

网络出版时间:2014-05-28 11:34

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.032

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.032.html>

# 咸阳灌区冬小麦推荐施肥指标体系研究

刘 疆<sup>1,2</sup>, 翟丙年<sup>1</sup>, 殷振江<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 咸阳市土壤肥料工作站, 陕西 咸阳 712000)

**【摘要】** **【目的】**建立陕西咸阳灌区冬小麦推荐施肥指标体系, 为指导该区科学施肥提供参考。**【方法】**于 2006—2009 年, 在陕西省咸阳市的秦都区、渭城区、武功县、兴平市、乾县、泾阳县和三原县共布置了 112 个冬小麦“3414”田间试验, 即设置氮、磷、钾 3 个因素, 每个因素 4 个水平, 共 14 个处理。根据“3414”田间试验结果和冬小麦相对产量, 划分了土壤养分含量的丰缺指标, 然后对不同养分丰缺指标下的最佳推荐施肥量进行了计算。**【结果】**咸阳灌区冬小麦 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的平均农学效率分别为 5.7、5.6 和 5.5 kg/kg, 增产率分别为 25.1%、14.7% 和 7.9%, 增产作用依次为氮肥>磷肥>钾肥, 随着冬小麦相对产量水平的降低, 肥料的增产率和肥料贡献率呈下降趋势, 土壤贡献率呈上升趋势。建立的咸阳灌区冬小麦的土壤养分丰缺指标为, 碱解氮: 低(>17~≤47 mg/kg)、中(>47~≤86 mg/kg)、高(>86~≤105 mg/kg)、极高(>105 mg/kg); 速效磷: 低(>1~≤8 mg/kg)、中(>8~≤28 mg/kg)、高(>28~≤41 mg/kg)、极高(>41 mg/kg); 速效钾: 低(>4~≤45 mg/kg)、中(>45~≤117 mg/kg)、高(>117~≤180 mg/kg)、极高(>180 mg/kg)。构建了咸阳冬小麦氮、磷、钾肥推荐施肥量与土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量测定值之间的数学模型, 当土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量的测定值为 17~105、1~41 和 4~180 mg/kg, 氮、磷、钾推荐施肥量分别为 407~69、220~67 和 216~66 kg/hm<sup>2</sup>。**【结论】**成功构建了咸阳灌区冬小麦推荐施肥指标体系, 为该地区冬小麦合理、科学施肥有一定参考价值。

**【关键词】** 咸阳灌区; 冬小麦; 推荐施肥; 指标体系

**【中图分类号】** S512.1<sup>+</sup>20.6

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2014)06-0055-08

## Index system of fertilizer recommendation for winter wheat in Xianyang irrigation area

LIU Jiang<sup>1,2</sup>, ZHAI Bing-nian<sup>1</sup>, YIN Zhen-jiang<sup>2</sup>

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Xianyang Soil and Fertilizer Station, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** **【Objective】**This study established an index system of optimal fertilizer recommendation for winter wheat in Xianyang irrigation area. **【Method】**During 2006—2009, 112 winter wheat “3414” field tests were conducted in Qindu, Weicheng, Wugong, Xingping, Qianxian, Jingyang and Sanyuan of Xianyang City, Shaanxi Province. The test included 3 factors (N, P, and K), 4 levels for each factor, and a total of 14 treatments. Based on the field test and relative yield of winter wheat, the indexes defining the abundance and deficiency of soil nutrients were obtained, and the optimal fertilizer amount for each classification was calculated. **【Result】**The average agronomic efficiencies of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and K<sub>2</sub>O for winter wheat in Xianyang irrigation area were 5.7, 5.6, and 5.5 kg/kg, and the yields were increased by 25.1%, 14.7%, and 7.9%,

**【收稿日期】** 2013-05-08

**【基金项目】** 农业部测土配方施肥项目(农发[2005]8号, 农财[2005]101号); 国家小麦现代产业技术体系建设专项

**【作者简介】** 刘 疆(1981—), 男, 陕西咸阳人, 助理农艺师, 硕士, 主要从事科学施肥技术研究。

E-mail: liujiang8156@126.com

**【通信作者】** 翟丙年(1967—), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与调控及旱地水肥管理研究。

E-mail: zhaibingnian@nwsuaf.edu.cn

respectively. The effects on yield increase were in a decreasing order of nitrogen>phosphate>potash fertilizer. With the decrease of relative yield, the yield and contribution of fertilizer decreased while the contribution of soil increased. The obtained abundance and deficiency indexes were: nitrogen, low ( $>17$  to  $\leq 47$  mg/kg), medium ( $>47$  to  $\leq 86$  mg/kg), high ( $>86$  to  $\leq 105$  mg/kg), and very high ( $>105$  mg/kg); available phosphorus, low ( $>1$  to  $\leq 8$  mg/kg), medium ( $>8$  to  $\leq 28$  mg/kg), high ( $>28$  to  $\leq 41$  mg/kg), and very high ( $>41$  mg/kg); and potassium, low ( $>4$  to  $\leq 45$  mg/kg), medium ( $>45$  to  $\leq 117$  mg/kg), high ( $>117$  to  $\leq 180$  mg/kg), and very high ( $>180$  mg/kg). Mathematical models measuring the relationship between fertilization amounts of nitrogen, phosphorus, and potassium, and contents of soil alkali hydrolysable nitrogen, available phosphorus, and available potassium were obtained. When the contents of soil alkali hydrolysable nitrogen, available phosphorus, and available potassium were 17–105 mg/kg, 1–41 mg/kg and 4–108 mg/kg, the recommended fertilization amounts of nitrogen, phosphorus, and potassium were 407–69 kg/hm<sup>2</sup>, 220–67 kg/hm<sup>2</sup> and 216–66 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. 【Conclusion】 Index system of fertilizer recommendation for winter wheat in Xianyang irrigation area was successful established, which could provide reference for the scientific and reasonable fertilization for winter wheat in the area.

**Key words:** Xianyang irrigation area; winter wheat; index of abundance and deficiency of nutrients; fertilizer recommendation

小麦是重要的粮食作物,全世界约有 35% 的人口以小麦为主粮。化肥在中国粮食增产及粮食安全保障方面发挥着重要作用,然而化肥在中国粮食生产中的贡献率仅为 30% 左右<sup>[1]</sup>,远低于欧美发达国家的水平(50%~60%)<sup>[2]</sup>。多年来咸阳灌区冬小麦盲目大量使用化肥,导致土壤氮磷钾比例失调,施肥效益明显下降,增肥不增产,肥料利用率低。20 世纪 80 年代,随着第 2 次全国土壤普查的开展,人们开始了大规模的测土施肥研究,建立了不同土壤类型、主要农作物的施肥技术参数<sup>[3]</sup>,为中国的农业生产发展作出了巨大的贡献,但该次调查距今已经 20 余年,土壤肥力、耕作制度、作物品种、栽培技术、施肥方式等均发生了很大的变化,原有的施肥指标已不能指导当前的农业生产。大量的研究证明,作物的施肥量不但受作物生理特性的影响,也受地貌类型、土壤因素、气候条件等多因素的影响,而这些因素都与地域密切相关。因此,确定不同研究区域合理肥料用量和施肥比例,对提高小麦的产量、增加施肥效益、减少面源污染具有重要作用。

目前,国内外在推荐施肥方面已做了大量的研究。2004 年,赵泽英等<sup>[4]</sup>通过建立推荐施肥决策系统来推荐施肥;2005 年,金柏年等<sup>[5]</sup>利用推荐施肥模型来确定施肥量;2006 年,陈新平等<sup>[6]</sup>通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系;2008 年,王锋等有<sup>[7]</sup>研究了“311”饱和最优设计在肥料推荐施肥中的应用;2011 年,戢林等<sup>[8]</sup>采用“3414”试验构建了川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系;

2007 年,杨莉琳等<sup>[9]</sup>对太行山山前平原冬小麦—夏玉米推荐施肥指标进行了修正。2009 年,孙义祥等<sup>[10]</sup>应用“3414”试验,建立了山东省冬小麦测土配方施肥指标体系;2010 年,付莹莹等<sup>[11]</sup>建立了陕西关中灌区夏玉米土壤养分丰缺及推荐施肥指标体系,为当地的玉米推荐施肥提供了技术依据;2011 年,李文彪等<sup>[12]</sup>建立了内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系;2011 年,张明等<sup>[13]</sup>进行了陕西关中小麦/玉米轮作区氮肥用量及施氮现状评估研究;2010 年,张鹏等<sup>[14]</sup>进行了周至县冬小麦氮磷钾肥肥效及适宜用量研究;2011 年,慕芳等<sup>[15]</sup>对长武小麦氮磷钾肥的利用效果及推荐施肥量进行了研究。目前,国外研究者结合土壤供肥特点、作物吸收规律和肥料特性进行推荐施肥,且对氮肥的研究较多,一般通过测试土壤和植株中的氮<sup>[16-18]</sup>,并应用修正氮肥专家系统<sup>[19]</sup>,采用精准氮肥管理技术推荐施肥<sup>[20-21]</sup>,智能化、信息化是欧美氮肥推荐的发展趋势<sup>[22-23]</sup>,这些新的技术有待与传统的推荐施肥技术相衔接,以促进推荐施肥科学发展。在芬兰<sup>[24]</sup>、大西洋中部<sup>[25]</sup>、北美等地区,磷、钾肥的推荐也有报道<sup>[26]</sup>。但目前关于陕西咸阳灌区冬小麦推荐施肥的系统研究报道较少。因此,有必要对咸阳地区小麦推荐施肥指标进行系统研究。

本试验通过多年多点“3414”试验对咸阳灌区冬小麦施肥指标进行研究,以探明该区域小麦氮磷钾施肥效果,建立咸阳灌区冬小麦土壤养分丰缺指标和推荐施肥模型,确定最佳施肥量,为因地制宜指导

科学施肥,提高该区域小麦的综合生产能力和减少养分损失以及保护生态环境奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

咸阳市地处暖温带,属大陆性季风气候,四季冷热干湿分明,气候温和,光、热、水资源丰富,利于农、林、牧、副、渔各业发展。研究区年平均降水量537~650 mm,年平均温度9.0~13.2℃,年极端最低气温-18.6℃,年极端最高气温41.2℃,全年太阳辐射 $4.61\times10^9\sim4.99\times10^9$  J/m<sup>2</sup>;年累计光照时数平均为2 017.2~2 346.9 h,6-8月的日照时数约占全年的32%,对夏季作物的成熟和秋季作物的生长发育很有利。咸阳市土地总面积101.96万hm<sup>2</sup>,按地貌特征可分为土石山地、丘陵地、原地和川道4大类。咸阳市土壤分布处于暖温带半湿润落叶阔叶林灌丛褐土带向北部的暖温带半干旱草原黑垆土带的过渡带。北山以北属黑垆土带,北山以南属褐土带。

咸阳市耕地面积36.87万hm<sup>2</sup>,其中水浇地面积16.26万hm<sup>2</sup>,占总面积的44%,高于全国及陕西省平均水平<sup>[27]</sup>。其中秦都区、渭城区、兴平市、武

功县的武功镇水浇地面积占辖区耕地面积的90%以上,泾阳县、乾县、三原县、礼泉县水浇地面积占辖区耕地面积的50%~60%,是咸阳市灌区冬小麦的主要分布区<sup>[27]</sup>。咸阳市全年小麦粮食产量约101万t,其中秦都区、渭城区、兴平市、武功镇、泾阳县、乾县、三原县、礼泉县合计产量82.4万t,占全市小麦总产量的82%。咸阳市农耕地垦植指数为56.7%,远高于全国和全省平均水平<sup>[27]</sup>。

1.2 材 料

供试小麦品种为小偃22、豫麦49、西农979。其中,小偃22的播种量为90~135 kg/hm<sup>2</sup>,田间基本苗(180~210)万株/hm<sup>2</sup>;豫麦49的播种量为60~90 kg/hm<sup>2</sup>,田间基本苗(150~180)万株/hm<sup>2</sup>;西农979播种量90~120 kg/hm<sup>2</sup>,田间基本苗180~225万株/hm<sup>2</sup>。氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),钾肥为氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)。

1.3 试验设计与实施

2006-2009年,在陕西省咸阳市的秦都区、渭城区、武功县、兴平市、乾县、泾阳县和三原县共布置了112个冬小麦“3414”田间试验小区。以上各县区试验田土壤养分平均含量见表1。

表 1 陕西咸阳灌区主要县区试验田的土壤养分平均含量

| Table 1 Average contents of soil nutrients in experimental fields of Xianyang irrigation area, Shaanxi Province |              |               |                               |               |                  |               | mg/kg |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------|-------|
| 县区<br>County or district                                                                                        | N            |               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |               | K <sub>2</sub> O |               |       |
|                                                                                                                 | 变幅<br>Change | 平均<br>Average | 变幅<br>Change                  | 平均<br>Average | 变幅<br>Change     | 平均<br>Average |       |
| 秦都区 Qindou district                                                                                             | 41.0~69.0    | 53.6          | 15.9~40.6                     | 28.0          | 98.0~195.0       | 154.7         |       |
| 渭城区 Weicheng district                                                                                           | 36.2~53.9    | 45.9          | 15.6~40.1                     | 27.3          | 112.0~190.0      | 150.1         |       |
| 武功县 Wugong county                                                                                               | 36.0~66.0    | 58.8          | 10.4~47.1                     | 32.1          | 81.0~246.0       | 135.7         |       |
| 兴平市 Xingping county                                                                                             | 29.5~65.4    | 44.3          | 8.2~23.2                      | 14.0          | 80.0~169.0       | 92.5          |       |
| 乾县 Qian county                                                                                                  | 19.4~62.9    | 45.7          | 13.4~53.3                     | 18.1          | 69.0~226.0       | 139.5         |       |
| 泾阳县 Jingyang county                                                                                             | 33.3~68.3    | 45.8          | 13.4~51.2                     | 28.8          | 130.0~240.0      | 157.1         |       |
| 三原县 Sanyuan county                                                                                              | 60.0~75.0    | 64.0          | 20.7~48.7                     | 34.4          | 107.0~217.0      | 140.0         |       |

试验采用“3414”最优回归设计方案,即设置氮、磷、钾3个因素,每个因素4个水平,共14个处理。一般为多点不重复试验,但每个县区每年至少做一个3次重复的完全试验,区组内随机排列。4个水平为:0水平.不施肥;2水平.当地最佳施肥量;1水平.2水平×0.5;3水平.2水平×1.5(该水平为过量施肥水平)。14个处理分别为:1). N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>; 2). N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>; 3). N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>; 4). N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>; 5). N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>; 6). N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>; 7). N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub>; 8). N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>; 9). N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub>; 10). N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub>; 11). N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>; 12). N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>; 13). N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub>; 14). N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>1</sub>。

氮、磷、钾2水平是根据前期的大量走访调研,

了解当地的传统施肥习惯,结合基层农技人员的经验,确定的当地施肥的最佳值。陕西咸阳灌区主要县区冬小麦“3414”试验中氮、磷、钾肥的2水平平均施用量见表2。

1.4 土壤样品的采集及有效养分含量的测定

在秋季播种前,选择合适的试验地块,在每一试验地采用S法,用土钻取0~20 cm耕层土样,共取15个点,将各点土样混合,风干,过孔径2和0.25 mm的土壤筛,测定土壤碱解氮和速效磷、速效钾含量。田间土壤养分测定采用国家测土配方施肥技术规范的方法进行,其中土壤碱解氮含量用1 mol/L氢氧化钠碱解扩散硼酸吸收法测定;土壤速效磷用

pH 8.5、0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度 (pH 7.0)浸提-原子吸收火焰光度计法测定。  
计比色法测定;土壤速效钾用 1.0 mol/L 醋酸铵

表 2 陕西咸阳灌区主要县区冬小麦“3414”试验中氮、磷、钾肥的 2 水平平均施用量  
Table 2 The average amounts of nitrogen,phosphorus,and potassium used for the 2 level tests of  
“3414” experiment for winter wheat in Xianyang irrigation area,Shaanxi Province

| 县区<br>County or district | 年份<br>Year | 试验点数<br>Number of<br>experimental sites | 土壤类型<br>Soil types                                 | N/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | K <sub>2</sub> O/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------------|------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 秦都区<br>Qindou district   | 2008       | 10                                      | 褐土、新积土<br>Cinnamon soils,alluvial soils            | 240.8                        | 184.2                                                     | 86.5                                        |
| 渭城区<br>Weicheng district | 2008       | 11                                      | 褐土、黄绵土<br>Cinnamon soils,cultivated loessial soils | 220.7                        | 132.0                                                     | 61.5                                        |
| 武功县<br>Wugong county     | 2006       | 6                                       | 褐土<br>Cinnamon soils                               | 255.0                        | 105.0                                                     | 75.0                                        |
|                          | 2007       | 10                                      |                                                    | 200.9                        | 88.5                                                      | 24.3                                        |
|                          | 2008       | 10                                      |                                                    | 180.0                        | 96.0                                                      | 22.5                                        |
| 兴平市<br>Xingping county   | 2008       | 10                                      | 褐土<br>Cinnamon soils                               | 207.0                        | 96.0                                                      | 60.0                                        |
| 乾县<br>Qian county        | 2007       | 10                                      | 褐土<br>Cinnamon soils                               | 186.0                        | 117.0                                                     | 84.0                                        |
|                          | 2008       | 5                                       |                                                    | 180.0                        | 150.0                                                     | 75.0                                        |
| 泾阳县<br>Jingyang county   | 2007       | 14                                      | 灌淤土、黄土<br>Cumulated irrigated soils,yellow earths  | 185.4                        | 99.6                                                      | 79.3                                        |
|                          | 2008       | 6                                       |                                                    | 185.0                        | 102.5                                                     | 82.5                                        |
| 三原县<br>Sanyuan county    | 2007       | 10                                      | 褐土、灌淤土<br>Cinnamon soils,cumulated irrigated soils | 186.0                        | 111.0                                                     | 85.5                                        |
|                          | 2008       | 10                                      |                                                    | 202.5                        | 109.5                                                     | 85.5                                        |
| 平均 Acreage               |            | 112                                     |                                                    | 202.44                       | 115.94                                                    | 68.47                                       |

1.5 作物产量

在冬小麦成熟期测定产量,收获时去除边行,小区单打单收,记录各小区冬小麦产量,折算出单位面积产量。

1.6 数据处理与分析

1.6.1 土壤有效养分丰缺指标的确定 制定土壤养分丰缺指标时会涉及到“3414”试验方案<sup>[28]</sup>中的 1)、2)、4)、8)和 6)等 5 个处理,其分别对应对照区(CK)、无氮区(PK)、无磷区(NK)、无钾区(NP)和氮磷钾区(NPK)。

以各试验点基础土样速效养分含量测定值(mg/kg)为自变量,以相对产量(%) (缺素区产量占全肥区产量的百分数)为因变量,获得相对产量与对应土壤养分含量测试值之间的对数关系式。然后将相对产量≤50%时所对应的养分含量确定为极低,相对产量>50%~≤75%时对应的养分含量确定为低,相对产量>75%~≤90%时对应的养分含量确定为中等,相对产量为>90%~≤95%时对应的养分含量确定为高,相对产量>95%时对应的养分含量确定为极高<sup>[6,10,29]</sup>,将以上各相对产量临界值代入到回归方程中确定出养分分级的临界值,根据这些临界值划分土壤养分丰缺指标。

1.6.2 不同土壤肥力等级推荐施肥量的确定 选取“3414”试验方案中的 2)、3)、6)和 11)等 4 个处理,对产量(y)与施肥量(x)进行回归分析,建立最佳施肥量下的小麦氮肥效应函数(本试验采用一元

二次肥料效应函数);选取试验方案中 4)、5)、6)、7) 4 个处理,对产量(y)与施肥量(x)进行回归分析,建立最佳施肥量下的小麦磷肥效应函数;选取试验方案中 6)、8)、9)、10) 4 个处理,对产量(y)与施肥量(x)进行回归分析,计算每个试验点的最佳施肥量,然后建立小麦最佳施氮量与土壤碱解氮含量测定值、最佳施磷量与土壤速效磷含量测定值、最佳施钾量与土壤速效钾含量测定值的函数关系式。将土壤养分丰缺指标中的临界值代入函数式中,求出各级丰缺指标下的推荐施肥量。

1.6.3 指标的计算 增产率=(全肥区经济产量-缺素区经济产量)/缺素区经济产量×100%;农学效率(kg/kg)=(全肥区经济产量-缺素区经济产量)/(全肥区施肥量-缺素区施肥量);肥料贡献率=(全肥区经济产量-无肥区经济产量)/全肥区经济产量×100%;土壤贡献率=无肥区经济产量/全肥区经济产量×100%。式中:全肥区指 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>处理,无肥区指 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>处理。

2 结果与分析

2.1 咸阳灌区冬小麦不同产量水平下的肥料效应分析

将咸阳市不同年度 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理的冬小麦产量按高、中、低分段,并对各段产量、施肥量进行平均和归类,结果见表 3。通过表 3 可计算出氮、磷、钾肥的增产率、农学效率及肥料贡献率(Contribution

rate of chemical fertilizer, CRCF) 和土壤贡献率 (Contribution rate of soil, CRS), 结果见表 4。从表 4 可以看出,咸阳市冬小麦氮肥、磷肥、钾肥的农学效率为 1.9~7.1 kg/kg, 平均 4.3 kg/kg, 其中增产作用最大的为氮肥, 农学效率为 3.0~8.6 kg/kg, 平均 5.7 kg/kg; 其次为磷肥, 农学效率为 3.1~7.9 kg/kg, 平均 5.6 kg/kg; 钾肥最小, 农学效率为

4.1~7.3 kg/kg, 平均 5.5 kg/kg。随着冬小麦产量水平的降低, 肥料增产率也下降, 氮肥增产率从 34.2% 下降到 14.0%, 磷肥增产率由 17.9% 下降到 10.3%, 钾肥增产率由 9.6% 下降到 6.9%。随着产量水平的降低, 氮肥、磷肥、钾肥农学效率和肥料贡献率呈下降趋势, 土壤贡献率呈上升趋势。

表 3 陕西咸阳灌区冬小麦不同产量水平下的施肥量

Table 3 Application rates of fertilizers for winter wheat under different yield levels in Xianyang irrigation area, Shaanxi Province

| 产量水平/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Yield level | 试验点数<br>Number<br>of trails | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Yield           |                                              |                                              |                                              |                                              | 施肥量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Fertilizer application rates |                               |                  |                                                       | N : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : K <sub>2</sub> O |
|------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                |                             | N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub> | N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub> | N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub> | N                                                          | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +<br>K <sub>2</sub> O |                                                      |
| 高(>6 000) High                                 | 18                          | 5 570                                        | 7 319                                        | 8 334                                        | 8 960                                        | 9 822                                        | 194.3                                                      | 125.3                         | 78.7             | 398.3                                                 | 1 : 0.54 : 0.38                                      |
| 中 (4 500~6 000)<br>Medium                      | 83                          | 5 508                                        | 6 299                                        | 6 741                                        | 7 298                                        | 7 817                                        | 201                                                        | 124.1                         | 72.6             | 397.7                                                 | 1 : 0.55 : 0.34                                      |
| 低(<4 500) Low                                  | 11                          | 5 451                                        | 5 763                                        | 5 957                                        | 6 146                                        | 6 572                                        | 180                                                        | 133.7                         | 68.7             | 386.4                                                 | 1 : 0.72 : 0.36                                      |
| 平均 Average                                     |                             | 5 510                                        | 6 408                                        | 7 011                                        | 7 467                                        | 8 070                                        | 1 918                                                      | 127.7                         | 73.3             | 394.1                                                 | 1 : 0.60 : 0.36                                      |

表 4 陕西咸阳灌区冬小麦不同产量水平下的肥料增产率和养分农学效率

Table 4 Average yield increasing rates and nutrients efficiencies of winter wheat under different yield levels in Xianyang irrigation area, Shaanxi Province

| 产量水平/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Yield level | 增产率/%<br>Yield increase |                               |                  |                                                   | 农学效率/(kg·kg <sup>-1</sup> )<br>Agronomy efficiency |                               |                  |                                                   | 肥料<br>贡献率/%<br>CRCF | 土壤<br>贡献率/%<br>CRS |
|------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
|                                                | N                       | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O | N                                                  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O |                     |                    |
| 高(>6 000) High                                 | 34.2                    | 17.9                          | 9.6              | 61.7                                              | 8.6                                                | 7.9                           | 7.3              | 7.1                                               | 43.3                | 56.7               |
| 中 (4 500~6 000)<br>Medium                      | 27.2                    | 16.0                          | 7.1              | 50.3                                              | 5.5                                                | 5.8                           | 4.8              | 3.9                                               | 29.5                | 70.5               |
| 低(<4 500) Low                                  | 14.0                    | 10.3                          | 6.9              | 31.4                                              | 3.0                                                | 3.1                           | 4.1              | 1.9                                               | 17.1                | 82.9               |
| 平均 Average                                     | 25.1                    | 14.7                          | 7.9              | 47.7                                              | 5.7                                                | 5.6                           | 5.5              | 4.3                                               | 31.7                | 68.3               |

2.2 咸阳灌区冬小麦推荐施肥指标体系的建立

2.2.1 养分丰缺指标的划分 建立咸阳灌区冬小麦的土壤养分含量测定值和相对产量的对数关系(图 1、图 2、图 3), 并将相对产量划分为≤50%、>50%~≤75%、>75%~≤90%、>90%~≤95%和>95% 5 段, 相应地可得出咸阳地区冬小麦土壤碱解氮、速效磷、速效钾的丰缺指标。由图 1~3 可知, 土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量测定值与相对产量呈正相关, 土壤碱解氮的丰缺指标为: 极低(≤17 mg/kg)、低(>17~≤47 mg/kg)、中(>47~≤86 mg/kg)、高(>86~≤105 mg/kg)、极高(>105 mg/kg); 土壤速效磷的丰缺指标为: 极低(≤1.0 mg/kg)、低(>1.0~≤8 mg/kg)、中(>8~≤28 mg/kg)、高(>28~≤41 mg/kg)、极高(>41 mg/kg); 土壤速效钾的丰缺指标为: 极低(≤4.0 mg/kg)、低(>4.0~≤45 mg/kg)、中(>45~≤117 mg/kg)、高(>117~≤180 mg/kg)、极高(>180 mg/kg)。

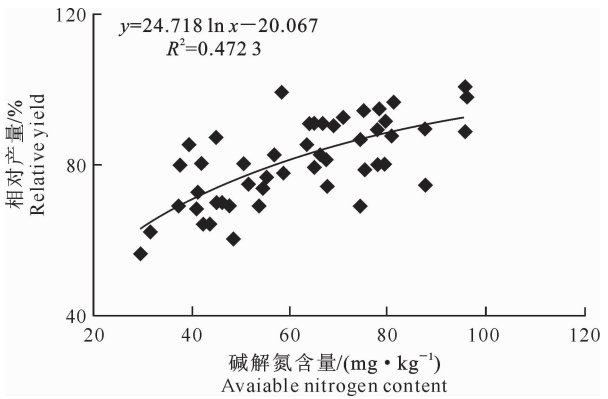


图 1 无氮条件下小麦相对产量与土壤碱解氮含量的关系

Fig. 1 Relationship between soil available nitrogen content and relative yield of wheat

计算结果表明, 咸阳灌区冬小麦所有试验点无氮(N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)、无磷(N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>)、无钾(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>)处理冬小麦相对产量的最小值分别为 56.9%、62.7%、74.3%, 均未低于 50%, 所以无氮(N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)、无磷(N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>)、无钾(N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>)处理冬小麦相对产量为

50%时所对应的丰缺指标值为模型外推值,没有实际意义,故对其进行剔除。因此,陕西咸阳灌区冬小

麦土壤碱解氮、速效磷、速效钾的丰缺指标体系暂定为 4 级(表 5)。

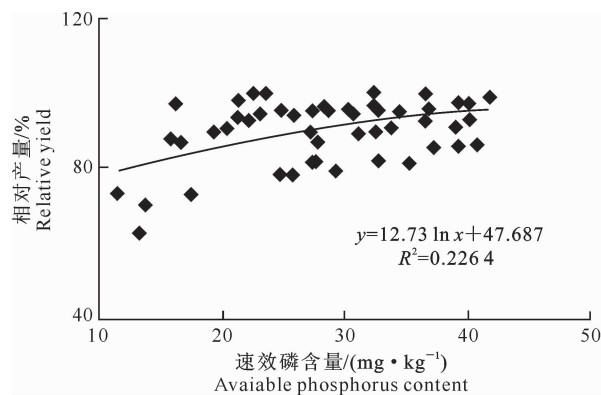


图 2 无磷条件下小麦相对产量与土壤速效磷含量的关系

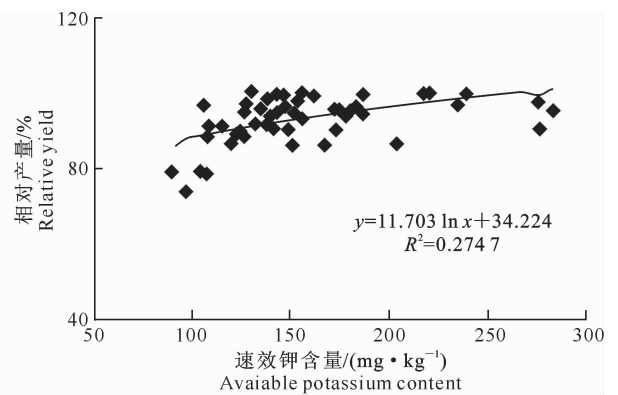


图 3 无钾条件下小麦相对产量与土壤速效钾含量的关系

Fig. 2 Relationship between soil available phosphorus content and relative yield of wheat

Fig. 3 Relationship between soil available potassium content and relative yield of wheat

表 5 陕西咸阳灌区冬小麦土壤氮磷钾养分丰缺及推荐施肥指标体系

Table 5 Index system of fertilizer recommendation (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and K<sub>2</sub>O) for winter wheat in Xianyang irrigation area, Shaanxi Province

| 丰缺等级<br>Abundant degree | 冬小麦<br>相对产量/%<br>Relative yield | 碱解氮/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Avail-N | 氮肥推荐用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Recommend N rate | 速效磷/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Avail-P | 磷肥推荐用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Recommend P rate | 速效钾/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )<br>Avail-K | 钾肥推荐用量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Recommend K rate |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 极高 Very high            | >95                             | >105                                      | 69                                                    | >41                                       | 67                                                    | >180                                      | 66                                                    |
| 高 High                  | >90~≤95                         | >86~≤105                                  | 106~69                                                | >28~≤41                                   | 83~67                                                 | >117~≤180                                 | 83~66                                                 |
| 中等 Middle               | >75~≤90                         | >47~≤86                                   | 218~106                                               | >8~≤28                                    | 134~83                                                | >45~≤117                                  | 110~83                                                |
| 低 Low                   | >50~≤75                         | >17~≤47                                   | 407~218                                               | >1~≤8                                     | 220~134                                               | >4~≤45                                    | 216~110                                               |

2.2.2 咸阳灌区不同养分丰缺指标下的最佳推荐施肥量 经计算,本研究建立了冬小麦最佳施氮量( $y_1$ )与土壤碱解氮含量测定值( $x_1$ )、最佳施磷量( $y_2$ )与土壤速效磷含量测定值( $x_2$ )、最佳施钾量( $y_3$ )与土壤速效钾含量测定值( $x_3$ )的拟合方程:

碱解氮: $y_1 = -12.404 \ln x_1 + 62.304$ ,  
 $R^2 = 0.4606$ ;

速效磷: $y_2 = -2.7366 \ln x_2 + 14.647$ ,  
 $R^2 = 0.2023$ ;

速效钾: $y_3 = -2.6247 \ln x_3 + 18.012$ ,  
 $R^2 = 0.2195$ 。

由式(1)~(3)可以看出,最佳推荐施肥量和土壤养分含量测定值均呈显著负相关。在不同冬小麦相对产量和不同土壤养分丰缺指标下,土壤碱解氮、速效磷、速效钾测定值都有对应的最佳施肥量。土壤养分含量测定值越小,最佳推荐施肥量越大,将土壤养分丰缺指标中的临界值代入函数式中,求出各级丰缺指标下的推荐施肥量,结果见表 5。由表 5 可以看出,土壤碱解氮含量测定值为 17~105 mg/kg 时,对应的氮肥(N)推荐用量为 407~69

kg/hm<sup>2</sup>;土壤速效磷含量测定值为 1~41 mg/kg 时,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)推荐用量为 220~67 kg/hm<sup>2</sup>;土壤速效钾含量测定值为 4~180 mg/kg 时,对应钾肥(K<sub>2</sub>O)推荐用量为 216~66 kg/hm<sup>2</sup>。

3 讨论

针对某一县、市,在特定的作物和土壤条件下对施肥指标和推荐施肥量的研究已有报道。唐润林<sup>[30]</sup>根据太原市不同区域土壤类型和作物种植特点,综合影响肥料效应的各种因素,制定出了适合当地各类作物生长的肥料配方。赵振刚<sup>[29]</sup>对庄浪县冬小麦测土配方施肥指标进行了研究,建立了庄浪县冬小麦生产推荐施肥指标。张贤辉<sup>[31]</sup>以淮南市 2008 年布置的“3414”试验为基础,通过对土壤养分和相对产量建立对数关系方程,确立了淮南市分区 3 级土壤养分丰缺指标;并运用原始数据平均方法,结合生产实践经验和单个肥料效应试验所建立的三元二次函数效应方程,获得最佳施肥量上下限,初步建立了淮南市小麦施肥指标体系。上述研究虽涉及分区域研究,但多以行政区域为主,而本研究则以地

形地貌、土壤类型、灌溉条件、耕作制度相对一致的生态类型区为研究单元,进行施肥指标的划分,强化了特定区域作物施肥的针对性,结果更有指导意义。

本研究根据冬小麦相对产量,将咸阳灌区冬小麦“3414”试验地土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量划分为低、中、高和极高 4 个等级,并对不同土壤养分分级范围内最佳施肥量与养分含量测定值的关系进行模拟,以计算最佳肥料用量。

本研究初步建立了咸阳灌区冬小麦施肥指标体系,确定了冬小麦全生育期的施肥量,但在实际生产过程中,施肥时期也是科学施肥的重要环节,合理的施肥时期能确保冬小麦各生育期养分适量供应,提高养分利用效率,减少资源浪费,这方面还有待进一步研究。

## 4 结 论

咸阳灌区冬小麦高、中、低肥力水平下的 112 个“3414”田间试验结果进行分析,得出如下结论。

1)研究区域小麦  $N$ 、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  的平均农学效率分别为 5.7、5.6 和 5.5 kg/kg,平均增产率分别为 25.1%,14.7%和 7.9%;

2)按照冬小麦相对产量分别为  $\leq 50\%$ 、 $>50\% \sim \leq 75\%$ 、 $>75\% \sim \leq 90\%$ 、 $>90\% \sim \leq 95\%$  和  $>95\%$  的划分结果,对土壤养分丰缺指标进行了确定,其中碱解氮:低( $>17 \sim \leq 47$  mg/kg)、中( $>47 \sim \leq 86$  mg/kg)、高( $>86 \sim \leq 105$  mg/kg)、极高( $>105$  mg/kg);速效磷:低( $>1.0 \sim \leq 8$  mg/kg)、中( $>8 \sim \leq 28$  mg/kg)、高( $>28 \sim \leq 41$  mg/kg)、极高( $>41$  mg/kg);速效钾:低( $>4.0 \sim \leq 45$  mg/kg)、中( $>45 \sim \leq 117$  mg/kg)、高( $>117 \sim \leq 180$  mg/kg)、极高( $>180$  mg/kg)。

3)构建了咸阳冬小麦氮、磷、钾肥推荐施肥量与土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量测定值之间的数学模型,当土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量的测定值分别为 17~105,1~41 和 4~180 mg/kg,氮、磷、钾的推荐施肥量分别为 407~69,220~67 和 216~66 kg/hm<sup>2</sup>。

## [参考文献]

[1] 王祥菊. 氮磷钾肥配比对中筋和弱筋小麦产量和品质的影响 [D]. 江苏扬州:扬州大学,2008.  
Wang X J. Effects of different application ratio of N,P and K fertilizer on grain yield and quality of medium-gluten wheat and weak-gluten wheat [D]. Yangzhou,Jiangsu:Yangzhou University,2008. (in Chinese)

[2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.  
Zhang F S,Wang J Q,Zhang W F,et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica,2008,45(5):915-924. (in Chinese)

[3] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展 [J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(4):495-499.  
Huang D M. Soil testing and fertilizer recommendations in China during the past decade [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science,2003,9(4):495-499. (in Chinese)

[4] 赵泽英,彭志良. 贵州玉米生产智能管理系统中推荐施肥模型与参数系统初步研究 [J]. 贵州农业科学,2004,32(3):24-27.  
Zhao Z Y,Peng Z L. Study on recommended fertilization model and its parameter system in intelligent management system for corn production of Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences,2004,32(3):24-27. (in Chinese)

[5] 金柏年,韩晓日,刘小虎,等. 玉米优化配方施肥模型研究 [J]. 杂粮作物,2005,25(2):107-108.  
Jin B N,Han X R,Liu X H,et al. Study on optimum fertilizer recommendation model of maize [J]. Rain Fed Crops,2005,25(2):107-108. (in Chinese)

[6] 陈新平,张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系 [J]. 中国农技推广,2006,22(4):36-39.  
Chen X P,Zhang F S. Establishing fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments [J]. China Agricultural Technology Extension,2006,22(4):36-39. (in Chinese)

[7] 王锋有,刘小虎,王 贺. 311 饱和最优设计在肥料推荐施肥中的应用 [J]. 农业科技与装备,2008(3):14-16.  
Wang F Y,Liu X H,Wang H. The application of 311 saturated optimum design in recommended fertilization [J]. Agricultural Science & Technology and equipment,2008(3):14-16. (in Chinese)

[8] 戴 林,张锡洲,李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建 [J]. 中国农业科学,2011,44(1):84-92.  
Ji L,Zhang X Z,Li T X. Establishing fertilization recommendation index of paddy soil based on the “3414” field experiments in the Middle of Sichuan Hilly Regions [J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(1):84-92. (in Chinese)

[9] 杨莉琳,贾良良,胡春胜,等. 太行山山前平原冬小麦-夏玉米推荐施肥指标的修正 [J]. 农业工程学报,2007,23(11):89-94.  
Yang L L,Jia L L,Hu C S,et al. Revision of fertilizer recommendation for wheat and maize rotation in Taihang piedmont of North China [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(11):89-94. (in Chinese)

[10] 孙义祥,郭跃升,于舜章,等. 应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系 [J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1):197-203.  
Sun Y X,Guo Y S,Yu S Z,et al. Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the

- “3414” field experiments [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2009, 15(1): 197-203. (in Chinese)
- [11] 付莹莹, 同延安, 赵佐平, 等. 陕西关中灌区夏玉米土壤养分丰缺及推荐施肥指标体系的建立 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 88-93.
- Fu Y Y, Tong Y Y, Zhao Z P, et al. The establishment of soil nutrient abundance and fertilizer recommendation index system for summer maize in Guanzhong irrigation areas, Shaanxi Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 88-93. (in Chinese)
- [12] 李文彪, 郑海春, 郜翻身, 等. 内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1327-1334.
- Li W B, Zheng H C, Gao F S, et al. Study on index of fertilizer recommendation for spring wheat in Hetao irrigated area [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2011, 17(6): 1327-1334. (in Chinese)
- [13] 张明, 同延安, 郭俊伟, 等. 陕西关中小麦/玉米轮作区氮肥用量及施氮现状评估 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(4): 153-164.
- Zhang M, Tong Y A, Guo J W, et al. Determination of reasonable nitrogen use and evaluation of application status in wheat/maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi Province [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(4): 153-164. (in Chinese)
- [14] 张鹏, 刘瑞, 王天泰, 等. 周至县冬小麦氮磷钾肥肥效及适宜用量 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19(8): 121-125.
- Zhang P, Liu R, Wang T T, et al. Effects optimum application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yields of winter wheat in Zhouzhi Country [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(8): 121-125. (in Chinese)
- [15] 慕芳, 殷振江, 段长林, 等. 长武小麦对氮磷钾肥的利用效果及推荐施肥量的研究 [J]. *陕西农业科学*, 2010(6): 6-9.
- Mu F, Yin Z J, Duan C L, et al. Study on effect of wheat on the utilization of nitrogen, phosphorus and potassium of wheat and fertilizer recommendation in Changwu Country [J]. *Shaanxi Agricultural Sciences*, 2010(6): 6-9. (in Chinese)
- [16] Williams J D, Crozier C R, White J G, et al. Illinois soil nitrogen test predicts southeastern US corn economic optimum nitrogen rates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3): 735-744.
- [17] Olf H W, Blankenau K, Brentrup F, et al. Soil and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 2005, 168(4): 414-431.
- [18] Scharf P C. Soil and plant tests to predict optimum nitrogen rates for corn [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(6): 805-826.
- [19] Chen Q, Zhang H Y, Li X L, et al. Use of a modified N-expert system for vegetable production in the Beijing region [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(3): 475-487.
- [20] Attanandana T, Verapattananirund P, Yost R. Refining and disseminating site-specific nutrient management technology in Thailand [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(2): 291-297.
- [21] Saleque M A, Naher U A, Choudhury N N, et al. Variety-specific nitrogen fertilizer recommendation for lowland rice [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(13/14): 1891-1903.
- [22] Liu X J, Ju X T, Chen X P, et al. Nitrogen recommendations for summer maize in northern China using the N-min test and rapid plant tests [J]. *Pedosphere*, 2005, 15(2): 246-254.
- [23] Quaggio J A, Cantarella H, Van Raij B. Phosphorus and potassium soil test and nitrogen leaf analysis as a base for citrus fertilization [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(1): 67-74.
- [24] Peltovuori T. Precision of commercial soil testing practice for phosphorus fertilizer recommendations in Finland [J]. *Agricultural and Food Science in Finland*, 1999, 8(3): 299-308.
- [25] Anderson-Cook C M, Alley M M, Noble R, et al. Phosphorous and potassium fertilizer recommendation variability for two Mid-Atlantic coastal plain fields [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1740-1747.
- [26] Heckman J R, Jokela W, Morris T, et al. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the northeast USA [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(2): 280-288.
- [27] 陕西省咸阳市土壤普查办公室. 陕西省咸阳土壤 [M]. 陕西咸阳: 陕西省咸阳市土壤普查办公室, 1987.
- Shaanxi Province Xianyang City Office of Soil Survey. Shaanxi Province Xianyang soil [M]. Xianyang, Shaanxi: Shaanxi Province Xianyang City Office of Soil Survey, 1987. (in Chinese)
- [28] 张福锁. 测土配方施肥技术要览 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 93-110.
- Zhang F S. Survey of fertilizer recommendation [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 93-110. (in Chinese)
- [29] 赵振刚. 庄浪县冬小麦测土配方施肥指标研究 [J]. *甘肃农业科技*, 2009(7): 30-33.
- Zhao Z G. Study on index of fertilizer recommendation for wheat in Zhuangliang Country [J]. *Gansu Agr Sci and Techn*, 2009(7): 30-33. (in Chinese)
- [30] 唐润林. 太原市应用测土配方施肥效果研究 [J]. *农业技术与装备*, 2009, 170(7): 10-11.
- Tang R L. Study on the application of fertilizer recommendation in Taiyuan City [J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2009, 170(7): 10-11. (in Chinese)
- [31] 张贤辉. 淮南市小麦施肥指标体系研究 [J]. *现代农业科技*, 2010(10): 53-54.
- Zhao X H. Study on index of fertilizer recommendation for wheat in Huainan City [J]. *Modern Agr Sci and Techn*, 2010(10): 53-54. (in Chinese)