

不同降水年型下长期施肥的小麦产量效应

李晓州¹ 郝明德^{1,2*} 赵晶² 王哲² 付威¹ 刘增照¹

(¹西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 合理施用氮磷化肥是提高小麦产量的主要措施之一.用二元二次回归方程探讨不同降水年型下的氮磷优化用量,为黄土旱塬小麦施肥提供依据.结果表明:不同降水年型小麦最高产量所需要的氮磷肥用量不同,平水年小麦最高产量 4229 kg·hm⁻²时的氮用量为 172 kg·hm⁻²、磷用量 164 kg·hm⁻²;丰水年最高产量 4896 kg·hm⁻²时,施氮量较平水年多 2%,为 175 kg·hm⁻²,施磷量较平水年少约 1%,为 162 kg·hm⁻²;干旱年施氮磷量较平水年少约 16%和 5%,当施氮磷量超出这个用量时,小麦产量开始呈下降趋势.不同降水年型最佳经济施肥量不同,平水年最佳经济施氮量为 161 kg·hm⁻²、施磷量为 151 kg·hm⁻²;而干旱年的最佳氮、磷量为 135、143 kg·hm⁻²;丰水年最佳经济氮、磷量分别较平水年多约 3%和 1%,为 167、153 kg·hm⁻².最佳经济氮磷施用量比最高产量氮磷施用量低 6%~8%.实际生产中建议氮磷减少 10%的用量,提高肥料利用率,获得最大经济效益.

关键词 变异系数; 可持续性指数; 不同降水年型; 最佳经济施肥量

Effect of long-term fertilization on wheat yield under different precipitation patterns. LI Xiaozhou¹, HAO Ming-de^{1,2*}, ZHAO Jing², WANG Zhe², FU Wei¹, LIU Zeng-zhao¹ (¹College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Rational application of nitrogen and phosphorus is one of the main pathways to enhance wheat yield. The optimum dosage of nitrogen and phosphorus used in different precipitation patterns was studied using the binary quadratic regression equation, which could provide a basis for fertilization of wheat in Loess Plateau. The results showed that the amount of nitrogen and phosphorus fertilizer required for the maximum yield was dependent on precipitation patterns. The maximum wheat yield in normal years was 4229 kg·hm⁻², with the dosage of nitrogen and phosphorus applied being 172 and 164 kg·hm⁻², respectively. The maximum wheat yield in wet years was 4896 kg·hm⁻², with the dosage of nitrogen fertilizer being 2% more than that in normal years, 175 kg·hm⁻², and the dosage of phosphorus was about 1% less than that in normal years, 162 kg·hm⁻². The application of nitrogen and phosphorus in dry years was about 16% and 5% less than that in normal years. When the dosage was more than that, wheat yield began to decline. The economic optimum fertilization differed in different precipitation patterns. The economic optimum nitrogen and phosphorus fertilization in normal years was 161 and 151 kg·hm⁻², while in dry years it was 135, 143 kg·hm⁻², respectively. The economic optimum fertilization in wet years was about 3% and 1% more than that in normal years, 167 and 153 kg·hm⁻². The economic optimum fertilization was 6%–8% lower than optimum amount of fertilization. In actual production, it was recommended to reduce the amount of nitrogen and phosphorus by 10% in order to improve the utilization rate of fertilizer and get the maximum benefit.

Key words: coefficient of variation; sustainability index; different precipitation pattern years; optimum economic fertilization.

本文由国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-01)、国家重点研发计划项目(2016YFC0503703)和陕西农业科技创新项目(NYKJ-2017-01)资助 This work was supported by the National Science & Technology Support Plan (2015BAD22B01-01), the National Key Research and Development Plan (2016YFC0503703) and the Shanxi Agricultural Science and Technology Innovation Project (NYKJ-2017-01).

2018-03-04 Received, 2018-08-08 Accepted.

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

小麦是世界上栽培最广泛的农作物之一,也是我国主要粮食作物之一.施用化肥是小麦增产的主要措施,小麦的产量变化是对施肥合理性的有效反映.氮磷配施有利于提高冬小麦产量^[1].张永清等^[2]研究表明,在河南郑州不同施肥下种植小麦,氮磷钾和氮磷处理的产量、穗数、穗粒数显著高于不施肥处理和磷钾、氮钾、氮处理.不同氮磷钾肥施用量水平对小麦产量和品质均有显著的调节作用,氮、磷、钾3种营养元素,氮肥的增产效果最为明显.黄土高原地区从20世纪80年代开始大量施用氮肥,推广氮磷肥配合施用,氮磷肥在小麦生产中发挥巨大作用^[3].研究表明,黄土高原地区小麦连作长期单施磷肥,会使土壤中的磷素含量达到较高水平,而土壤中全氮和碱解氮含量却小于不施肥处理,且长期单施磷肥处理小麦产量低于不施肥处理小麦产量^[4].另一方面,过量施肥会降低肥料利用率和引发各种环境问题,如过量施氮会使氮素通过各种途径进入大气、地下水、河流和海洋,从而成为环境污染的来源^[5].刘欢等^[6]研究表明,小麦-玉米周年轮作体系中,适当降低氮肥投入以及氮肥与调控剂的配施可以明显减少氮素表现平衡盈余量.黄土高原地区属于半干旱大陆性气候,也是典型的旱作雨养农业区,该区域水分主要受降水影响.前人研究表明,作物不仅对年降雨量有响应,同时受降雨出现时间影响较大^[7].李广等^[8]用APMSIM模型分析甘肃定西降水对小麦和豌豆产量的影响,结果表明,当年6—7月降水对小麦产量影响最大,其最大贡献率为每增加1 mm降水量,小麦增产10.4 kg·hm⁻².李玉山等^[9]研究表明,黄土高原地区47%的小麦产量受种植时土壤储水量的影响,而此时土壤储水量主要受休闲期降水的影响.黄土高原地区降水年季分布不均,小麦产量随降水量波动,探明小麦在不同降水年型下不同氮磷施用量的产量变化,对节约化肥资源和农业可持续性发展具有重要意义^[10].

本研究通过分析长期定位施肥小麦的产量效应、稳定性,比较不同降水年型下不同氮磷用量的小麦产量变化,获得小麦最高产量对应的氮磷施用量

以及最佳经济施肥量,为化肥的合理施用和小麦高产高效提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

1984年在位于黄土高原南部陕西省长武县十里铺村旱地上开始进行长期施肥定位试验,试验地海拔1200 m,年均气温9.1℃,无霜期171 d;年平均降水578.5 mm,年季间分布不均,7—9月降水占全年降水的54%.土壤为黄盖黏黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性好,肥力中等^[11].1984年试验开始时耕层土壤有机质10.5 mg·kg⁻¹,全氮0.77 mg·kg⁻¹,碱解氮37.0 mg·kg⁻¹,全磷0.66 mg·kg⁻¹,有效磷2.2 mg·kg⁻¹,速效钾123.9 mg·kg⁻¹,pH 8.3,试验地在同类地区中有典型代表性^[12].

1.2 田间试验设计

本试验选取小麦17个长期肥料定位试验处理(表1),氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,肥料于作物播种前撒施于地表,翻入土中^[13].供试小麦品种1984、1985年为‘秦麦4号’,1986—1995年为‘长武131’,1996年以后为‘长武134’^[14].播种期为9月中、下旬,翌年6月中、下旬收获,田间管理同大田.

1.3 数据处理与来源

1.3.1 降水 为了便于分析,采用小麦生育年(即休闲期(7—9月)+生育年(10月—翌年6月))概念.将31个试验年份降水量划分为干旱年、平水年、丰水年3种年型.降水年型的划分计算公式为^[15]:

$$DI = (P_{An} - M_1) / \sigma \quad (1)$$

式中:DI表示干旱指数; P_{An} 表示生育年降水量(mm); M_1 表示1985—2015年生育年平均降水量(mm). $DI > 0.35$ 为丰水年, $-0.35 < DI < 0.35$ 为平水年, $DI < -0.35$ 为干旱年.

根据降水量可以将年型划分为:干旱年11年,分别是1987、1992、1995、1996、2001、2003、2005、2006、2007、2009、2013年;平水年10年,分别是

表1 不同处理氮磷肥配比

Table 1 Ratio of fertilizers in different treatments

| 编号 Code | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 处理 Treatment | N ₀ P ₀ | N ₀ P ₂ | N ₀ P ₄ | N ₁ P ₁ | N ₁ P ₂ | N ₁ P ₃ | N ₂ P ₀ | N ₂ P ₁ | N ₂ P ₂ | N ₂ P ₃ | N ₂ P ₄ | N ₃ P ₁ | N ₃ P ₂ | N ₃ P ₃ | N ₄ P ₀ | N ₄ P ₂ | N ₄ P ₄ |
| N (kg·hm ⁻²) | 0 | 0 | 0 | 45 | 45 | 45 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 135 | 135 | 135 | 180 | 180 | 180 |
| P (kg·hm ⁻²) | 0 | 90 | 180 | 45 | 90 | 135 | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 | 45 | 90 | 135 | 0 | 90 | 180 |

P: P₂O₅.

1986、1988、1990、1993、1994、1997、1998、1999、2000、2010 年; 丰水年 10 年, 分别是 1985、1989、1991、2002、2004、2008、2011、2012、2014、2015 年。

1.3.2 产量 根据划分的降水年型将所在年份的产量分类平均, 得出干旱年、平水年、丰水年的平均小麦产量(表 2), 本文以此不同降水年型的平均产量和不同处理的施肥量来分析小麦产量与氮磷用量之间的关系。

小麦产量稳定性以统计学上的变异系数(coefficient of variation, CV)表示, 可衡量同一品种作物不同年份平均产量间的变异程度, CV 越大, 产量稳定性越低^[16]。计算公式为:

$$CV = \sigma / \bar{Y} \quad (2)$$

式中: σ 为标准差 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); \bar{Y} 为小麦平均产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

小麦产量可持续性采用可持续产量指数(sustainable yield index, SYI)分析, 指数越高, 该系统的稳定性和可持续性越好。计算公式为:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma) / Y_{\max} \quad (3)$$

式中: Y_{\max} 为所有年份中产量的最大值 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 数据来源 气象数据来源于长武县气象站, 小麦产量数据来源于长武生态站。

1.4 数据处理

采用 Matlab 2012 和 Excel 2003 软件对数据进行统计分析。采用二元二次回归方程拟合数据, 利用

偏导数求极值进行分析和比较, 用 Matlab 中的 Curve fitting 和 Excel 2003 软件作图。氮磷肥效应函数为:

$$\gamma = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_1^2 + b_3 x_2 + b_4 x_2^2 + b_5 x_1 x_2 \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 小麦产量及其变异系数和可持续性指数

2.1.1 小麦产量变化 长期不施肥的小麦产量低且变幅较小, 单施磷肥小麦产量略有下降, 年增产率达 -0.4%; 单施氮肥小麦产量稍有增长, 单施氮肥达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 年增产率仅达 0.5%。氮磷配施的小麦增产幅度较单施一种肥料的增产幅度大, 最大年增产率可达 1%, 表明氮磷肥配施对小麦产量有一定的影响。在相同施肥情况下, 干旱年小麦产量显著低于平水年和丰水年, 平水年小麦产量接近丰水年(表 2)。当氮磷施用量达到最大 ($\text{N } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 下同) 时, 丰水年小麦产量是平水年的 1.2 倍, 是干旱年的 1.4 倍, 丰水年氮磷配施对小麦的增产效果更显著。随着氮磷配施比例的升高, 小麦年增产率也呈上升趋势, 说明氮磷配施效果具有一定的累积作用。

2.1.2 小麦产量的变异系数 长期定位试验条件下作物产量变化主要来源于施肥、气候和两者的交互作用, 而施肥和气候变化引起的变异基本上是稳定的, 变异来源主要为交互作用, 交互作用的大小是决

表 2 小麦产量及其变异系数和可持续性指数

Table 2 Wheat yield and its variation coefficients and sustainable indexes

| 处理 Treat- ment | 干旱年 Dry year | | | 平水年 Normal year | | | 丰水年 Wet year | | |
|-------------------------------|---|-----------|------------|---|-----------|------------|---|-----------|------------|
| | 产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) | CV (%) | SYI (%) | 产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) | CV (%) | SYI (%) | 产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) | CV (%) | SYI (%) |
| N ₀ P ₀ | 1148 | 33.6 | 44.8 | 1335 | 59.5 | 15.1 | 1478 | 39.0 | 35.0 |
| N ₀ P ₂ | 1019 | 34.3 | 42.8 | 1371 | 65.3 | 12.5 | 1348 | 35.6 | 45.6 |
| N ₀ P ₄ | 1023 | 37.7 | 39.5 | 1290 | 65.6 | 12.0 | 1370 | 41.7 | 35.6 |
| N ₁ P ₁ | 2237 | 30.3 | 39.8 | 2549 | 24.3 | 49.6 | 2695 | 33.7 | 45.0 |
| N ₁ P ₂ | 2362 | 25.2 | 49.7 | 2837 | 27.6 | 42.6 | 2734 | 31.1 | 45.6 |
| N ₁ P ₃ | 2480 | 33.6 | 38.7 | 2655 | 31.8 | 39.3 | 3041 | 34.5 | 42.7 |
| N ₂ P ₀ | 1892 | 43.3 | 37.3 | 2489 | 33.5 | 37.4 | 2529 | 40.8 | 30.5 |
| N ₂ P ₁ | 2870 | 33.7 | 42.0 | 3287 | 24.8 | 52.5 | 3902 | 40.2 | 32.0 |
| N ₂ P ₂ | 3033 | 33.1 | 40.6 | 3465 | 23.1 | 55.2 | 3816 | 41.4 | 33.7 |
| N ₂ P ₃ | 3173 | 30.2 | 49.0 | 3572 | 21.9 | 56.9 | 3934 | 38.7 | 38.9 |
| N ₂ P ₄ | 3100 | 29.0 | 51.5 | 3620 | 24.3 | 51.7 | 3957 | 41.9 | 34.9 |
| N ₃ P ₁ | 3093 | 40.3 | 33.9 | 3517 | 23.9 | 52.4 | 4276 | 34.7 | 37.2 |
| N ₃ P ₂ | 3217 | 40.0 | 35.0 | 3869 | 26.1 | 49.0 | 4314 | 36.2 | 36.7 |
| N ₃ P ₃ | 3194 | 39.3 | 37.1 | 3889 | 25.2 | 47.9 | 4502 | 37.9 | 35.7 |
| N ₄ P ₀ | 1687 | 39.2 | 34.5 | 2788 | 40.3 | 34.3 | 2677 | 28.8 | 48.9 |
| N ₄ P ₂ | 3098 | 40.4 | 34.6 | 3991 | 26.8 | 49.7 | 4620 | 36.3 | 36.4 |
| N ₄ P ₄ | 3488 | 42.0 | 33.8 | 4243 | 24.9 | 52.6 | 4941 | 33.2 | 41.9 |

CV: 变异系数 Variation coefficient; SYI: 可持续性指数 Sustainable index.

定产量稳定的主要因素^[17].干旱年的 CV 值随施磷量的增加逐渐增大,而丰水年和平水年的 CV 值逐渐变小(表 2).平水年的 CV 值主要根据不同氮磷用量而有所变化,单施磷肥的 CV 值是不施肥的 1.1 倍;单施氮肥的 CV 值有所降低,但仍比氮磷最大施用量高 1.4~1.6 倍,单施氮肥的小麦产量稳定性也不会显著提高,丰水年的 CV 值是平水年 CV 值的 1.3 倍,证明氮磷合理配施才能保持农田生产力的稳定性.

2.1.3 小麦产量的可持续性指数 产量可持续性指数是测定系统是否能持续的一个可靠参数^[18],SYI 值越大表示系统的可持续性越高.干旱年的 SYI 值随氮磷配比的升高而逐渐变低,在氮磷最大施用量时的 SYI 值是不施肥的 0.8 倍(表 2),小麦在干旱年持续增产效率低;而丰水年和平水年的 SYI 值逐渐增大,平水年最大氮磷配比的 SYI 值是不施肥的 3.5 倍,丰水年最大氮磷用量的 SYI 值是不施肥的 1.2 倍;丰水年氮磷最大施用量的 SYI 值是平水年的 1.3 倍,平水年的 SYI 值是干旱年的 1.6 倍.丰水年最大氮磷施用量的 SYI 值显著大于其他用量的 SYI 值,表明充足的水分有助于小麦对氮磷肥的吸收和利用,对小麦的持续增产具有积极作用.

2.2 肥料用量与小麦产量的关系

2.2.1 拟合方法 本研究采用二元二次多项式回归分析拟合的方法,具体阐述氮磷肥用量与小麦产量的关系.由已知数据(31 年小麦产量数据)得到散点图,确定拟合多项式的次数 n (本文为二次),通过小麦产量数据可求得:干旱年小麦(11 年)平均产量二元二次回归方程: $\gamma = 501.4998 + 27.9481x_1 + 13.0066x_2 - 0.1162x_1^2 + 0.0361x_1x_2 - 0.0586x_2^2$;平水年小麦(10 年)平均产量二元二次回归方程: $\gamma = 897.8843 + 27.9296x_1 + 11.2411x_2 - 0.0968x_1^2 + 0.0328x_1x_2 - 0.0512x_2^2$;丰水年小麦(10 年)平均产量二元二次回归方程: $\gamma = 617.3460 + 33.4694x_1 + 16.4170x_2 - 0.1151x_1^2 + 0.0430x_1x_2 - 0.0736x_2^2$.

2.2.2 残差检验方程 残差是指实际观察值与回归估计值的差,残差分析就是通过残差所提供的信息,分析出数据的可靠性、周期性或其他干扰,说明一个模型拟合的优劣程度.本研究数据的残差离零点均较近,且残差的置信区间均包含零点,这说明回归模型能较好地符合原始数据,所以可以用此拟合模型较好地说明最佳施氮磷配比的范围,并以此来预测氮磷配比的未来走势(图 1).

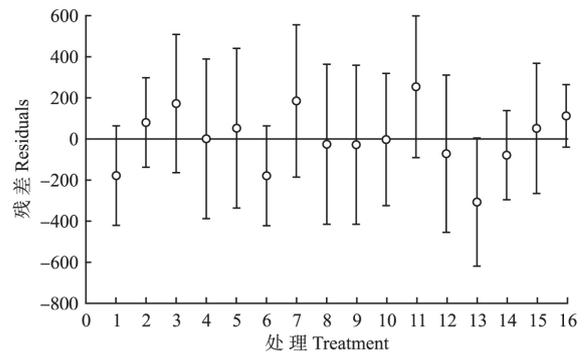


图 1 残差分析

Fig.1 Residual analysis.

不包含不施肥 (N_0P_0) 处理 Non fertilization treatment (N_0P_0) was not included.

2.2.3 不同降水年型下长期施肥对小麦产量的影响

根据拟合方程使用 Matlab 绘制出干旱年、平水年和丰水年的小麦产量图(图 2).在不同降水年型下的小麦产量随着氮磷肥的梯度变化而变化,而且变化趋势明显不同.在干旱年,固定施用磷肥为 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 随着氮肥施用量的增加小麦产量呈现低-高-低的变化趋势,施氮量在 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量达到最大,为 $2182 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;固定施磷量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着氮肥施用量的增加小麦产量呈现低-高-较低的增长趋势,施氮量在 $148 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量达到最大,为 $3496 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;固定施氮量为 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着磷肥施用量的增加小麦产量呈略有上升-略有降低的趋势,这种趋势并不明显;固定施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着磷肥施用量的增加小麦产量呈现低-高-低的增长趋势,施磷量在 $166 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量达到最大,为 $3390 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;随着氮磷两种肥料的配施,小麦产量开始发生明显的变化,表明氮磷配施增产效果显著^[19-21].

相比于干旱年,丰水年的变化趋势更明显.固定施磷量为 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 随着氮肥施用量的增加小麦产量呈现低-高-较低的变化趋势,当施氮量在 $145 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量达到最大,为 $3050 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;固定施磷量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着氮肥施用量的增加小麦产量呈现低-高的增长趋势,当施氮量为 $179 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时小麦产量达到最大,为 $4876 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;当固定施氮量为 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着磷肥施用量的增加小麦产量呈略有上升-趋于平缓的趋势,这种趋势并不明显;当固定施氮量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,随着磷肥施用量的增加小麦产量呈现低-高的增长趋势,且增长幅度大于干旱年和平水年.平水年型下小麦产量的变化则在干旱年和丰水年之间,变化相对稳定.

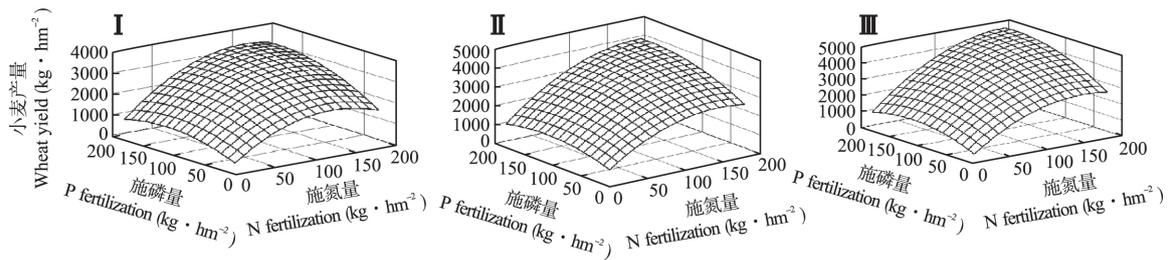


图 2 不同年型下小麦产量的变化

Fig.2 Changes of wheat yield in different precipitation patterns.

I: 干旱年 Dry year; II: 平水年 Normal year; III: 丰水年 Wet year. 下同 The same below.

2.2.4 不同降水年型下小麦产量预测 不同降水年型都有小麦最大产量以及最大产量对应的氮磷施用量。根据所得数学模型对不同施肥参数求偏导数,由 Matlab 分析的结果见表 3。在干旱年,施氮、磷量为 144、155 kg · hm⁻²时,最大产量为 3530 kg · hm⁻²;在平水年,施氮、磷量为 172、164 kg · hm⁻²时,最大产量为 4229 kg · hm⁻²;丰水年的施肥量与平水年接近,其中最佳氮肥施用量为 175 kg · hm⁻²,是干旱年的 1.2 倍;最佳磷肥施用量为 162 kg · hm⁻²,是干旱年的 1.1 倍;最大产量为 4896 kg · hm⁻²,是干旱年不施肥处理下产量的 4.3 倍,说明水分对小麦吸收氮磷肥的影响效果显著。与平水年相比,干旱年施氮量减少 16%,施磷量减少 5%;而丰水年施氮量增加 2%,施磷量减少 1%。黄土高原降水量少,且多地无灌溉条件,属于典型的雨养农业^[22]。丰水年的增产作用主要来自降雨,故增加肥料用量的作用有限,当氮、磷用量超过这个限度时,小麦产量开始呈现下降趋势,需要在干旱年时减少氮、磷肥用量,分别可减少 16%和 5%;干旱年、平水年和丰水年优化施肥与不施肥相比,小麦增产幅度分别达到 207.3%、216.7%、231.3%。

2.2.5 最佳经济施肥量 边际利润是指施肥利润随单位肥料成本的增加而增加的值,公式为: $W = \Delta y \cdot P_y - Z$,其中: W 为施肥利润; Z 为肥料总成本; Δy 为增产量; P_y 为小麦价格。利润率是投入单位量成本

获得的平均利润,表示为 $\left(\frac{W}{Z}\right) = \frac{\Delta y \cdot P_y}{Z} - 1$,而边际利润是施肥利润(W)对肥料总成本(Z)的一阶导数: $\frac{dW}{dZ} = \frac{d(\Delta y \cdot P_y)}{dZ} - 1 = P_y \cdot \frac{d(\Delta y)}{dx} \cdot \frac{dx}{dZ} - 1$ 其中 $\frac{dW}{dZ}$ 为边际利润,用 R 表示^[23]。

由边际利润值 R 确定经济合理施肥量,可得方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{P_{x_1}}{P_y} (R+1) \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = \frac{P_{x_2}}{P_y} (R+1) \end{cases}$$

解得:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{(R+1)(2b_4P_{x_1} - b_3P_{x_2}) + dP_y}{EP_y} \\ x_2 = \frac{(R+1)(2b_2P_{x_2} - b_3P_{x_1}) + d^*P_y}{EP_y} \end{cases}$$

其中: $d = b_3b_5 - 2b_1b_4$; $d^* = b_1b_5 - 2b_2b_3$; $E = 4b_2b_4 - b_5^2$; P_{x_1} 、 P_{x_2} 、 P_y 分别表示氮肥、磷肥和小麦产量单位价格(yuan · kg⁻¹)^[24]。

分别取小麦价格 $P_y = 2.4$ 元,氮肥 $P_{x_1} = 3.8$ 元,磷肥 $P_{x_2} = 2.5$ 元,3 种不同降水年型的二元肥料方程:

表 3 小麦最佳施肥量与经济最佳施肥量

Table 3 Optimum amount of fertilization and economic optimum fertilization

| 降雨年型 Precipitation pattern | 最佳产量 Optimum yield | | | 经济最佳产量 Optimum sustainable yield | | |
|-------------------------------|---|--|--|---|--|--|
| | 产量 Yield (kg · hm ⁻²) | 施 N 量 N fertilization (kg · hm ⁻²) | 施 P 量 P fertilization (kg · hm ⁻²) | 产量 Yield (kg · hm ⁻²) | 施 N 量 N fertilization (kg · hm ⁻²) | 施 P 量 P fertilization (kg · hm ⁻²) |
| 干旱年 Dry year | 3530 | 144 | 155 | 3517 | 135 | 143 |
| 平水年 Normal year | 4229 | 172 | 164 | 4214 | 161 | 151 |
| 丰水年 Wet year | 4896 | 175 | 162 | 4884 | 167 | 153 |

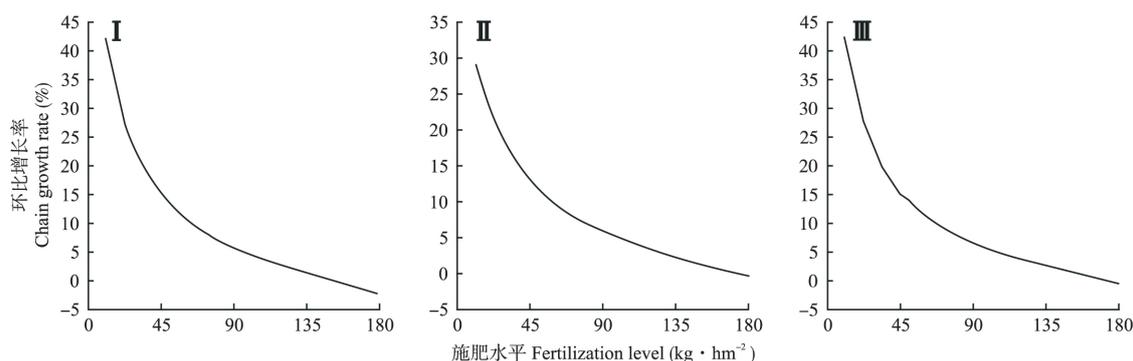


图3 小麦产量环比增长率

Fig.3 Chain growth rate of wheat yield.

氮磷肥梯度相同,均为 $11.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 一个梯度 The gradient of nitrogen and phosphate fertilizer was the same, both were $11.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ per gradient.

$$\text{干旱年: } \begin{cases} x_1 = 135.7171 - 8.5989R \\ x_2 = 143.7778 - 11.5292R \end{cases}$$

$$\text{平水年: } \begin{cases} x_1 = 161.7383 - 10.4700R \\ x_2 = 151.4106 - 13.5262R \end{cases}$$

$$\text{丰水年: } \begin{cases} x_1 = 167.1462 - 8.6732R \\ x_2 = 153.2787 - 9.6102R \end{cases}$$

边际利润为零时利润最高,所以当 R 取零时可获得各个不同降水年型的最佳经济施肥量(表3),干旱年最佳经济施肥量为氮肥 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥 $143 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦产量为 $3517 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;平水年最佳经济施肥量为氮肥 $161 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥 $151 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦产量为 $4214 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;丰水年最佳经济施肥量为氮肥 $167 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥 $153 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦产量为 $4884 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.不同降水年型下最佳经济氮、磷施用量比最高产量下的氮、磷施用量低 $6\% \sim 8\%$,为获取更大的经济效益,最佳经济施肥量更符合生产实际,但由于无法预知降水年型,故在生产实践中建议整体减少 10% 左右的氮、磷用量,减少肥料残留,增加肥料利用率,保护生态环境.

2.3 小麦产量环比增长率

环比就是针对所要分析的对象所得出的本期数据与上一期数据的比较,两者之间的比较通常用百分比来表示,即环比增长率.环比增长率就等于本次所得的数据与上次数据之间的差额与上次数据的比值,再乘以百分之百后得出的数据,其公式为:环比增长率 = (本次数据 - 上次数据) / 上次数据 $\times 100\%$.在不同降水年型下,不同的氮磷施肥范围对小麦增产效果不同,可以用环比增长率来预测未来小麦产量增加空间的走向.现将最大施氮量 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 平均分为 16 个梯度,将最大施磷量 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 平均分为 16 个梯度,通过拟合模型求出

相应年型下的小麦产量.用 Excel 做出小麦产量环比增长率的变化图(图3),其中横坐标代表 16 个施肥梯度,纵坐标代表小麦产量的环比增长率,以此来说明不同降水年型下小麦产量的变化趋势.

干旱年的小麦产量随氮磷梯度的增加,在第 13~14 梯度之间开始呈现负增长趋势(图3),说明在干旱年氮肥在 $137 \sim 148 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥在 $137 \sim 148 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的范围内,小麦增产率比之前开始减弱,再加大氮、磷用量对小麦增产已无明显效果;平水年和丰水年在第 15~16 梯度,即施氮量 $158 \sim 169 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施磷量 $158 \sim 169 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的范围内小麦产量环比增长率开始负增长,此时已经达到小麦最大产量.表明不同降水年型对小麦产量的环比增长率影响不同,干旱年的环比增长率下降最快,平水年的环比增长率下降相对较慢,丰水年的环比增长率下降最慢.干旱年最大小麦产量所需要的氮、磷用量在环比增长率开始出现负增长的梯度范围内,而在平水年和丰水年所需要的施氮量比对应的梯度范围大.干旱年小麦最佳经济产量所需要的施氮量比对应的环比增长率开始出现负增长的梯度范围小,而平水年和丰水年小麦最佳经济产量所需要的施磷量比对应的环比增长率开始出现负增长的梯度范围小.

3 讨论

李玉山^[25]研究结果表明,尽管由于高肥农田存在水肥耦合效应,作物有较高水分利用效率,在湿润和干旱各类水文年份中,其产量均高于低产田,但只有在平水年和丰水年,高产田大幅度的增产效应才能充分表现出来.本研究在相同氮、磷用量下,平水年和丰水年小麦产量显著高于干旱年,尤以丰水年增产效果最显著,其增产值可达到 $3463 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,

明确了同一区域不同降水年型的最佳氮、磷肥用量,为在不同降水年型小麦持续增收、肥料的合理利用提供了依据。张铭等^[26]研究发现,在较低肥力水平下,随着施氮量的增加,氮肥利用率呈先升后降趋势。赵俊晔等^[27]研究也表明,适当施肥可以显著促进小麦植株氮素积累量,提高籽粒产量和蛋白质含量。施肥具有增产效应,但在土壤肥力高的条件下,适当降低氮肥施用量,特别是基肥氮的用量有利于提高氮肥利用率,减少氮素损失。詹其厚等^[28]研究表明,施氮量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时小麦产量达到 $6080 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但是继续增加氮肥用量,产量不升反降。本试验中小麦产量的环比增长率随着氮、磷肥的施加呈平缓趋势,甚至为负增长状态,与上述研究结果一致。进一步探究不同降水年型小麦由增产到减产的氮、磷用量范围,并通过偏导求极值获得不同降水年型下小麦最佳产量的肥料施用量,在平水年氮、磷肥用量达 $172.164 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量达到最大值,而干旱年氮、磷肥用量仅 $144.155 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时小麦产量达到最大,再增施肥料,小麦产量开始呈现下降趋势。

4 结 论

与不施肥处理相比,单施氮肥和磷肥都不同程度地降低了小麦产量的稳定性和可持续性,氮磷配施下的 CV 值最小,SYI 值最大,大田生产系统更稳定。不同降水年型小麦高产所需氮、磷用量不同,以丰水年氮磷配施的增产效果最显著,氮、磷用量分别为 $175.162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大产量 $4896 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比不施肥增产 $3418 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅 231.3%;平水年和干旱年次之,较不施肥分别增加 207.3%、216.7%,而干旱年达到最大产量时的氮、磷用量仅为 $144.155 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在小麦产量达到最大值后继续增施氮、磷肥,小麦产量呈现下降趋势,干旱年小麦的环比增长率甚至达到负值,而丰水年的环比增长率趋近于 0,说明水分充裕的条件下氮、磷肥的增产效应也有一定限度。干旱年最大经济产量为 $3517 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮、磷肥施用量分别为 $135.143 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平水年施用量分别为 $161.151 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,丰水年与干旱年相近,分别为 $167.153 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同降水年型下经济最佳施肥量比最高产量的施肥量低 6%~8%。为兼顾经济效益与环境安全,建议在生产实践中整体减少氮、磷肥 10% 的用量。

参考文献

[1] Zhao H-B (赵海波), Lin Q (林琪), Liu Y-G (刘

义国), *et al.* Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on diurnal variation of photosynthesis at grain-filling stage and grain yield of super high-yielding wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2545-2500 (in Chinese)

- [2] Zhang Y-Q (张永清), Huang S-M (黄绍敏), Guo D-D (郭斗斗), *et al.* Effects of long-term fertilization on grain yields and component factors. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农业通报), 2010, **26**(4): 166-169 (in Chinese)
- [3] Hao M-D (郝明德), Fan J (樊军). Effects of location applying fertilizer on grain yield of wheat and NO_3^- -N accumulation in soil profile in dry land of Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2002, **39**(Suppl.): 295-299 (in Chinese)
- [4] Chen L (陈磊), Hao M-D (郝明德), Zhang S-M (张少民), *et al.* Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(2): 230-235 (in Chinese)
- [5] Cai GX, Chen DL, Ding H, *et al.* Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**: 187-195
- [6] Liu H (刘欢), Chen M-M (陈苗苗), Sun Z-M (孙志梅), *et al.* Effects of different management practice on crop yield, N utilization and N apparent balance in wheat/maize rotation system. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2016, **31**(1): 232-238 (in Chinese)
- [7] Miranda JD, Armas C, Padilla FM, *et al.* Climatic change and rainfall patterns: Effects on semi-arid plant communities of the Iberian Southeast. *Journal of Arid Environments*, 2011, **75**: 1302-1309
- [8] Li G (李广), Huang G-B (黄高宝). Determination of the effect of precipitation distribution on yield of wheat and pea in dryland using APSIM. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, **18**(2): 342-347 (in Chinese)
- [9] Li Y-S (李玉山), Su S-M (苏陕民). Comprehensive Study on the Efficient Eco-economic System of Wangdonggou, Changwu. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991 (in Chinese)
- [10] Jin S-B (金善宝). China Wheat Science. Beijing: China Agriculture Press, 1996 (in Chinese)
- [11] Hao M-D (郝明德), Wang X-G (王旭刚), Dang T-H (党廷辉), *et al.* Analysis of long-term fertilization effect on yield of wheat in dry-land on Loess Plateau. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2004, **30**(11): 1108-1112 (in Chinese)
- [12] Zhao Y-Y (赵云英), Xie Y-S (谢永生), Hao M-D (郝明德). Effect of fertilization on fertility and nitrate accumulation of black loessial soil of dry land in Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(6): 1273-1279 (in Chinese)

- [13] Wei X-R (魏孝荣), Hao M-D (郝明德), Zhang C-X (张春霞). Zinc fractions and availability in the soil of the Loess Plateau after long-term continuous application of zinc fertilizer. *Acta Agronomica Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(7): 1386-1393 (in Chinese)
- [14] Wei X-R (魏孝荣), Hao M-D (郝明德). Distribution of nutrient elements in soil-crop system after long-term application of zinc fertilizer. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2003, **23**(8): 1438-1441 (in Chinese)
- [15] Li S-X (李生秀), Wang C-H (王朝辉), Malhi SS, et al. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dry land areas of China. *Advances in Agronomy*, 2009, **102**: 223-265
- [16] Mao S-S (毛思帅), Zhou J-H (周吉红), Meng F-Y (孟范玉), et al. Effect of different amount of phosphorus on yield of wheat in the suburb of Beijing. *Crops* (作物杂志), 2014(4): 88-90 (in Chinese)
- [17] Zhang C (张成), Meng J-J (孟建军). Analysis on high and stable yield ability of dry-land winter wheat in east Gansu. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2005, **23**(4): 118-121 (in Chinese)
- [18] Sun B-H (孙本华), Sun R (孙瑞), Guo Y (郭芸), et al. Evaluation on the sustainability of cropland under different long-term fertilization in Eum-Orthic Anthrosols area. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(6): 1403-1412 (in Chinese)
- [19] Zhang HM, Wang BR, Xu MG, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in southern China. *Pedosphere*, 2009, **19**: 199-207
- [20] Cai ZC, Qin SW. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Geoderma*, 2006, **136**: 708-715
- [21] Hao MD, Fan J, Wang QJ, et al. Wheat grain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2007, **17**: 257-264
- [22] Cao H-B (曹寒冰). Tailoring Fertilizer Application to Precipitation and Yield for Dryland Wheat in the Loess Plateau. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2017 (in Chinese)
- [23] Guan N (关宁). Function Model of Multi-fertilization Effect Research. Master Thesis. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [24] Zhang Y-F (张玉峰), Bai Z-M (白志明), Zhou N-J (周乃健). Studies on the determination of marginal profit rate in rational application of fertilizer. *Systems Engineering—Theory and Practice* (系统工程理论与实践), 1997, **17**(10): 50-59 (in Chinese)
- [25] Li Y-S (李玉山). Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2001, **38**(3): 353-356 (in Chinese)
- [26] Zhang M (张铭), Jiang D (蒋达), Miao R-L (缪瑞林). Effects of N application rate on nitrogen absorption, utilization and yield of wheat under different soil fertility after rice. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2010, **30**(1): 135-140 (in Chinese)
- [27] Zhao J-Y (赵俊晔), Yu Z-W (于振文). Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(3): 815-822 (in Chinese)
- [28] Zhan Q-H (詹其厚), Zhang X-P (张效朴), Wang Z-X (王泽新), et al. Effect of N-fertilizer on wheat yield and quality and its efficiency. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2003, **31**(4): 544-545 (in Chinese)

作者简介 李晓州,男,1992年生,硕士研究生.主要从事农田生产力研究. E-mail: 804637446@qq.com

责任编辑 张凤丽

李晓州,郝明德,赵晶,等.不同降水年型下长期施肥的小麦产量效应.应用生态学报,2018,29(10):3237-3244

Li X-Z, Hao M-D, Zhao J, et al. Effect of long-term fertilization on wheat yield under different precipitation patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(10): 3237-3244 (in Chinese)