

黄土高原沟壑区旱地施肥水平对 小麦产量影响的趋势面分析

魏艳宏, 袁志发, 郭满才

(西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在陕西省长武县长期定位试验的基础上,研究了黄土高原沟壑区常态降水条件下旱地氮磷不同配比施肥对小麦产量的影响。利用趋势面分析,建立了黄土高原沟壑区旱地小麦产量的趋势面模型,找出该地区得到小麦产量较高的施肥配比,以及产量最大值时施肥配比。结果发现,施氮量 178.169 kg/hm²,施磷量 198.405 kg/hm² 时小麦产量取得最大值(6 152.6 kg/hm²)。可利用所得趋势面模型对常态年不同氮磷配比的小麦产量做出预测,为农业生产提供理论依据。

关键词: 黄土高原旱地; 施肥; 趋势面分析; 小麦产量

文献标识码:

文章编号: 1000-288X(2014)01-0203-04

中图分类号: S512.1

Trend Surface Analysis of Effects of Fertilization Level on Dry-land Wheat Yield in Gully Regions of Loess Plateau

WEI Yan-hong, YUAN Zhi-fa, GUO Man-cai

(College of Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Effects of different fertilization proportions of N and P on dry-land wheat yield in gully region of the Loess Plateau in the condition of normal rainfall were studied based on the long-term experiment in Changwu, Shaanxi Province. A trend surface model of dry-land wheat yield in the gully regions was constructed using trend surface analysis. Fertilization proportions for higher wheat yield were found and the fertilization proportions for the highest yield were N=178.169 kg/hm² and P=198.405 kg/hm². The maximum wheat yield was 6 152.6 kg/hm². Wheat yield with different N and P proportions in the condition of normal rainfall can be predicted by the trend surface model, which provides a theoretical basis for the actual agricultural production.

Keywords: dry-land on the Loess Plateau; fertilizer application; trend surface analysis; wheat yield

黄土高原是中国传统的旱作农业区,该地区降水量小,水土流失严重,土壤肥力低下,作物产量低。20世纪 80 年代,李玉山等^[1]研究表明,限制作物产量的主要因素是肥,合理施肥是增产的主要措施,但大量使用化肥不但会造成资源浪费而且会对土壤环境质量带来一定的危害。为此,基于长期定位试验,开展了在不同施肥条件下小麦产量变化的研究。

由于受空间及经费等因素的影响,长期定位试验设计往往为部分实施,因而只能获得不完全数据,这类数据的处理,常采用填补的方法进行^[2-4]。不完全数据自由度比完全数据少,而利用填补使误差平方和增加,导致均方误差变大,使分析结果不可靠,这种方

法不但没有充分提取信息,反而带来较大的误差。明道绪等^[5]针对非平衡资料提出利用最小二乘分析法估计各参数,进行方差分析和多重比较。

陕西省长武县长期定位试验数据形式为米字型,为非平衡资料,未实施的处理较多,但对应的设计矩阵经约束条件缩减后仍不满秩^[6],不能进行相应的参数估计,因此,该方法无法分析米字型数据。而农业科研中,目标往往受多因素制约,随着施肥量的增加,小麦产量不是线性增加,施肥量超过一定水平后,产量会逐渐减少。针对此类情况,本文利用趋势面分析,对试验数据进行深一步分析,找出小麦产量较高的区域,为农业生产提供理论依据。

收稿日期:2013-02-16

修回日期:2013-04-16

资助项目:中央高校基本科研业务费专项资金“应用统计分析方法研究”(QN2010101)

作者简介:魏艳宏(1987—),女(汉族),陕西省临潼区人,硕士研究生,主要从事生物数学方面的研究。E-mail:weiyanhongff@gmail.com。

通信作者:郭满才(1963—),男(汉族),陕西省宝鸡市人,教授,硕士生导师,主要从事生物数学研究。E-mail:guomc@nwsuaf.edu.cn。

1 试验地概况

研究区位于陕西省长武县十里铺村塬地上,海拔 1 220 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温 9.1 ℃,平均降水 578.5 mm,季节性分布不均匀,7—9 月降水较多,农业用水全部依靠天然降水,是旱作农业区。为了便于分析,采用“生产年”(休闲期+生育期,即小麦收获后休闲期(7—9 月)和生育期(10—翌年 6 月)划分不同降水年型,与该地区多年平均降水 578.5 mm 相比,以降水量增减 10% 以内为常态年,降水量减少 10% 以上为干旱年,降水量增加 10% 以上为丰水年。郝明德等^[7-11]的研究表明,土壤水分对小麦产量有一定的影响,黄土高原地区不同肥力在不同的降水年型的增产机率 and 作用大小不尽相同。本文以常态年 1999 年为例进行研究,该年降水量为 574.4 mm,小麦生长期降水量为 246.6 mm,休闲期降水量为 327.8 mm。

试验设 N, P 两个因子,每个因子分别设 0, 45, 90, 135 和 180 kg/hm² 这 5 个水平,整个试验为不完全设计,共 17 个处理,分别为 N₀P₀, N₀P₉₀, N₀P₉₀, N₄₅P₄₅, N₄₅P₉₀, N₄₅P₁₃₅, N₉₀P₀, N₉₀P₄₅, N₉₀P₉₀, N₉₀P₁₃₅, N₉₀P₁₈₀, N₁₃₅P₄₅, N₁₃₅P₉₀, N₁₃₅P₁₃₅, N₁₈₀P₀, N₁₈₀P₉₀ 和 N₁₈₀P₁₈₀。

试验小区面积为 22.2 m², 3 次重复,供试 N 肥是尿素(含 N 46%),磷肥是普通过磷酸钙(含 P₂O₅ 17%),供试小麦品种为长武 134,播种期为 9 月中、下旬,收获期为来年 6 月中、下旬,肥料在播前撒施并深翻入土中。小麦播种量为 225 kg/hm², 9 月下旬播种,翌年 6 月下旬收获,小麦田间管理与大田小麦相同。

2 分析方法

2.1 趋势面模型

由于任何函数在适当的范围内都可以用多项式来逼近^[12-14],可通过调整多项式次数,使回归方程更适合实际问题,因此选取多项式进行趋势面分析。设小麦产量为 $z_i(x_i, y_i)$,趋势面拟合值为 $\hat{z}_i(x_i, y_i)$,则有 $z_i(x_i, y_i) = \hat{z}_i(x_i, y_i) + \epsilon_i$,其中 ϵ_i 为残差值。建立的 p 次趋势面模型为:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_ky^p$$

式中: $k = p(p+3)/2$ 。

2.2 参数估计

利用回归分析的方法估计参数,使观测值与趋势值之差的平方和最小,为了表述方便,令 $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = x^2, x_4 = xy, \dots$,其残差平方和为:

$$Q = \sum_{i=1}^n [z_i - \hat{z}_i]^2 = \sum_{i=1}^n [z_i - (a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + a_3x_{3i} + \dots + a_px_{pi})]^2$$

分别求 Q 对 $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_p$ 的偏导数,令其等于零可得到正则方程组:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + \dots + a_p \sum_{i=1}^n x_{pi} = \sum_{i=1}^n z_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{1i} + \dots + a_p \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{1i} = \sum_{i=1}^n x_{1i}z_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{pi} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{pi} + \dots + a_p \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{pi} = \sum_{i=1}^n x_{pi}z_i \end{cases}$$

写成矩阵形式为:

$$X^T X A = X^T Z$$

其中 X, A, Z 分别为 $n \times (p+1), p \times 1, n \times 1$ 阶矩阵,分别为:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}$$

即由(1)式可求得: $A = (X^T X)^{-1} X^T Z$

2.3 模型检验

2.3.1 R² 检验 趋势面方程拟合的优劣取决于回归平方和 SS_R 在总离差平方和 SS_T 中的比重 R²,即:

$$R^2 = SS_R / SS_T$$

式中: $SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - \bar{z})^2$;

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 + \sum_{i=2}^n (\hat{z}_i - \bar{z})^2 = SS_D = SS_R$$

R² 越大,趋势面的拟合度就越高。

2.3.2 显著性检验 利用变量 z 的总离差平方和和剩余平方和与回归平方和的比值,确定变量 z 与自变量 x, y 之间的回归关系是否显著,即:

$$F = \frac{SS_R / p}{SS_D / (n - p - 1)}$$

在显著性水平 α 下,查 F 分布表得 F_α,若计算的 F 值大于临界值 F_α,则认为趋势面方程显著;反之则不显著。

2.3.3 逐次检验 对相继的两个阶段的适度进行比较,求出较高次多项式的回归平方和与较低次的回归平方和之差,将此差值除以对应自由度之差,得到因多项式次数增高而产生的回归均方值,将此均方值除以较高次回归多项式的剩余均方值,所得的 F 值若显著,则较高次多项式对回归做出了新的贡献,若不

显著,则增加多项式回归次数对回归无贡献,应选用低次多项式。

3 结果与分析

试验为 N,P 两个因素等重复试验,分别记施 N 量为 x , 施 P 量为 y , 均为 5 个水平, 不完全实施, 共 17 个处理, 重复 3 次, 小麦产量记为 z 。分别取施 N

量为 90 kg/hm^2 的 5 个处理, 施 P 量为 90 kg/hm^2 的 5 个处理, 做出散点图和相应的趋势线。由图 1 可以看出, 施 P 量一定的情况下, 增施 N 肥小麦增产效果明显, 不施 N 与施 N 小麦的产量差异显著; 在施 N 量一定的情况下, 增施 P 肥对小麦增产效果不如 N 明显, 小麦产量随施肥量的增加逐渐增大。当 P 增加到 180 kg/hm^2 时, 产量较施 P 量 135 kg/hm^2 时减少。

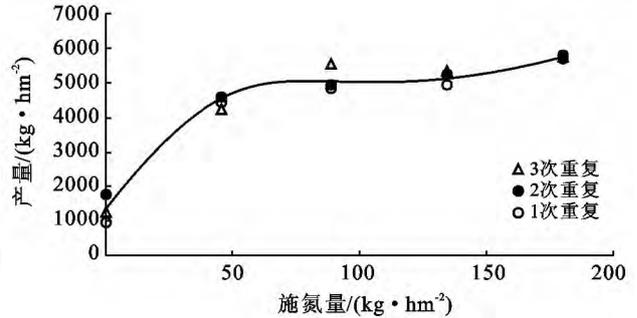
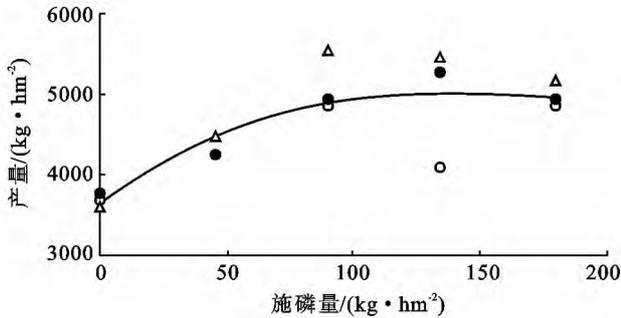


图 1 施 N 量一定时小麦产量随施 P 量的变化及施 P 量一定时小麦产量随施 N 量的变化

为了消除各试验小区土壤养分不均等因素的影响,更好地体现肥料对小麦产量的作用,在此将 3 次重复均值作为小麦产量,分别用二次三次多项式进行回归,利用 SPSS 软件^[15],得拟合优度分别为 $R_2^2 = 0.954, R_3^2 = 0.974$ 。对应的多项式拟合方程分别为:

$$z = 1294.265 + 39.89556x + 13.1473y + 0.097433xy - 0.16621x^2 - 0.07688y^2$$

$$z = 1317.167 + 64.38978x + 3.386939y - 0.55717x^2 - 0.04386y^2 + 0.205558xy + 0.001381x^3 + 0.000145y^3 + 0.000201x^2y - 0.0008xy^2$$

两个回归方程显著性检验以及对二次三次多项式模型的适度比较结果如表 1 所示。在置信度水平 $\alpha = 0.05$ 下,查 F 分布表得 $F_{0.05}(9,7) = 3.68, F_{0.05}$

$(5,11) = 3.20, F_{0.05}(4,7) = 4.12$,显然二次三次趋势面的回归方程均显著,而趋势面拟合次数由二次增高至三次 F 值不显著,则增加拟合次数对回归方程无贡献,因此选取二次趋势面比较合适。

表 1 回归方程显著性检验

离差来源	平方和	自由度	均方差	F 检验
三次回归	37 060 884.96	9	411 7876.11	29.10
三次剩余	990 425.77	7	141 489.40	—
二次回归	36 283 986.03	5	7 256 797.20	45.17
二次剩余	1 767 324.70	11	160 665.88	—
二次增高至三次的回归	776 898.93	4	194 224.73	0.20

选用二次趋势面拟合多项式回归方程,其系数检验结果如表 2 所示。

表 2 二次多项式拟合系数及统计检验结果

参数	回归系数	标准误差	T 值	P 值	下限 95%	上限 95.0%
常数	1 294.265	339.322	3.814	0.003	547.422	2 041.108
x	39.896	5.990	6.660	3.56E-05	26.712	53.079
y	13.147	5.990	2.195	0.051	-0.0366	26.331
$x \times y$	0.097	0.024	4.059	0.002	0.045	0.150
$x \times x$	-0.166	0.030	-5.598	0.000	-0.232	-0.101
$y \times y$	-0.077	0.030	-2.589	0.025	-0.142	-0.012

令模型的残差为纵坐标,预测值为横坐标,得出残差如图 2 所示。图 2 中是一系列无规律的点,可见,模型是适合的。

利用 Matlab 软件^[16]绘制模型的曲面图(图 3)。

由图 3 可以看出,单施 N 肥对小麦的增产作用较单施 P 肥对小麦产量增产作用明显,而两肥合理的配比施肥会产生明显的增产作用。

求得最大之点为 $(x_0, y_0) = (178.169, 198.405)$,

可见,当 N, P 分别取 x_0, y_0 时,取得最大值 $z = 6\ 152.6$ 。且越靠近极值点,所得的产量 z 越大,可在试验因素水平范围内取值,带入回归方程计算 z 值,对小麦产量做出预测。

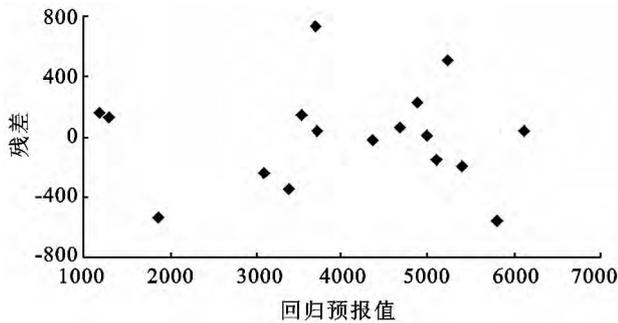


图 2 二次回归模型残差图

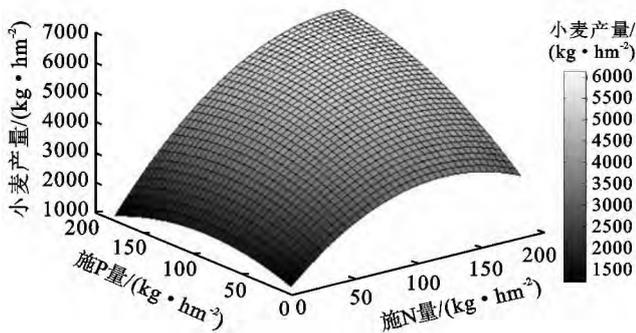


图 3 二次趋势面拟合图

4 结论

(1) 趋势面分析方法可以用于分析小麦产量变化趋势,模型拟合优度较高,其模拟结果与实际产量基本相符,得到的趋势面可以对常态年条件下处理范围内相应的产量做出可靠预测。张睿等^[17-19]研究表明,小麦的产量不仅受氮磷施肥量的影响,与钾肥、有机肥的施用量,以及土壤水分等因素也有很大的关联,若将这些因素考虑进去,可使模型的预测结果更可靠。

(2) N, P 配比是提高小麦产量的有效措施,单施 N 肥的增产作用较单施 P 肥增产作用明显。这与郝明德等^[9]的长期试验结果一致。根据趋势面模型求得小麦产量最大值 $6\ 152.6\ \text{kg}/\text{hm}^2$,而对应的 N, P 施肥量并没有得到实施,可见该地区提高施肥量小麦可能仍有增产潜力,需进一步研究。

(3) 根据各阶次趋势面方程的适度检验,可以看出并非阶次越高越准确,具体的趋势面模型的选择,应根据实际情况而定。

[参 考 文 献]

- [1] 李玉山,张孝中,郭明航.黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J].土壤学报,1990,27(1):1-7.
- [2] 庞新生.缺失数据处理中相关问题的探讨[J].统计信息论坛,2004,19(5):29-32.
- [3] 杨基栋.缺失数据的插补方法及其统计分析[J].华北水利水电学院学报,2010,31(2):98-103.
- [4] Craig K E, Deborah L B. The relative performance of full information maximum likelihood estimation for missing data in structural equation models [J]. Structural Equation Modeling, 2001,8(1):430-457.
- [5] 明道绪,刘永健,黄玉碧,等.有缺失数据两因素随机区组试验资料的最小二乘分析法及其应用[J].作物学报,1997,23(4):432-439.
- [6] Li K C. Sliced inverse regression for dimension reduction [J]. American Statistic Association Journal of the American Statistical Association, 1991, 86 (414): 114-121.
- [7] 许晶晶,郝明德,赵云英.黄土高原旱地小麦氮磷钾与有机肥优化配施试验[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):143-147.
- [8] 史培,郝明德,何晓雁,等.旱地不同降水年型小麦施肥的产量效应及吸肥特性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(7):91-97.
- [9] 何晓雁,郝明德,李慧成,等.黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1333-1340.
- [10] 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.
- [11] 郝明德,王旭刚,党廷辉,等.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.
- [12] 袁志发,宋世德.多元统计分析[M].北京:科学出版社,2009.
- [13] 袁志发,周静芋.试验设计与分析[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [14] 郭满才,徐钊.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [15] 张文彤.SPSS11 统计分析教程:高级篇[M].北京:希望电子出版社,2002.
- [16] 王沫然.MATLAB与科学计算[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [17] 张睿,文娟,王玉娟,等.渭北旱塬小麦高效施肥的产量及水分效应[J].麦类作物学报,2011,31(5):911-915.
- [18] 刘一.施肥对黄土高原旱地冬小麦产量及土壤肥力的影响[J].水土保持研究,2003,10(1):40-43.
- [19] 王兵,刘文兆,党廷辉,等.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[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):829-834.