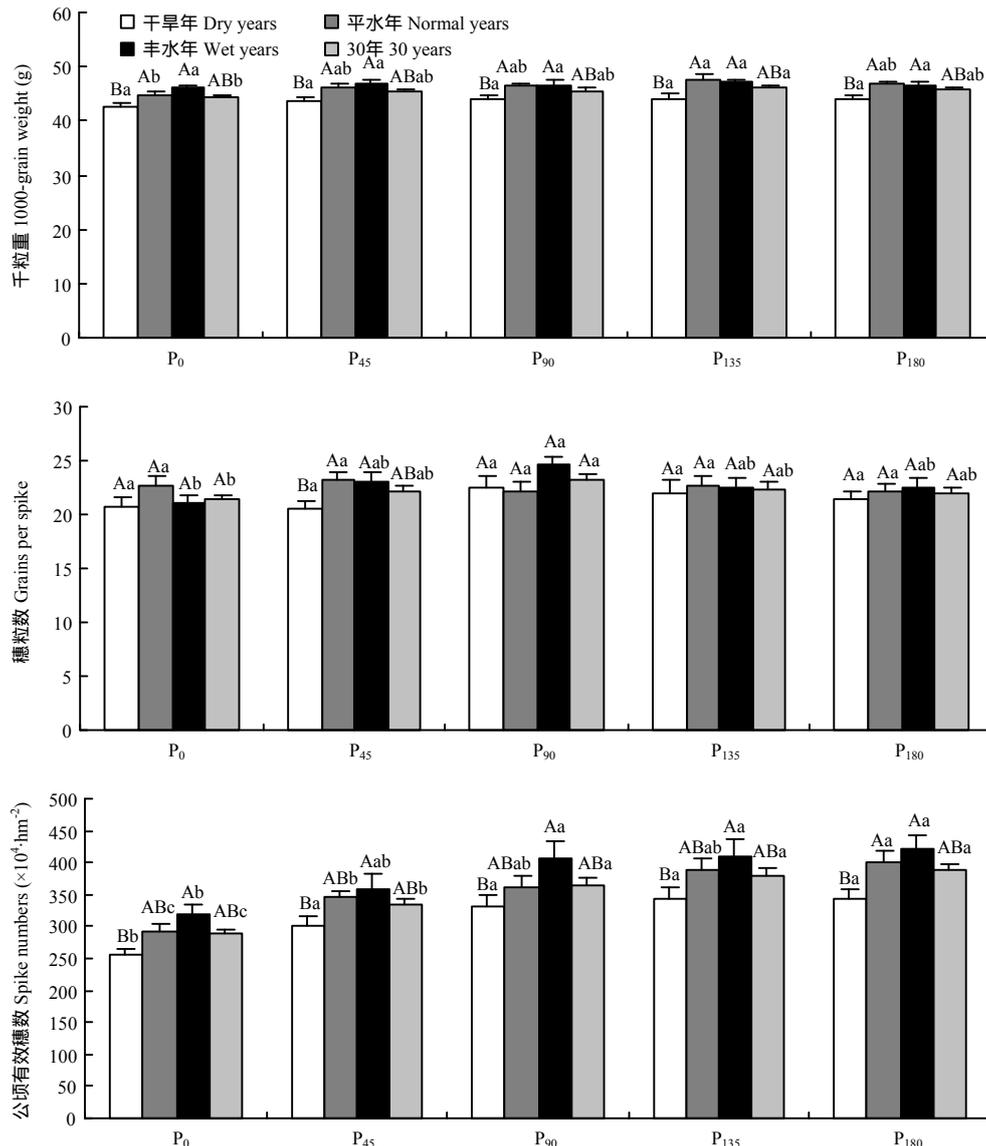
Fig. 1 Wheat yield of different phosphate fertilizer treatments in different precipitation patterns

下施磷水平与产量趋势拟合方程可以看出，在不同降水年间，施肥量和产量之间存在极其显著的回归关系。在干旱年型  $y=2229.8+16.675x-0.0633x^2$  ( $R^2=0.9488$ )，当施肥量为  $131.71 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，产量达到最高为  $3327.97 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；在平水年型  $y=2178.7+19.786x-0.0719x^2$  ( $R^2=0.9544$ )，当施肥量为  $137.59 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时，产量最高为  $3539.92 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；在丰水年型  $y=2819.6+20.27x-0.081x^2$  ( $R^2=0.8502$ )，当施肥量为  $125.12 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时，产量

最高为  $4087.73 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；30 年整体分析， $y=2411.1+18.807x-0.0717x^2$  ( $R^2=0.9216$ )，当施肥量为  $131.15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时，产量最高为  $3644.38 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

### 2.3 不同降水年型和施磷水平对小麦产量构成因素的影响

由表 2 可知，千粒重、穗粒数、公顷有效穗数受降水年型的极显著影响 ( $P < 0.01$ )，而受磷肥水平和降水年型的交互作用不明显。由图 2 可知，平水年型



大写字母表示同一磷素水平下不同降水年型和 30 年平均值中显著性分析结果 ( $P < 0.05$ )，小写字母表示同一降水年型下不同磷肥水平中显著性分析结果 ( $P < 0.05$ )。下同

Capital letters denoted significant differences among the precipitation patterns and the average during 30 years within the same fertilization treatment ( $P < 0.05$ ), Small letters denoted significant differences among the different phosphorus fertilization treatments within the same precipitation patterns ( $P < 0.05$ ). The same as below

图 2 不同降水年型下各施肥处理中的产量构成因素

Fig. 2 Wheat yield compositions of different phosphate fertilizer treatments in different precipitation patterns

和丰水年型的小麦千粒重显著高于干旱年型，与干旱年型相比，平水年型和丰水年型的小麦平均千粒重分别提高 2.03—3.46 g 和 2.57—3.33 g。3 种降水年型下冬小麦千粒重与平均产量的变化趋势相似，亦均随施磷水平的提高呈先上升后下降的变化趋势，且施磷水平达 135 kg·hm<sup>-2</sup> 时千粒重达最大值，显著高于对照不施磷处理，增幅分别是 3.51%、6.55% 和 2.33%。连续种植 30 年中，施磷 45、90、135 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 下小麦千粒重分别比对照高出了 2.43%、2.66%、4.01% 和 2.77%。千粒重在干旱年型、平水年型和丰水年型变异系数分别在 8.51%—10.83%、5.33%—11.04% 和 7.00%—11.35% 波动，其中在干旱年型和丰水年型中均在不施磷处理中变异系数最小，分别是 8.51% 和 7.00%，平水年型在施磷 90 kg·hm<sup>-2</sup> 时最小，为 5.33%。

穗粒数在不同降水年型间变化不明显。干旱年型和丰水年型中，同一降水年型下，施磷水平对穗粒数影响不显著；在丰水年型，施磷 45、90、135 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 下穗粒数分别比对照高出了 9.30%、17.13%、6.64% 和 7.12%。连续种植 30 年中，施磷 45、90、135 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 下穗粒数分别比对照高出了 3.45%、8.08%、4.39% 和 2.61%。穗粒数在干旱年型、平水年型和丰水年型变异系数分别在 20.09%—30.94%、16.54%—21.25% 和 16.80%—24.30% 波动，其中干旱年型施磷 180 kg·hm<sup>-2</sup> 时变异系数最小，为 20.09%，平水年型在施磷 45 kg·hm<sup>-2</sup> 时最小，为 16.54%，丰水年型在不施磷处理中变异系数最小，为 16.80%。

同时，平水年型和丰水年型的小麦公顷有效穗数显著高于干旱年型，平水年和丰水年相比干旱年分别增加 9.42%—16.71% 和 18.90%—24.46%。同一降水年型下施磷处理的小麦公顷有效穗数显著高于对照不施磷处理。随施磷水平的提高，干旱年型的小麦公顷有效穗数呈先升高后降低的变化趋势，而平水年型和丰水年型则呈直线上升变化趋势。干旱年型、平水年型和丰水年型的小麦公顷有效穗数增幅分别达 17.50%—34.20%、18.18%—37.39% 和 12.24%—32.33%。连续种植 30 年中，施磷 45、90、135 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 下小麦公顷有效穗数分别比对照高出了 15.76%、26.81%、31.81% 和 34.40%。小麦公顷有效穗数在干旱年型、平水年型和丰水年型变异系数分别在 21.85%—30.72%、17.11%—25.60% 和 28.11%—34.94% 波动，其中干旱年型不施磷中变异系数最小，为 21.85%，平水年型在施磷 45 kg·hm<sup>-2</sup> 时最小，为 17.11%，丰水年型在施磷 180 kg·hm<sup>-2</sup> 时变异系数最小，为 28.11%。整体来说，

千粒重、穗粒数和小麦公顷有效穗数在平水年型中变异系数相对较小。

#### 2.4 不同降水年型和施磷水平对小麦磷肥贡献率的影响

由图 3 可知，不同降水年型下各施磷水平处理的磷肥贡献率变化趋势表现不尽一致。不同年型相比，小麦磷肥贡献率总体表现为干旱年型 > 平水年型 > 丰水年型。在同一降水年型下，干旱年型中随施磷水平提高，磷肥贡献率呈现先增后降的趋势，在施磷水平为 135 kg·hm<sup>-2</sup> 的磷肥贡献率达最大值，为 37.02 kg·kg<sup>-1</sup>；平水年型中随施磷水平提高，磷肥贡献率呈直线上升变化，在施磷水平为 180 kg·hm<sup>-2</sup> 的磷肥贡献率达到最大值，其数值为 35.69 kg·kg<sup>-1</sup>；丰水年型中随施磷水平提高，磷肥贡献率呈直线下降变化，在施磷水平为 45 kg·hm<sup>-2</sup> 的磷肥贡献率达到最大值，为 28.48 kg·kg<sup>-1</sup>。小麦磷肥贡献率在不同降水年型和施磷水平处理间的变异系数波动范围较大，如在干旱年型、平水年型和丰水年型分别达到 48.58%—53.70%、72.91%—83.65% 和 70.54%—218.33%，整体来说，变异系数干旱年型 < 平水年型 < 丰水年型。

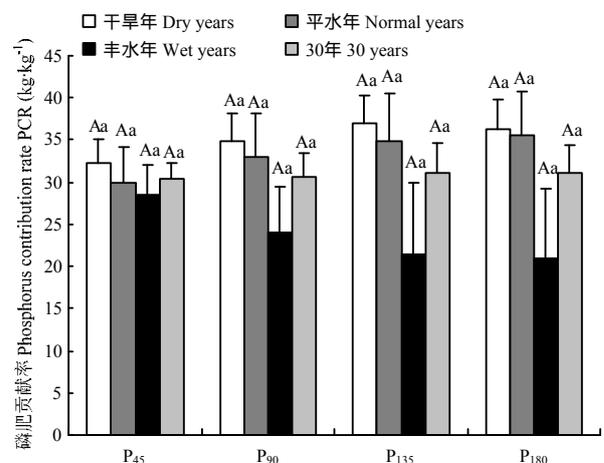


图 3 不同降水年型下各施磷处理中的磷肥贡献率

Fig. 3 Phosphorus contribution rate of different phosphate fertilizer treatments in different precipitation patterns

#### 2.5 不同降水年型与施磷水平下小麦产量和产量构成因素之间的相关分析

从表 3 可以看出，不同施磷水平处理的小麦公顷有效穗数和产量在干旱年型、丰水年型和连续种植 30 年下均呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )。干旱年型

表 3 小麦产量构成三要素与产量的相关系数  
Table 3 The correlation coefficient of the three elements of yield components and wheat yield

处理 Treatment	相关系数 Correlation coefficient( <i>r</i> )	干旱年型 Dry year			平水年型 Normal year			丰水年型 Wet year			平均值 Average		
		千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Grains per spike	公顷有效 穗数 Spike numbers	千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Grains per spike	公顷有效 穗数 Spike numbers	千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Grains per spike	公顷有效 穗数 Spike numbers	千粒重 1000-grain weight	穗粒数 Grains per spike	公顷有效穗数 Spike numbers
P <sub>0</sub>	产量 Yield	-0.039	0.598**	0.813**	0.002	-0.205	-0.109	0.001	0.368*	0.715**	0.056	0.335*	0.610**
	穗粒数 Grains per spike	0.329	1	0.381*	-0.168	1	0.106	-0.164	1	0.063	0.058	1	0.183
	公顷有效穗数 Spike numbers	-0.069	0.381*	1	0.239	0.106	1	-0.029	0.063	1	0.164	0.183	1
	产量 Yield	-0.169	0.663**	0.888**	0.216	0.045	0.227	-0.107	0.591**	0.757**	-0.003	0.519**	0.735**
P <sub>45</sub>	穗粒数 Grains per spike	0.136	1	0.446**	0.031	1	0.088	-0.452*	1	0.502**	-0.024	1	0.439**
	公顷有效穗数 Spike numbers	-0.358*	0.446**	1	0.329	0.088	1	-0.138	0.502**	1	-0.044	0.439**	1
	产量 Yield	-0.307	0.159	0.645**	-0.078	0.251	0.027	0.146	0.178	0.600**	0.004	0.212*	0.558**
	穗粒数 Grains per spike	-0.079	1	0.081	-0.228	1	0.042	-0.243	1	0.228	-0.117	1	0.166
P <sub>135</sub>	公顷有效穗数 Spike numbers	-0.429*	0.081	1	0.253	0.042	1	0.047	0.228	1	-0.025	0.166	1
	产量 Yield	-0.056	0.327	0.522**	0.221	0.347	0.137	0.115	0.346	0.777**	0.117	0.321**	0.607**
	穗粒数 Grains per spike	0.049	1	-0.126	0.117	1	-0.087	-0.307	1	0.240	-0.007	1	0.034
	公顷有效穗数 Spike numbers	-0.428*	-0.126	1	0.119	-0.087	1	0.010	0.240	1	-0.012	0.034	1
P <sub>180</sub>	产量 Yield	-0.061	0.607**	0.605**	-0.120	0.627**	0.163	0.280	0.599**	0.702**	0.153	0.594**	0.601**
	穗粒数 Grains per spike	0.144	1	0.184	-0.148	1	-0.076	0.244	1	0.156	0.160	1	0.143
	公顷有效穗数 Spike numbers	-0.426*	0.184	1	-0.065	-0.076	1	0.095	0.156	1	-0.018	0.143	1
	产量 Yield												

\*和\*\*表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著 \* and \*\* represent significant difference at the 0.05 and 0.01 levels

下施磷水平为 0、45 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 3 个处理的穗粒数和产量之间呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )；不施磷处理中穗粒数与小麦公顷有效穗数呈现显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )，施磷 45 kg·hm<sup>-2</sup> 处理的穗粒数与小麦公顷有效穗数之间呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )，达到 0.446；不同施磷水平处理的公顷有效穗数与千粒重之间呈负相关关系，且相关性在施磷 45、90、135、180 kg·hm<sup>-2</sup> 均达显著水平 ( $P < 0.05$ )。平水年型下仅有施磷 180 kg·hm<sup>-2</sup> 处理的小麦穗粒数和产量之间呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )，且相关系数达 0.627 外，其他各施磷水平处理的产量及其构成因素间的相关性均未达显著水平。而丰水年型下施磷 45 kg·hm<sup>-2</sup> 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 处理的穗粒数和产量之间呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )，且相关系数分别达 0.591 和 0.599，对照未施磷处理的穗粒数和产量之间亦呈显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ )。连续种植 30 年中，施磷水平为 45、135 和 180 kg·hm<sup>-2</sup> 3 个处理的穗粒数和产量之间呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )，施磷水平为 0 和 90 kg·hm<sup>-2</sup> 2 个处理的穗粒数和产量之间呈显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ )；施磷 90 kg·hm<sup>-2</sup> 时，穗粒数与小麦公顷有效穗数之间呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )，达到 0.439。

对同一降水年型和 30 年均值下不同施磷水平处理的产量构成因素对产量的回归分析结果可知，干旱年型、平水年型、丰水年型和 30 年均值中的回归方程分别为：产量 = -2412.015 + 26.089 × 千粒重 + 67.993 × 穗粒数 + 8.812 × 公顷有效穗数 ( $R^2 = 0.60$ ,  $F = 83.322$ ,  $P < 0.01$ )、产量 = -249.058 + 31.067 × 千粒重 + 38.626 × 穗粒数 + 2.858 × 公顷有效穗数 ( $R^2 = 0.151$ ,  $F = 7.749$ ,  $P < 0.01$ )、产量 = -4191.173 + 55.457 × 千粒重 + 100.015 × 穗粒数 + 7.803 × 公顷有效穗数 ( $R^2 = 0.599$ ,  $F = 72.712$ ,  $P < 0.01$ )、产量 = -1915.727 + 22.646 × 千粒重 + 72.505 × 穗粒数 + 7.150 × 公顷有效穗数 ( $R^2 = 0.506$ ,  $F = 152.530$ ,  $P < 0.01$ )，且 4 种类型下小麦穗粒数和公顷有效穗数与产量之间的偏相关系数均呈显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关，其偏相关系数分别为 0.441 和 0.713、0.195 和 0.294、0.396 和 0.692、0.355 和 0.643。由此说明降水年型和施磷水平主要通过调控公顷有效穗数的多少进而影响小麦产量。

### 3 讨论

#### 3.1 降水年型和施磷水平下小麦产量

小麦产量的高低受多种因素的综合影响，在黄土

旱塬地区主要是水和肥。研究表明，不同降水年型下产量丰水年型 > 平水年型 > 干旱年型<sup>[18]</sup>；无论施磷与否，随水分条件的改善，小麦产量明显增加<sup>[21]</sup>。本研究中，同样显示在不同施磷水平下小麦产量丰水年型 > 平水年型 > 干旱年型，这可能是在干旱区，降水增多提高了土壤水分含量，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，从而提高产量<sup>[22]</sup>。

大量研究表明，随着施氮量的增加，小麦产量呈现出先增后减的抛物线趋势<sup>[23-24]</sup>；本研究中证实了在同一施氮下，磷肥用量与产量之间存在先升后降的抛物线关系，由抛物线最高点可知，在干旱年型，当施肥量为 131.71 kg·hm<sup>-2</sup>，产量最高为 3 327.97 kg·hm<sup>-2</sup>；在平水年型，当施肥量为 137.59 kg·hm<sup>-2</sup> 时，产量最高为 3 539.92 kg·hm<sup>-2</sup>；在丰水年型，当施肥量为 125.12 kg·hm<sup>-2</sup> 时，产量最高为 4 087.73 kg·hm<sup>-2</sup>；连续种植 30 年中，当施肥量为 131.15 kg·hm<sup>-2</sup> 时，产量最高为 3 644.38 kg·hm<sup>-2</sup>。在保持一定施氮水平下，起初随着施磷量的增加，土壤养分状况会改善，同时肥料具有“以肥促水”的作用，改善土壤水分状况，小麦产量会提高，到一定施肥量之后，随着磷肥用量的增加，土壤和植物中磷素累积，其他元素含量较低，磷和其他元素间比例失衡，作物不能有效利用，小麦产量会降低<sup>[25-26]</sup>；长武地区 30 年后在施磷 ( $P_2O_5$ ) 90 kg·hm<sup>-2</sup> 以后，土壤全氮开始下降，施磷 ( $P_2O_5$ ) 45 kg·hm<sup>-2</sup> 以后，土壤速效钾含量呈现降低趋势，磷素呈增加趋势，这可能由于氮磷钾养分的失衡，小麦产量在 135 kg·hm<sup>-2</sup> 后呈现降低趋势 (表 1)。同时研究表明，当土壤中有效磷含量高 30 mg·kg<sup>-1</sup> 时<sup>[27]</sup>，小麦增产效果不明显，长武地区长期连续 30 年施磷 135 kg·hm<sup>-2</sup> 后，土壤有效磷含量达到 44.69 mg·kg<sup>-1</sup> (表 1)，因此，一般该区域施磷 135 kg·hm<sup>-2</sup> 后，小麦产量有降低趋势。最佳施肥量的提出，为雨养农业区不同降水年型下合理施肥，提供了一个数据参考。

#### 3.2 降水年型和施磷水平下小麦产量构成因素

王旭东<sup>[28]</sup>在研究中表明，增施磷肥显著提高千粒重、穗粒数、公顷有效穗数；杨胜利等<sup>[29]</sup>研究表明，增施磷肥能够增加成穗数，千粒重，而对穗粒数没有影响；郝明德等<sup>[30]</sup>研究表明，连续 18 年种植小麦期间，丰水年型下千粒重、穗粒数、公顷有效穗数高于其他降水年型。本研究中表明降水年型和施磷水平对穗粒数影响不明显，而对千粒重和公顷有效穗数影响

较大，其中对公顷有效穗数影响最大，这是由于 3 种降水年型下公顷有效穗数与产量之间偏回归系数均最高，而偏回归系数的大小表明对因变量影响的相对大小<sup>[31]</sup>。公顷有效穗数可以作为评价小麦产量高低的一个标准，在不同降水年型下公顷有效穗数越高，小麦产量越高。

### 3.3 降水年型和施磷水平下磷肥贡献率

MATAR 等<sup>[32]</sup>研究表明，磷肥对小麦的效应受降雨分布影响较大，一般在水分胁迫存在时磷肥利用效率较高。本研究中，磷肥贡献率在干旱年型高于平水年型，而丰水年型低于平水年型，这可能与磷肥在严重缺水时可以降低小麦耗水量，提高水分利用效率，相对提高小麦产量，提高磷肥贡献率<sup>[33]</sup>，同时磷素营养对干旱下有机渗透调节物质的积累有重要调控作用有关<sup>[34]</sup>；水分较多时，不施磷产量相对于旱年较高，磷肥贡献率增加梯度降低，显示丰水年磷肥贡献率较低。

## 4 结论

在施氮的基础上，长期施用不同用量的磷肥可以显著提高土壤中磷含量，提高小麦产量，且随着磷肥用量的增多，小麦产量呈现出先上升后下降的抛物线趋势。在不同降水年型下，磷肥施用量应该在 125—137 kg·hm<sup>-2</sup> 之间，从连续种植 30 年来看，施磷 131 kg·hm<sup>-2</sup> 时，小麦产量较高。

干旱年型、平水年型和丰水年型下，公顷有效穗数与产量间均存在极显著的相关关系，且在回归分析中，偏相关系数达到最大，分别达到 0.713、0.294 和 0.692。从连续种植 30 年来看，公顷有效穗数和产量的偏相关系数达到 0.643。降水年型和磷肥用量主要通过影响公顷有效穗数来影响小麦产量。

干旱年型磷肥贡献率高出平水年型 1.79%—8.09%，而丰水年型低于平水年型 4.81%—41.02%，且降水年型和磷素用量对磷肥贡献率影响不显著。

## References

[1] 魏艳宏. 黄土高原沟壑区旱地施肥水平对小麦产量的影响分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.  
WEI Y H. Analysis of the effects of fertilization level on wheat yield in rainfed land of the gully regions of Loess Plateau[D]. Yang ling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)

[2] HUANG M B, DANG T H, GALLICHAND J, GOULET M. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion

in the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(3): 267-278

[3] 刘明, 逢焕成. 水磷互作对黑垆土春小麦生长及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2007(4): 73-75.  
LIU M, PANG H C. Research on interaction of water and phosphorus on growth and yield of spring wheat in loessial soil. *Soil and Fertilizer Science*, 2007(4): 73-75. (in Chinese)

[4] 张蓓蓓. 施磷对黄土旱塬小麦水分利用效率、水势及产量的影响. *中国农学通报*, 2015, 31(6): 35-38.  
ZHANG B B. Effect of phosphorus adding on water use efficiency, leaf water potential and yield of wheat on Loess Plateau. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(6): 35-38. (in Chinese)

[5] 康利允, 沈玉芳, 岳善超, 李世清. 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 140-147.  
KANG L Y, SHEN Y F, YUE S C, LI S Q. Effect of phosphorus application in different soil depths on root distribution and grain yield of winter wheat under different water conditions. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 140-147. (in Chinese)

[6] 许卫霞, 于振文. 水磷耦合对小麦耗水特性和子粒产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(5): 821-828.  
XU W X, YU Z W. Effect of irrigation and phosphorus fertilizer application on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 821-828. (in Chinese)

[7] 赵长海, 逢焕成, 李玉义. 水磷互作对潮土玉米苗期生长及磷素积累的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 236-240.  
ZHAO C H, PANG H C, LI Y Y. Effect of interaction of water and phosphorus on maize growth and phosphorus accumulation in fluvo-aquic soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 236-240. (in Chinese)

[8] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 冯倩, 孙丞鸿, 王志伟. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 658-665.  
LI T L, XIE Y H, HONG J P, FENG Q, SUN C H, WANG Z W. Effects of phosphorus application rates on winter wheat yield and phosphorus use efficiency in drylands of south Shanxi povince. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(6): 658-665. (in Chinese)

[9] 王荣辉, 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 李华. 施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 115-121.

- WANG R H, WANG Z H, LI S X, WANG X N, LI H. Effects of P rates on N P K and dry matter accumulation and grain yield of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 115-121. (in Chinese)
- [10] 曾广伟, 兰进好, 刘义国, 李玲燕, 林琪. 不同土壤水分条件下施磷对小麦光合性能和产量影响比较. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 41-46.
- ZENG G W, LAN J H, LIU Y G, LI L Y, LIN Q. Comparison of effects of different soil water conditions and phosphorus application on photosynthesis and yield of wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(5): 41-46. (in Chinese)
- [11] 曾广伟, 林琪, 杜金哲, 刘义国, 李玲燕. 不同土壤水分条件下施磷量对小麦旗叶衰老及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2014(3): 102-107.
- ZENG G W, LIN Q, DU J Z, LIU Y G, LI L Y. Effect of different soil water conditions and different phosphorus supplied on the flag leaf senescence and yield of wheat. *Soil and Fertilizer Science*, 2014(3): 102-107. (in Chinese)
- [12] 郑彩霞, 张富仓, 张志亮, 康银红. 限量灌水和施磷对冬小麦养分吸收及利用的影响. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 102-107.
- ZHENG C X, ZHANG F C, ZHANG Z L, KANG Y H. Effect of limited irrigation and phosphorus fertilizer to nutrition absorption and utilization of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(3): 102-107. (in Chinese)
- [13] 王瑜, 宁堂原, 迟淑筠, 田慎重, 李增嘉. 不同施磷水平下灌水量对小麦水分利用特征及产量的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 232-237.
- WANG Y, NING T Y, CHI S J, TIAN S Z, LI Z J. Effect of irrigation amount on water use characteristics and grain yield of wheat under different phosphorus application rates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 232-237. (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Analysis of Soil Characteristics*. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [15] FAN T L, STEWART B A, WANG Y, LUO J J, ZHOU G Y. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 106: 313-329.
- [16] WANG X B, DAI K, ZHANG D C, ZHANG X M, WANG Y, ZHAO Q S, CAI D X, HOOGMOED W B, OENEMA O. Dryland maize yields and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China. *Field Crops Research*, 2011(1): 120, 47-57.
- [17] GUO S L, ZHU H H, DANG T H, WU J S, LIU W Z, HAO M D. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China. *Geoderma*, 2012, 189-190(6): 442-450
- [18] HU Y T, HAO M D, WEI X R, CHEN X, ZHAO J. 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(5): 406-416.
- [19] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 邹娟, 苏伟, 李小坤, 李云春. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3997-4007.
- WANG W N, LU J W, LI Y S, ZOU J, SU W, LI X K, LI Y C. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3997-4007. (in Chinese)
- [20] 毛达如, 申建波. 植物营养研究方法(第 2 版). 北京: 中国农业大学出版社, 2005.
- MAO D R, SHEN J B. *Plant Nutrition Research Method (The Second Edition)*. Beijing: China Agricultural University Press, 2005. (in Chinese)
- [21] 张岁岐, 山仑. 磷素营养对春小麦抗旱性的影响. *应用与环境生物学报*, 1998, 4(2): 115-119.
- ZHANG S Q, SHAN L. The effect of phosphorus nutrition on drought resistance of spring wheat. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 1998, 4(2): 115-119. (in Chinese)
- [22] 占爱. 提高养分、水分吸收的根系形态和生理调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- ZHAN A. Improve nutrient and water uptake by regulating root morphology and physiology[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [23] 杨开静, 王凤新, 宋娜, 马丹, 卢亚静, 郭利君. 滴管条件下不同 N、K 肥施用量对春小麦生长和产量的影响. *中国农学通报*, 2014, 30(12): 187-192.
- YANG K J, WANG F X, SONG N, MA D, LU Y J, GUO L J. Effect of different application rates of N and K fertilizers on the growth and yield of spring wheat under drip irrigation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(12): 187-192. (in Chinese)
- [24] 倪雄伟, 梁新强, 田光明, 黄锦法, 石艳平. 施氮量对稻田旱作期硝酸盐渗漏损失和小麦产量的影响. *浙江农业学报*, 2012, 24(4): 670-675.
- NI X W, LIANG X Q, TIAN G M, HUANG J F, SHI Y P. Effects of different nitrogen fertilizer rates on nitrate leaching characteristics and wheat yield in paddy field in dry period. *Acta Agriculturae*

- Zhejiangensis*, 2012, 24(4): 670-675. (in Chinese)
- [25] 郭战玲, 寇长林, 杨占平, 马政华, 骆晓声, 沈阿林. 潮土区小麦高产与环境友好的磷肥施用量研究. *河南农业科学*, 2015, 44(2): 52-55.
- GUO Z L, KOU C L, YANG Z P, MA Z H, LUO X S, SHEN A L. Phosphate fertilizer application amount for high yield of wheat and environmental safety in Fluvo-aquic soil region. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(2): 52-55. (in Chinese)
- [26] 郝雅璐. 基于长期定位试验的土壤及冬小麦的高光谱响应特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- HAO Y J. High spectral response characteristics of soil and winter wheat under the long-term positioning experiment. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [27] 王旭东. 磷对小麦产量和品质的影响及其生理基础研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- WANG X D. Effect of phosphorus on kernel yield and quality and physiological basis in winter wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [28] 王旭东, 于振文. 施磷对小麦产量和品质的影响. *山东农业科学*, 2003(6): 35-36.
- WANG X D, YU Z W. Effect of phosphorous on wheat yield and quality. *Shandong Agricultural Sciences*, 2003(6): 35-36. (in Chinese)
- [29] 杨胜利, 马玉霞, 冯荣成, 吕海英. 磷肥用量对强筋和弱筋小麦产量及品质的影响. *河南农业科学*, 2004(7): 54-57.
- YANG S L, MA Y X, FENG R C, LÜ H Y. Influence of P application rate on yield and quality of strong gluten and weak gluten wheat. *Henan Agricultural Sciences*, 2004(7): 54-57. (in Chinese)
- [30] 郝明德, 来璐, 王改玲, 党廷辉. 黄土高原塬区旱地长期施肥对小麦产量的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1893-1896.
- HAO M D, LAI L, WANG G L, DANG T H. Effects of long-term fertilization on wheat yield on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1893-1896. (in Chinese)
- [31] 严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用. *云南财贸学院学报*, 2003, 19(3): 78-80.
- YAN L K. Application of correlation coefficient and biased correlation coefficient in related analysis. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, 2003, 19(3): 78-80. (in Chinese)
- [32] MATAR A, TORRENT J, RYAN J. Soil and fertilizer phosphorus and crop response in the dryland Mediterranean zone. *Advances in Soil Science*, 1992, 18: 81-146.
- [33] 梁银丽, 康绍忠. 限量灌水和磷营养对冬小麦产量及水分利用的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997(1): 61-67.
- LIANG Y L, KANG S Z. Effect of irrigating-limited and phosphorus supplied on yield and water use of winter wheat. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997(1): 61-67. (in Chinese)
- [34] 张士功, 刘国栋, 刘更另. 植物营养与作物抗旱性. *植物学通报*, 2001, 18(1): 64-69.
- ZHANG S G, LIU G D, LIU G L. Plant nutrition and drought resistance of crops. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(1): 64-69. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)