

## 山东省小麦施肥特征与评价

李健敏<sup>1</sup>, 赵庚星<sup>1</sup>, 李涛<sup>2</sup>, 肖杨<sup>1</sup>, 周雪<sup>1</sup>, 岳玉德<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; <sup>2</sup> 山东省土壤肥料推广总站, 济南 250100; <sup>3</sup> 青州市农业局, 山东青州 262500)

**摘要:**【目的】进入 21 世纪, 人口、资源、环境的矛盾日益突出, 中国农业生态环境面临多个方面的严峻挑战, 施肥对环境的影响受到越来越多的关注。山东省是中国北方典型的高投入高产集约农业区, 对该省施肥状况的研究分析, 对全国农作物施肥管理具有参考借鉴作用。论文针对山东省主要粮食作物——冬小麦的施肥状况进行系统分析, 旨在理清其施肥特征与问题, 为冬小麦的施肥决策与管理提供科学依据。【方法】以山东省测土配方施肥项目数据和统计资料为数据源, 采用调查分析与统计分析相结合的方法, 摸清小麦施肥现状及特征, 并通过 MATLAB 建模分析建立最佳施肥模型, 明确小麦施肥参数。【结果】2015 年山东省冬小麦化肥消耗系数 ( $Fec$ ) 较 2010 年减少了 5.71%。冬小麦氮、磷、钾肥的平均施用量高于全国平均水平, 施用比例存在磷肥比重较大, 钾肥比重不足的状况。冬小麦基肥与追肥中多元素肥料占比增加, 单质肥料占比总体减少。全省施肥总量、氮肥、磷肥的施用量呈自西向东递减的趋势, 皆为鲁西和鲁北平原区最高, 鲁东丘陵区最低。钾肥的施用量则与之相反。潮土地区小麦施氮、磷量最高, 其次为砂姜黑土、褐土和棕壤, 盐碱土区较低, 钾素的投入则以棕壤最高, 其次为砂姜黑土和褐土, 盐碱土和潮土区钾素投入量较少。氮磷钾肥施用量与土壤全氮、有效磷和速效钾含量之间存在一定的不匹配状况, 可适当增加东部丘陵区氮素用量, 减少高产区肥料投入, 增加低产区施肥水平。山东省以产量为目标的冬小麦氮磷钾肥最佳施用量分别为 182.02、82.58 和 83.22 kg·hm<sup>-2</sup>, 与此相比, 目前氮肥、磷肥分别超 25.60 kg·hm<sup>-2</sup> 和 37.77 kg·hm<sup>-2</sup>, 钾肥亏 3.84 kg·hm<sup>-2</sup>。【结论】山东省冬小麦施肥状况正在向良性发展, 但仍存在施肥量偏高, 施肥方式及比例不够合理问题。

**关键词:** 冬小麦; 施肥特征; 分析评价; 化肥消耗系数; 山东省

## The Characteristics and Evaluation of Wheat Fertilization in Shandong Province

LI JianMin<sup>1</sup>, ZHAO GengXing<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, XIAO Yang<sup>1</sup>, ZHOU Xue<sup>1</sup>, YUE YuDe<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong; <sup>2</sup> Soil and Fertilizer Extension Station of Shandong Province, Ji'nan 250100; <sup>3</sup> Qingzhou Agricultural Bureau, Qingzhou 262500, Shandong)

**Abstract:**【Objective】Entering the 21st century, the contradiction of population, resources and environment is becoming more and more prominent, and Chinese agriculture is facing a serious challenge in many aspects. Shandong Province is a typical intensive agricultural area of high investment and high output in northern China. The agricultural development in Shandong Province has set a template for other provinces. The research and analysis of the fertilization status in this province can play a certain role of predictive and early warning in the management of crop fertilization in the whole country. This study analyzed the fertilization status of winter wheat in Shandong Province, aiming to provide scientific basis for the macro management of winter wheat fertilization, which has practical and wide significance.【Method】The fertilization status and characteristics of wheat were clarified by using investigation analysis and statistics analysis based on the data and statistics of Soil Testing Formula Applying Fertilizer Project in Shandong Province. Then the optimal fertilization model was established and the fertilization parameters of

收稿日期: 2017-10-10; 接受日期: 2018-01-28

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划 (2015BAD23B0202)、“双一流”奖补资金 (SYL2017XTTD02)

联系方式: 李健敏, Tel: 18854807502; E-mail: ljmn18854807502@163.com。通信作者赵庚星, Tel: 13345283157; E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

wheat were identified with MATLAB modeling and analysis.【Result】In 2015, fertilizer expend coefficient ( $Fec$ ) of winter wheat in Shandong Province declined 5.71% compared to 2010. The average fertilizer amount of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat was higher than the national average. The proportion of phosphate fertilizer was excessive and the proportion of potassium fertilizer was inadequate. The multi-element fertilizer ratio of basal and topdressing in winter wheat was increased, while the straight fertilizer ratio was decreased. For the total provincial fertilization, nitrogen and phosphorus were declined from west to east; the western and northern plain of Shandong were the highest; the eastern hilly area of Shandong Province was the lowest; the potassium was on the contrary. The nitrogen and phosphorus fertilization were the highest in fluvo-aquic soil, followed by Shajiang black soil, cinnamon soil and brown soil; saline-alkali soil was at a lower rate; potassium fertilization was the highest in brown soil, followed by Shajiang black soil and cinnamon soil; saline-alkali soil and fluvo-aquic soil were at a lower rate. There is a mismatching situation between NPK fertilization and total N, available P, rapidly available K. It could appropriately increase the amount of nitrogen in the eastern hilly area, reduce fertilization input in the high-yield area, and increase fertilization input in low-yield area. With the target of yield, the optimal fertilization application of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat was 182.02, 82.58 and 83.22 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, in Shandong Province. By contrast, the nitrogen and phosphorus were overstepped 25.60 kg·hm<sup>-2</sup> and 37.77 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. And potassium was short of 3.84 kg·hm<sup>-2</sup>.【Conclusion】The present situation of winter wheat fertilization in Shandong province is making the benign developments. But there still exist many problems, such as the amount of fertilizer is too high and the way and proportion of fertilization are not reasonable. The results of this research have positive significance to rational fertilization, resources conservation and environmental protection of winter wheat in Shandong province.

**Key words:** winter wheat; fertilization characteristics; analysis and evaluation; fertilizer expend coefficient; Shandong Province

## 0 引言

【研究意义】化肥是粮食增产的基础,世界农业的发展证明化肥是最快、最有效、最重要的增产措施<sup>[1]</sup>。中国近现代农业的发展史也充分表明,没有化肥等农业生产资料的投入,便不可能有今天十几亿人口的丰衣足食。基于人多地少的基本国情,中国必须在有限的耕地上,进一步提高粮食单产和总产来满足生活、生产需求<sup>[2-3]</sup>。因此,随着对粮食需求的进一步增加,必然会增加化肥需求,但是在化肥带来增产的同时,肥料的正反两方面作用已逐渐被人们所认识,即肥料既是作物高产优质的物质基础,又是潜在的环境污染因子,不合理施肥就可能污染环境。当前,由于过量施肥引起了一系列的资源浪费和环境污染问题,施肥的增产效率也在逐渐下降。因此,如何通过施肥达到养分供应和作物需求的时空一致性,实现作物高产和环境保护相协调,提高化肥的养分利用率成为关乎资源、环境和粮食安全的重要问题<sup>[4-7]</sup>。【前人研究进展】自20世纪80年代末以来,发达国家已经开始重视化肥施用行为及其引发的农业面源污染问题,并对农业生产中过量施肥造成的负外部性做出相应的调整。发达国家化肥施用量呈现出了先快速增长、达到峰值后保持稳中有降或持续下降的趋势,逐步走上了减肥增效、高产高效的可持续发展之路。DOBERMANN

等<sup>[8]</sup>2002、2005和2007年对欧洲、美洲、亚洲(不含中国)和非洲850个田间试验结果进行了较全面的分析,结果表明,在小麦田间试验条件下,1 kg化肥氮素(N)的农学效率为欧洲21 kg,美洲20 kg,亚洲22 kg,非洲14 kg。研究还表明化肥氮素的气态损失和流失占施肥总量的30%—35%。LADHA等<sup>[9]</sup>的研究发现,全球小麦平均氮肥偏生产力为44 kg·kg<sup>-1</sup>,中国小麦氮肥偏生产力水平整体偏低,低于世界平均水平。RAUN等<sup>[10]</sup>在变量施肥提高粮食生产氮素利用效率的研究中发现,目前中国施氮量过多,氮肥利用率低于世界水平,造成氮的严重流失。CASSMAN等<sup>[11]</sup>对农业生态系统中氮素利用效率的研究表明,从氮肥农学效率和氮肥利用率两个指标看,中国试验条件下的水稻、小麦和玉米氮肥利用率与世界三大作物主产区农户常规施肥和管理条件下的氮肥利用率平均水平相当,却远远低于其他国家和地区在试验条件下所得到的20—25 kg·kg<sup>-1</sup>的氮肥农学效率和40%—60%的氮肥利用率。BOCKMAN等<sup>[11]</sup>在肥料利用率方面的研究表明,较低的肥料利用率和生产力会促使化肥需求增长,不仅带来极大的资源压力,且化肥的过量施用对环境产生负面效应。此外,美国农业部资料表明,美国河流、湖泊污染的60%归因于过度施肥的径流损失<sup>[12]</sup>。王旭等<sup>[13]</sup>对中国主要生态区小麦施肥增产效应进行研究,结果表明各区域施肥量增加幅度在44.7%

—131.0%，地区之间差异明显，黄淮海区、长江中下游区高于北部高原区和西北区，各区氮肥施肥量增加比重最大，占到施肥总量增加幅度的 48.0%—70.0%，钾肥用量仍然较少。谭德水等<sup>[14]</sup>对中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征进行了研究，得出氮肥用量偏大、氮磷钾比例不够合理，有机肥投入不足和施肥方法不够科学的结论。赵护兵等<sup>[15]</sup>对西北典型区域旱地冬小麦农户施肥进行调查，发现氮肥施用过量，磷肥偏多和不足并存，钾肥重视不足，化肥偏多、有机肥偏少，基肥偏多、追肥偏少等问题。常艳丽等<sup>[16]</sup>对陕西关中平原小麦-玉米轮作体系施肥现状做了调查与评价，指出该地区冬小麦施氮量适中农户占 33.6%，施氮很低农户占 3.5%，偏低农户占 7.6%，偏高农户占 16.8%，很高农户占 38.5%。在减量施肥方面，赵亚南等<sup>[17]</sup>在四川盆地进行了大田试验，得出与习惯施肥相比，减量施肥下肥料利用率提高，土壤磷素盈余降低，土壤氮素亏缺的结论。刘兆辉等<sup>[18]</sup>对氮肥减量施用技术及其对作物产量影响等的研究表明，氮肥减量施用技术在保证作物高产和兼顾环境友好方面有明显作用。山东省是中国的农业大省，也是化肥和有机肥料生产和消费的大省，对山东省农作物施肥情况的详细调查和研究始于 20 世纪。马文奇等<sup>[19]</sup>于 1999 对山东省粮食作物的施肥情况进行了较为详细的调查，得出了小麦和玉米轮作模式下化肥养分投入量过大的结论。在随后的几年里，初明光<sup>[20]</sup>和李俊良<sup>[21]</sup>等分别对山东省粮食作物化肥的投入情况和华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系中的施肥情况进行了调查，重点对农田养分平衡状况和化肥的投入品种结构进行了分析。2004 年宋海燕等<sup>[22]</sup>通过对山东省小麦玉米轮作体系养分平衡研究，表明氮素、磷素处于盈余状态，钾素处于亏缺状态。2006 年叶优良等<sup>[23]</sup>对山东省肥料施用状况进行了研究，重点对新中国成立以来山东省养分投入与产出情况进行了分析。2015 年刘钦普等<sup>[24]</sup>针对山东省化肥使用时空分异及潜在环境风险作出评价，指出山东省的化肥使用明显过量，过量的化肥使用存在较为严重的环境污染风险。【本研究切入点】总体看，前人的研究多数以田间试验和农户调查为主要研究手段，对在不同作物上化肥的分配和平衡情况、肥料在不同作物间的分配去向以及作物的投肥合理与否分析得较多。本文试图采用统计资料和农户调查相结合的方法，从省域角度对山东省近年冬小麦养分投入结构、比例、数量和平衡情况进行系统分析。【拟解决的关键问题】通过系统分析，摸清山东省小麦施肥现状、特征与问题，

旨在为山东省小麦的施肥管理，进一步提高肥料资源利用效率提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山东省地处华北平原，是中国主要的农业生产区之一，属于暖温带半湿润季风气候区，气候温和，四季分明。全省年平均气温 11—14℃，年平均降水量 550—950 mm，无霜期为 180—220 d。山东省位于中国自西向东三级地势阶梯中的最低一级，地貌类型主要有山地、丘陵和平原，其地势中部高四周低，水系呈中心放射状分布。根据区域地质构造、地貌成因和形态特征以及区域完整性，全省地貌区可分为鲁西北平原区、鲁中南山地丘陵区 and 鲁东丘陵区。据统计（中国统计年鉴，2015），山东耕地灌溉面积  $490.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，占全国耕地灌溉面积（ $6\,453.95 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ）比重 7.60%。全省化肥用量为  $468.08 \times 10^4 \text{ t}$ ，占全国化肥用量（ $5\,995.94 \times 10^4 \text{ t}$ ）的 7.81%。可见，山东省是中国北方典型的高投入高产集约农业区，该地区粮食作物一般实行一年两熟制，其中冬小麦、夏玉米轮作是主要的轮作方式。冬小麦是山东省播种面积最大的粮食作物，2015 年山东省小麦的栽培面积（ $374.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ）和总产量（ $2\,263.84 \times 10^4 \text{ t}$ ）仅次于河南（ $540.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ， $3\,329.00 \times 10^4 \text{ t}$ ），居全国第二位。北方冬麦区为秋季播种，需经历冬前出苗、分蘖、越冬、返青、起身、拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆，直至成熟，生育期长，是需肥较多的作物之一。因此，冬小麦生产直接关系到山东省的粮食安全和小麦产区的农业增效与农民增收。

### 1.2 数据来源

本文研究数据来源于 2015 年中国统计年鉴、2000—2015 年山东统计年鉴、山东省第 2 次全国土壤普查的部分数据和山东省测土配方施肥项目。从中国统计年鉴和山东统计年鉴收集全国及山东省近几年冬小麦种植面积、总产、单产等数据资料。山东省第 2 次全国土壤普查始于 1979 年初，普查范围覆盖全省，共挖土壤剖面 16.7 万个，采集土壤比样标本 16.7 万盒，农化样 14.5 万个，理化分析 162.5 万项次<sup>[25]</sup>。山东省测土配方施肥项目数据包含空间数据和属性数据两部分，空间数据包括山东省各市点位图及其行政区划图，属性数据包括各点位的土地利用类型、土壤类型、土壤养分含量以及氮磷钾肥的施用量等。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 数据处理与统计分析** 由于样本量较大,为保证数据的正确、可靠,本研究对异常数据进行了剔除,从而筛选出客观有效的基础数据。根据统计年鉴并结合山东省测土配方施肥项目数据,统计山东省 2000—2015 年部分年份的冬小麦生产及施肥数据,包括种植面积、产量、施肥种类、施肥量、施肥时期等。通过不同年份各类数据的对比,分析冬小麦氮磷钾的施用比例、基肥与追肥投入关系、施肥次数、不同区域和土壤类型的施肥差异以及土壤养分与施肥量的关系,达到总结冬小麦施肥现状、探究冬小麦施肥趋势的目的。其中化肥养分的计算单质肥料按各肥料养分含量标准计算,复合肥与专用肥按实际调查记录值计算,有机肥按《中国有机肥养分志》折算。化肥利用效率用化肥消耗系数( $Fec$ )反映,化肥消耗系数( $Fec$ )通过单位农产品化肥消耗量表示<sup>[26-29]</sup>,统计数据采用 Excel 进行数据处理和绘图。

化肥消耗系数( $Fec$ )的计算公式为:

$$Fec = \frac{Faua}{Og}$$

式中, $Fec$ 为化肥资源消耗系数, $Faua$ 为年度化肥投入量,单位为 kg, $Og$ 为粮食总产量,单位为 kg。

**1.3.2 MATLAB 建模分析** 通过 MATLAB 数据建模功能,对冬小麦产量与氮磷钾肥施用量进行相关性分析,用二次多项式拟合<sup>[30]</sup>,分别得到冬小麦产量与总施肥量及氮磷钾肥施用量的关系模型,完成相关的定量化分析,取得最佳施肥量、最佳产量等相关参数。

## 2 结果

### 2.1 小麦面积、产量与化肥消耗

2010—2015 年山东省小麦播种面积、总产和单产均实现稳步递增(图 1)。2015 年山东省小麦播种面积为  $379.98 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,较 2010 年( $356.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$ )增长了 6.68%。2015 年山东省小麦总产量为  $2\,346.60 \times 10^4 \text{ t}$ ,较 2010 年( $2\,058.60 \times 10^4 \text{ t}$ )增长了 13.99%。2015 年山东省小麦单产为  $6176 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较 2010 年( $5\,780 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )增长了 6.85%。小麦化肥消耗系数在 2010—2015 年呈现先增后减状态,在 2013 年,山东省小麦化肥消耗系数达到最大值,为  $0.090 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,2015 年山东省小麦化肥消耗系数则降为  $0.066 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相比于 2010 年减少了 5.71%。一方面,表明化肥作为农业生产中的一项重要资源,对山东省粮食增产起到了至关重要的作用;另一方面,山东省小麦生产中化肥利用效率先降低后增加,说明化肥养分利用效率有提高的趋势。

### 2.2 小麦养分投入数量与比例

通过对 2000 年至 2015 年山东省小麦氮磷钾肥平均施用量及比例(表 1)统计分析发现,全省氮肥的平均施用量逐渐减少,磷肥的施用量先减后增,钾肥的施用量逐年增加。2015 年氮肥施用量较 2000 年减少了 17.56%,磷肥施用量减少了 6.81%,钾肥施用量增加了 111.68%。小麦氮磷钾肥平均施用量高达  $407.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较黄淮海小麦主产区平均施肥量  $383.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  高出  $24.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远高于 2015 年全

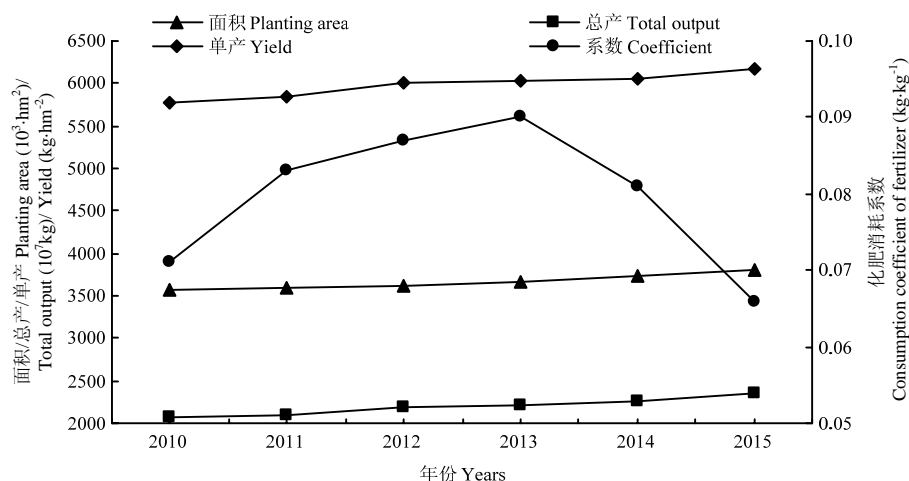


图 1 2010—2015 年山东省小麦面积、总产、单产及化肥消耗系数

Fig. 1 The area, total output, yield and fertilizer expend coefficient of winter wheat in Shandong Province from 2010 to 2015

表 1 山东省小麦氮磷钾肥平均施肥量及比例  
Table 1 N, P, K average fertilizing amount and proportion of winter wheat in Shandong Province

年份 Years	样本数 Number of samples	平均施肥量 Average fertilizer amount (kg·hm <sup>-2</sup> )			氮磷钾施用比例 N, P, K application proportion
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
2000	798	251.85	129.15	37.50	1 : 0.51 : 0.15
2005	2525	243.20	122.36	45.30	1 : 0.50 : 0.19
2010	17255	230.85	116.85	57.90	1 : 0.52 : 0.25
2015	183914	207.62	120.35	79.38	1 : 0.58 : 0.38

国农作物平均施肥量 361.99 kg·hm<sup>-2</sup>，大大超出发达国家设置的 225 kg·hm<sup>-2</sup> 的安全施肥量上限。从各时期氮磷钾养分的施用比例看，磷钾肥养分的比重均有增加的趋势，到 2015 年山东省小麦氮磷钾平均施用比例为 1 : 0.58 : 0.38（黄淮海小麦主产区比例为 1 : 0.56 : 0.29），逐渐向合理的 1 : 0.45 : 0.45 比例靠近，但磷肥比重明显过大，钾肥比重尚显不足。

2.3 小麦肥料投入种类与施肥时期

冬小麦不同生育时期的需肥量不同，冬前分蘖期吸收养分较多，越冬时吸收养分较少，返青后则需吸收大量养分，拔节到开花期是冬小麦吸收养分的高峰期。施足底肥，可以促进冬小麦壮苗早发、根系生长和冬前一定数量的健康分蘖，并为春后生长成穗、增

粒、增重打下基础。返青期小麦春季分蘖开始发生，此期的施肥可巩固冬前大分蘖，控制春季无效分蘖，保持群体稳健发展。拔节期是冬小麦生殖生长和营养生长并进时期，对养分需求量较大。

2005、2010 和 2015 年大样本调查小麦基肥、追肥结构情况见表 2、3、4。从表 2 的山东省小麦基肥投入情况看，2010 年基肥以复混（合）肥、配方肥和磷酸二铵为主，复混（合）肥、配方肥用量占到了基肥总量的 70.5%，磷酸二铵占 10.8%，其他品种均占 10% 以下。与 2005 年相比复混（合）肥占比增加 14.8%，配方肥占比增加 18.3%，增幅最大。而碳酸氢铵占比减少 20.2 个百分点，减幅最大，过磷酸钙占比减少 9.6 个百分点，磷酸二铵占比减少 5.2 个百分点，钾肥占比减少 1.6 个百分点。

表 2 山东省小麦基肥投入种类  
Table 2 Base fertilizer varieties of winter wheat in Shandong Province

基肥品种 Base fertilizer varieties	2005 年 (n=5520)		2010 年 (n=17255)	
	实物量 Actual volume (kg)	占比 Proportion (%)	实物量 Actual volume (kg)	占比 Proportion (%)
配方肥 Formula fertilizer	7748.0	2.3	147934.6	20.6
尿素 Urea	9884.0	3.0	24696.1	3.4
磷酸二铵 Diammonium phosphate	53237.6	16.0	77118.4	10.8
过磷酸钙 Calcium superphosphate	36982.5	11.1	11069.0	1.5
复混（合）肥 Compound (combined) fertilizer	117012.6	35.1	357576.3	49.9
硫酸钾 Potassium sulphate	4357.0	1.3	2648.8	0.4
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	98674.5	29.6	67177.7	9.4
氯化钾 Potassium chloride	4407.5	1.3	4160.8	0.6
其他 Other	1178.5	0.4	24135.0	3.4
合计 Total	333482.2	100.0	7165167	100.0

从表 3 的追肥情况看，2010 年以尿素、复混（合）肥和配方肥为主，部分农民施用磷酸二铵、碳酸氢铵和其他肥料。追肥中尿素、复混（合）肥和配方肥三者用量占到了基肥总量的 90.2%，其他占比稍大的品种为磷酸二铵占 5.9%，其他品种均在 3% 以下。与 2005

年相比，复混（合）肥占比增加 13.3%，配方肥占比增加 9.5%，磷酸二铵占比增加 5.0%。而尿素占比减少 24.4 个百分点，碳酸氢铵占比减少 3.2 个百分点。可见，与 2005 年相比，山东省基肥与追肥中多元素肥料占比明显增加，单质肥料占比总体减少。2005 年山

东省冬小麦基肥与追肥比例为 1 : 0.21, 2010 年该比例变为 1 : 0.42, 追肥的比重明显增加。

从表 4 基肥、追肥情况对比来看, 超过一半的农户在冬小麦全生长期内只施基肥, 而不追肥, 基肥实物量占比高达 70.68%。有 44.13%的农户在小麦返青一起身期间进行一次追肥, 仅有 4.56%的农户追肥二、三次。

表 3 山东省小麦追肥投入种类

Table 3 Topdressing fertilizer varieties of winter wheat in Shandong Province

追肥品种 Topdressing varieties	2005 年 (n=4500)		2010 年 (n=13575)	
	实物量 Actual volume (kg)	占比 Proportion (%)	实物量 Actual volume (kg)	占比 Proportion (%)
配方肥 Formula fertilizer	1267.0	1.8	33612.7	11.3
尿素 Urea	61273.6	85.7	182759.0	61.3
磷酸二铵 Diammonium phosphate	676.0	0.9	17697.3	5.9
过磷酸钙 Calcium superphosphate	170.0	0.2	1371.5	0.5
复混(合)肥 Compound (combined) fertilizer	3072.2	4.3	52411.5	17.6
硫酸钾 Potassium sulphate	30.0	0.0	262.3	0.1
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	4217.5	5.9	8202.3	2.7
氯化钾 Potassium chloride	50.0	0.1	87.0	0.0
其他 Other	705.0	1.0	1977.5	0.7
合计 Total	71461.4	100.0	298381.1	100.0

表 4 山东省小麦基肥、追肥投入量对比

Table 4 The comparison between base fertilizer and topdressing of winter wheat in Shandong Province

施肥次数 Times	施肥时期 Time	农户 Farmer		肥料 Fertilizer	
		户数 Number	占比 Proportion (%)	实物量 Actual volume (kg)	占比 Proportion (%)
只施基肥 Only base fertilizer	播前 Before sowing	265793	51.31	16697560.91	70.68
追肥 1 次 Once	返青期—起身期 Reviving—erecting	228644	44.13	6452248.72	27.31
追肥 2 次 Twice	返青期—孕穗期 Reviving—booting	22647	4.37	442899.46	1.87
追肥 3 次 Three times	返青期—灌浆期 Reviving—filling	981	0.19	32834	0.14
合计 Total		518065	100	23625543.09	100

2.4 小麦施肥区域与土壤差异

2.4.1 小麦施肥区域差异 表 5 为山东省不同区域及 17 个地市小麦平均施肥量统计。17 个地市中, 聊城市小麦平均施氮量最高, 为 274.87 kg·hm<sup>-2</sup>。威海市小麦平均施氮量最低, 为 135.44 kg·hm<sup>-2</sup>。聊城市小麦磷肥平均施用量最高, 为 159.62 kg·hm<sup>-2</sup>。威海市磷肥平均施用量最低, 为 76.11 kg·hm<sup>-2</sup>。青岛市小麦钾肥平均施用量最高, 为 130.27 kg·hm<sup>-2</sup>, 东营市钾肥平均施用量最低, 为 48.16 kg·hm<sup>-2</sup>。从总施肥量看, 聊城市施肥总量最高, 为 491.23 kg·hm<sup>-2</sup>; 威海市施肥总量最低, 为 316.86 kg·hm<sup>-2</sup>。从不同区域看, 氮肥施用量由低到高的顺序为鲁东地区<鲁南地区<鲁中地区<鲁中南地区<鲁西和鲁北地区。磷肥施用量由低到高

的顺序为鲁东地区<鲁南地区<鲁中南地区<鲁中地区<鲁西和鲁北地区。钾肥施用量由低到高的顺序为鲁西和鲁北地区<鲁中地区<鲁中南地区<鲁南地区<鲁东地区。总施肥量由低到高的顺序为鲁东地区<鲁中地区<鲁南地区<鲁中南地区<鲁西和鲁北地区, 可见, 全省施肥总量、氮肥、磷肥的施用量呈自西向东递减的趋势, 皆为鲁西和鲁北平原区最高, 鲁东丘陵区最低。钾肥的施用量则与之相反, 鲁西和鲁北平原区最低, 鲁东丘陵区最高。

2.4.2 小麦施肥的土壤类型差异 图 2、3 为山东省 5 种主要土壤类型的小麦产量及其施肥情况。可以看出, 潮土地小麦平均产量最高, 为 6 717.45 kg·hm<sup>-2</sup>, 其次为褐土、砂姜黑土和棕壤, 盐碱土小麦平均产量

表 5 山东省不同区域及 17 个地市小麦平均施肥量（2015 年）  
Table 5 The average fertilizing amount of winter wheat in different regions and 17 cities in Shandong Province

区域 Region	市 City	施肥量 Fertilizing amount (kg·hm <sup>-2</sup> )			
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	合计 Total
鲁东地区 Eastern region of Shandong	威海 Weihai	135.44	76.11	105.31	316.86
	烟台 Yantai	187.18	102.39	111.27	400.84
	青岛 Qingdao	157.20	126.43	130.27	413.90
	平均 Average	159.94	101.64	115.62	377.20
鲁南地区 Southern region of Shandong	日照 Rizhao	145.66	117.87	120.54	384.07
	临沂 Linyi	212.19	94.75	87.06	394.00
	平均 Average	178.93	106.31	103.80	389.04
鲁中南地区 Central-southern region of Shandong	枣庄 Zaozhuang	205.42	105.40	95.55	406.37
	泰安 Taian	243.23	129.60	85.31	458.14
	莱芜 Laiwu	195.52	116.52	72.56	384.60
	济宁 Jining	222.87	114.89	70.69	408.45
	平均 Average	216.76	116.60	81.03	414.39
鲁中地区 Central region of Shandong	淄博 Zibo	192.94	133.71	61.62	388.27
	济南 Jinan	173.95	120.91	54.04	348.90
	潍坊 Weifang	189.87	108.44	104.60	402.91
	平均 Average	185.59	121.02	73.42	380.03
鲁西和鲁北地区 Western and northern region of Shandong	滨州 Binzhou	200.09	125.42	53.13	378.64
	菏泽 Heze	235.82	128.08	62.53	426.43
	聊城 Liaocheng	274.87	159.62	56.74	491.23
	德州 Dezhou	263.19	125.65	60.10	448.94
	东营 Dongying	200.06	120.19	48.16	368.41
	平均 Average	234.80	131.79	56.13	422.72

最低，为 6 164.92 kg·hm<sup>-2</sup>。不同土壤类型农户氮、磷、钾肥投入差异较大，从调查的样本看，各土壤类型中小麦施氮量普遍偏高。潮土地区的小麦施氮量高达 238.80 kg·hm<sup>-2</sup>，其次为砂姜黑土、褐土和棕壤，盐碱土区小麦施氮量较低，为 180.03 kg·hm<sup>-2</sup>。各调查区小麦磷素投入量表现为中等偏高，其中以潮土地区最高，为 130.85 kg·hm<sup>-2</sup>，其次为褐土、砂姜黑土和棕壤，盐碱土区相对较低，为 100.96 kg·hm<sup>-2</sup>。钾素的投入情况则以棕壤最高，其次为砂姜黑土和褐土，盐碱土和潮土区钾素投入量较少，潮土区只有 64.89 kg·hm<sup>-2</sup>。

总体看，小麦产量较高的土壤类型其氮磷肥的投入水平也相应较高，反映了施肥对小麦产量提高的作用。

2.5 小麦施肥与土壤养分

2.5.1 按不同区域 图 4 为鲁东丘陵区、鲁中南山地丘陵区 and 鲁西北平原区 3 个区域内土壤全氮、有效磷、速效钾与对应的氮磷钾肥施用量情况。可以看出，鲁

东丘陵区土壤全氮含量最低，对应施氮量也最少，可适当增加氮肥的施用量，补充和提升土壤氮素含量水平。鲁中南山地丘陵区、鲁西北平原区土壤全氮含量与施氮量关系则相对合理。鲁东丘陵区 and 鲁中南山地丘陵区土壤有效磷含量较高，对应的施磷量较低，而鲁西北平原区土壤有效磷含量最低，对应的施磷量最高。因此，就土壤有效磷含量与施磷量而言，3 个地区均呈现较为合理的状态。从钾素看，鲁东丘陵区的土壤速效钾含量较低而施钾量较高，鲁中南山地丘陵区 and 鲁西北平原区的土壤速效钾含量较高而施钾量相对较低，钾肥的施用总体合理。由此看，就与土壤养分含量的关系而言，目前山东省除东部丘陵区氮素外，磷钾肥的施用基本合理。

2.5.2 按土壤类型 图 5 为山东省棕壤、褐土和潮土 3 种主要土壤类型全氮、有效磷、速效钾与对应的氮磷钾肥施用量情况。可以看出，棕壤区全氮含量与施

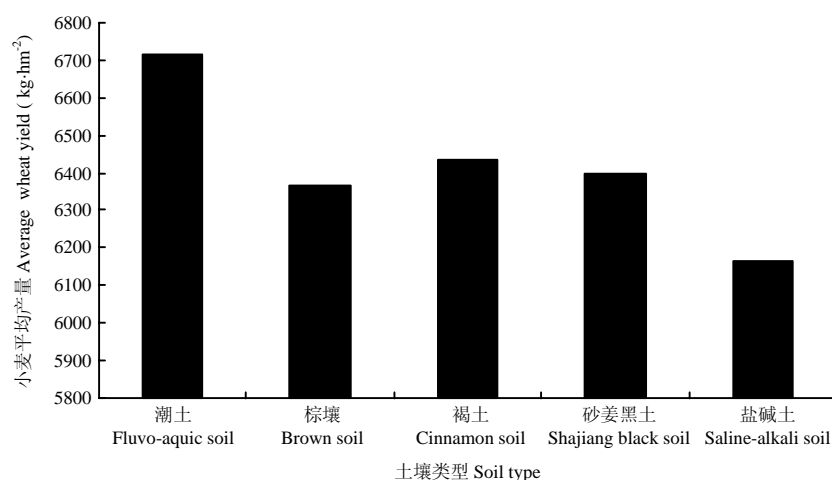


图2 2015年山东省不同土壤类型小麦平均产量

Fig. 2 The average yield of winter wheat in different soil types in Shandong Province in 2015

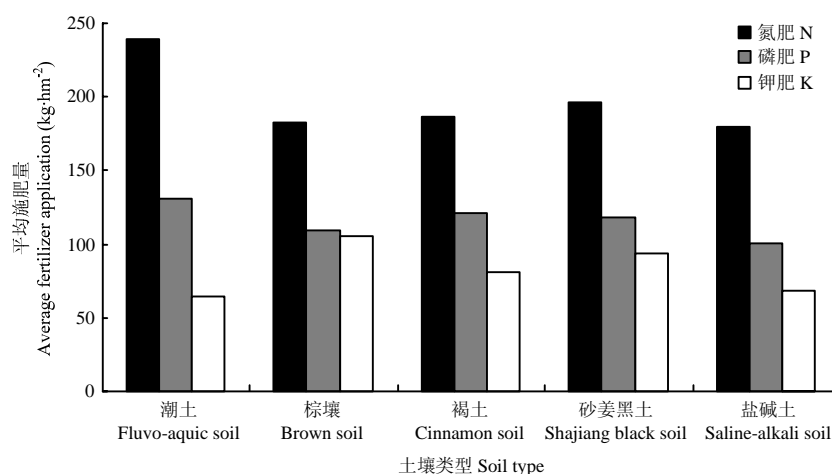


图3 2015年山东省不同土壤类型小麦平均施氮量、施磷量和施钾量

Fig. 3 N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O average fertilizing amount of winter wheat in different soil types in Shandong Province in 2015

氮量皆为最低，故棕壤区施氮量偏少。该区有效磷含量最高，速效钾含量最低，而施磷量最低，施钾量最高，磷钾施用较为合理。褐土区土壤氮磷钾含量相对较高，其各自的施肥量相对较低，基本合理；潮土区土壤全氮、有效磷含量较低而速效钾含量最高，该区施氮、磷量最高而钾最低，均较为合理。可见，就土壤有效磷、速效钾与对应的施肥量而言，3种土壤类型均呈现较为合理的状态。

**2.5.3 按小麦产量水平** 将山东省小麦种植区按照小麦产量划分为高产区、中产区和低产区。图6为不同产量水平下土壤全氮、有效磷、速效钾与对应的氮

磷钾肥施用量情况。可以看出，除中产区有效磷含量略高于高产区外，土壤全氮、速效钾含量均呈现由高产区到低产区逐渐减少的状况。同时，氮磷钾的施肥量也从高产区到低产区逐渐减少。整体表现为高产区—高土壤养分含量—高化肥投入，低产区—低土壤养分含量—低化肥投入的不合理状态。应适当减少高产区肥料投入，增加低产区施肥水平。

据此分析，虽然近年来山东省耕层土壤养分含量水平有所提高，但由于不同区域、土壤类型及耕作管理水平的差异，施肥结构仍不尽合理，用地与养地未能更有效结合，土壤肥力仍有较大提升空间。



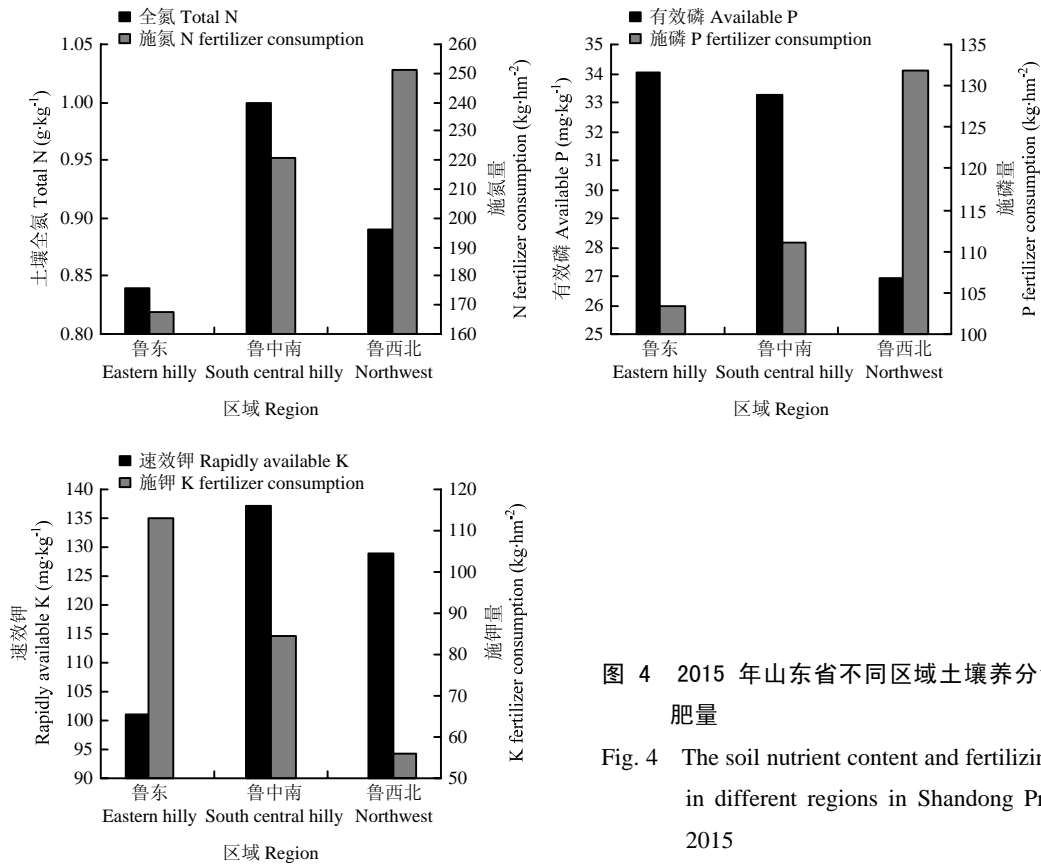


图 4 2015 年山东省不同区域土壤养分含量与施肥量

Fig. 4 The soil nutrient content and fertilizing amount in different regions in Shandong Province in 2015

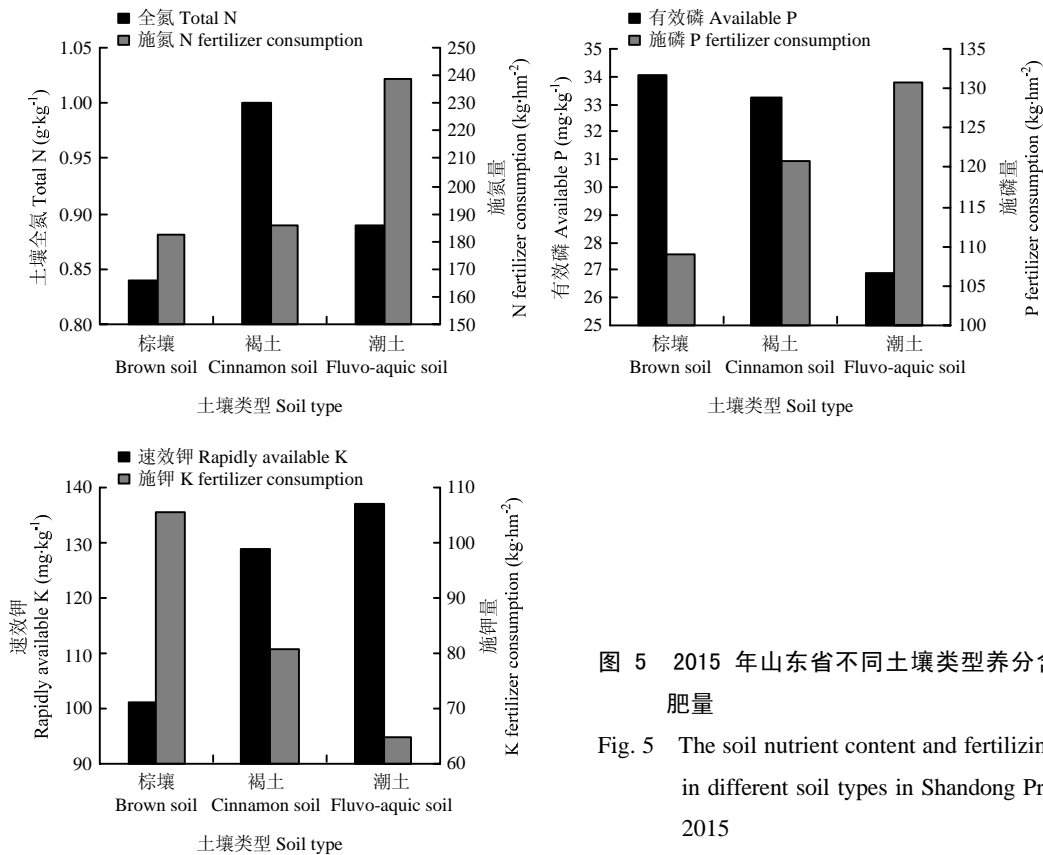


图 5 2015 年山东省不同土壤类型养分含量与施肥量

Fig. 5 The soil nutrient content and fertilizing amount in different soil types in Shandong Province in 2015

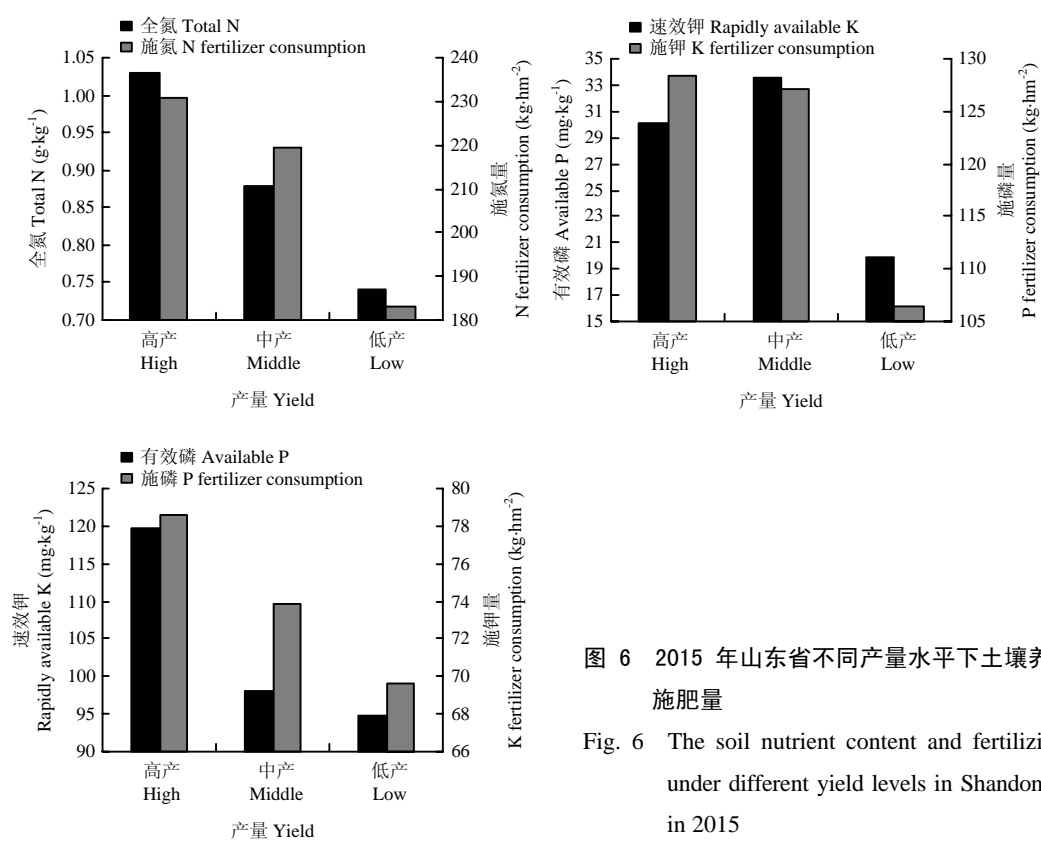


图 6 2015 年山东省不同产量水平下土壤养分含量与施肥量

Fig. 6 The soil nutrient content and fertilizing amount under different yield levels in Shandong Province in 2015

2.6 小麦最佳施肥模型

2.6.1 产量—施肥模型 设  $W=f(n, p, k)$  是小麦的产量与 3 种肥料施肥量之间的函数, 用二次多项式拟合该函数, 分别得到山东省小麦产量与总施肥量及与氮、磷、钾肥投入量的关系模型。

山东省小麦产量与施肥总量的关系模型为:

$$y=-0.3343x^2+17.9233x+352.9192$$

模型  $R^2$  为 0.8337, 达到了高度相关水平, 说明化肥的施用很好的促进了小麦的增产。由模型得到的全省最佳施肥总量为 402.11 kg·hm<sup>-2</sup>, 最高产量为 8 897.34 kg·hm<sup>-2</sup>。目前山东省氮磷钾肥施用总量为 407.35 kg·hm<sup>-2</sup>, 超出最佳施肥总量 5.24 kg·hm<sup>-2</sup>。

表 6 为山东省不同地区小麦产量与氮、磷、钾肥投入量关系模型及最佳施肥量、产量情况。全省不同

表 6 山东省不同地区施肥模型、最佳施肥量及产量

Table 6 The fertilization models, optimum fertilizing amount and yield in different areas in Shandong Province

地区 Region	施肥模型 Fertilization model	$R^2$	最佳施肥量与产量 Optimum fertilizing amount and yield (kg·hm <sup>-2</sup> )			
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	产量 Yield
鲁东地区 Eastern region of Shandong	$W=313.4207-1.6449N-2.2965P+18.1290K+0.4721NP-0.4730NK-0.5332PK+0.0543N^2+0.1335P^2-0.2421K^2$	0.8221	163.03	77.52	92.42	8975.37
鲁中南地区 Central-southern region of Shandong	$W=331.4515-1.45183N+7.0105P-1.6834K+0.0803NP+0.3605NK+0.2495PK-0.0067N^2-0.2552P^2-0.5780K^2$	0.8213	196.70	103.92	82.24	9491.71
鲁西北地区 Western and northern region of Shandong	$W=344.6330+0.5315N-0.2210P+2.7359K-0.0424NP-0.0652NK-0.0459PK+0.0095N^2+0.0530P^2-0.1076K^2$	0.8189	203.36	112.75	81.36	9869.19
山东省 Shandong Province	$W=329.7916-18.8363N+30.1188P+64.9666K-2.4579NP-4.5608NK-2.5704PK+3.3701N^2+2.2650P^2+1.2661K^2$	0.8105	182.02	82.58	83.22	9444.19

模型中的 N 为施氮量; P 为施磷量; K 为施钾量

N is the N fertilizer consumption; P is the P fertilizer consumption; K is the K fertilizer consumption

地区的施肥模型  $R^2$  范围在 0.8105—0.8221 之间, 均达到了高度相关水平。最佳施肥量方面, 鲁东地区氮肥、磷肥的最佳施肥量最低, 而钾肥的最佳施肥量最高。鲁西北地区氮肥、磷肥的最佳施肥量最高, 而钾肥最佳施肥量最低。鲁中南地区最佳施肥量介于二者之间。最佳施肥总量由低到高顺序为, 鲁东地区 < 鲁中南地区 < 鲁西北地区, 最佳产量顺序与该顺序一致。

**2.6.2 以产量为目标的最佳施肥量** 基于产量—施肥量模型, 全省小麦最高产目标下的施肥水平可归结为求函数  $W=f(n, p, k)$  的最大值。当 N、P 和 K 的取值分别是,  $N=182.02$ ,  $P=82.58$ ,  $K=83.22$  时, 冬小麦的产量最高, 最大值为  $9\,444.19\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与当前的全省平均施肥水平相比, 全省氮肥、磷肥均施用过量, 分别超  $25.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $37.77\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 产生肥料资源浪费, 而钾肥施用量略有不足。

**2.6.3 以效益为目标的最佳施肥量** 当小麦的售价是  $a$  (元/kg), 氮肥、磷肥和钾肥的售价分别为  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  (元/kg), 氮肥、磷肥和钾肥的施用量分别是 N、P、K ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 时, 小麦的产量是  $W=f(N, P, K)$ 。于是单位面积小麦因施肥所增加的收益  $M$  为:

$$M=[f(N, P, K)-f(0, 0, 0)]\times a-(b_1N+b_2P+b_3K)$$

模型归结为确定 N、P、K 的值, 使函数  $M$  达到最大值。2015—2017 年山东省小麦价格稳定在 2.40—2.70 (元/kg), 氮、磷、钾肥价格则稳定在 1.7—2.0 (元/kg), 用微分法可求得氮、磷、钾肥的施用量分别为 153.32、78.53 和  $75.32\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从求解的结果可以看出, 以效益为目标的最佳施肥量低于以产量为目标的最佳施肥量, 但除氮素外磷钾相差不大, 故可以用以产量为目标的最佳施肥量指导施肥。事实上, 农民在对农作物施肥时, 都是以产量最大化为目标考虑施肥, 较少系统考虑效益成本。

### 3 讨论

#### 3.1 山东冬小麦生产潜力

从调查分析结果来看, 2015 年山东省冬小麦化肥消耗系数比 2010 年减少了 5.71%。播种面积增加了 6.68%, 总产量增加了 13.99%, 单产只提高了 6.85%, 因此山东省小麦生产还需在提高化肥利用效率和单产等方面加大技术与示范推广。如鲁西黄灌区土壤肥力不均, 存在一定面积的盐碱地和荒地, 该区在扩大种植面积和提高单产方面均有较大的潜力, 应继续加强土壤改良和地力培肥。此外, 近几年山东省重点推广了小麦精量半精量播种技术、小麦宽幅精播高产

栽培技术、小麦冬春控旺防冻防倒技术、小麦深松少免耕镇压节水栽培技术、小麦生育后期“一喷三防”技术等, 这些技术都具备增产 5% 以上的潜力, 对山东省小麦增产发挥了重要作用<sup>[31]</sup>。但是目前部分新技术应用面积增长幅度较慢, 仍有较大潜力可挖。

#### 3.2 化肥施用与环境风险

中国肥料的当季利用率普遍很低, 仅为 30%。其中氮肥为 30%—35%, 磷肥为 10%—25%, 钾肥为 35%—50%, 不仅远低于欧美发达国家 60%—70% 的水平, 且近年来还有下降的趋势<sup>[32-35]</sup>。研究发现, 山东省冬小麦追肥比例上升明显, 且多元素肥料占比增加, 但多数农户仍采用表施和撒施, 或随大水漫灌冲施, 造成大量养分挥发和淋洗流失。同时, 由于氮磷肥料的集中过量施用, 使土壤团粒结构遭到破坏, 导致营养失调、土壤酸化、污染风险加大<sup>[36]</sup>。目前, 山东省属于重度化肥面源污染 ( $400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} < a \leq 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 的 8 个地区之一<sup>[37]</sup>, 既浪费了化肥资源, 增加了生产成本, 又使环境严重污染。

#### 3.3 施肥不平衡与有机肥投入

研究发现, 不同地区及土壤类型小麦施肥量差异较大。总体看, 磷/氮值经过近些年的调整基本趋于合理, 而钾/氮值一直较低, 存在一定程度的施肥不平衡现象。其中鲁东丘陵区施氮量偏低, 该地区以棕壤为主, 全氮平均含量较低, 为  $0.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (第 IV 等级)。对于棕壤等酸性土壤, 可施加硝酸钙、硝酸钠等碱性或生理碱性的氮肥进行调控。此外, 基于有机质含量与土壤氮肥含量的正相关关系, 可通过增施有机肥达到调控氮肥的目的。据卫星遥感分析, 山东省小麦高、中、低产田的比例分别为 54.3%、30.5% 和 15.2%<sup>[38]</sup>, 目前中低产田的面积仍占小麦总种植面积近 50%, 严重制约小麦单产的进一步提高。需进一步加大中低产田改造力度, 扩大秸秆还田面积, 增加有机肥投入, 不断提高土壤肥力, 扩大高产田面积。另外, 发达国家的历史经验表明, 有机养分占农田养分总投入比例在 50% 时, 农业产量目标、品质目标与环境目标更加协调, 农业发展健康可持续<sup>[37]</sup>。而根据对山东省 38 个县 7.8 万个农户的调查发现, 小麦田有机养分投入占比仅为 24.9%, 与此同时大量有机肥资源白白浪费。因此, 政府部门应制定有效的政策措施, 使肥料资源的分配更加合理化, 同时应继续落实稳氮控磷增钾方针, 大力发展机制灵活、方便的智能配肥企业, 提高肥料复合化率和配方肥比重。针对具体农户和地块, 应推广科学施肥技术、秸秆还田技术、增施有机肥等,

增加有机养分的投入比重。

尽管科学施肥技术已推广多年, 但大多数农民科学施肥意识和水平仍有待提高。在选用肥料品种、施肥时期及数量上存在盲目性, 不注意考虑土壤条件、肥力水平和作物需肥特性, 凭习惯或从众购肥与施肥。在认识上, 认为养分含量越高越好, 趋同性的选购 3 个 15% 或 40% 以上高浓度肥料, 盲目排斥中低浓度复混肥、普钙、钙镁磷等。在施肥行为上, 视高产为高效, 为确保高产, 不少农户施肥严重过量, 这与马文奇等的研究结果相一致<sup>[19]</sup>。

配方肥、缓控释肥是测土施肥技术的载体, 但推广进度较慢, 应适时启动缓控释肥肥料应用补贴试点, 同时对配方肥应用实行补贴。对经过有关部门认定的配方肥、缓控释肥生产企业, 可以在税收、贷款、运费等方面给予优惠, 加大对配方肥、缓控释肥等新产品的推广扶持力度。

## 4 结论

4.1 山东省冬小麦化肥消耗系数有所减小; 磷肥比重依然过大, 钾肥比重尚显不足。

4.2 基肥与追肥中多元素肥料占比增加, 追肥比例明显提高。

4.3 冬小麦施肥总量、氮肥和磷肥施用量呈自西向东递减的趋势, 钾肥则与之相反; 氮肥、磷肥投入以潮土区最高, 盐碱土地区最低, 钾肥投入以棕壤区最高, 盐碱土和潮土区较低。

4.4 鲁东丘陵区及棕壤区氮肥投入较全氮含量偏少; 在不同产量水平下则表现为高产区—高土壤养分含量—高化肥投入, 低产区—低土壤养分含量—低化肥投入的不合理状态。

4.5 与理论最佳产量施肥量相比, 当前氮肥、磷肥投入超量, 而钾肥投入不足; 最佳施肥总量由低到高顺序为, 鲁东地区<鲁中南地区<鲁西北地区, 最佳产量顺序与之相同。

## References

- [1] BOCKMAN O C, KAARSTAD O, LIE O H, RICHARDS I. *Agriculture and Fertilizers*. Norsh Hydro, Oslo: Agricultural Group, 1990.
- [2] HUANG J K, PRAY C, ROZELLE S. Enhancing the crops to feed the poor. *Nature*, 2002, 418(6898): 678-684.
- [3] 袁隆平. 依靠科技创新发展杂交水稻, 确保我国粮食安全. 中国农业科技导报, 2001, 3(2): 54-56.

YUAN L P. Develop hybrid rice depending on the innovation of science and technology to ensure the corn safety of our country. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(2): 54-56. (in Chinese)

- [4] 王激清, 马文奇, 江荣风, 张福锁. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析. 土壤通报, 2008, 39(2): 329-333.
- WANG J Q, MA W Q, JIANG R F, ZHANG F S. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice, wheat, maize in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2): 329-333. (in Chinese)
- [5] 许秀成, 张福锁. 养分资源综合管理与肥料创新-探索化肥行业发展之道. 磷肥与复肥, 2007, 22(3): 1-6.
- XU X C, ZHANG F S. The integrated management of nutrient resources and creativity on fertilizer field-seeking the development way of chemical fertilizer industry. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2007, 22(3): 1-6. (in Chinese)
- [6] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601-609.
- JIN J Y, LI J K, LI S T. Chemical fertilizer and food security. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, 12(5): 601-609. (in Chinese)
- [7] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 基于养分平衡和土壤测试的冬小麦氮素优化管理方法. 中国农学通报, 2005, 21(11): 211-225.
- ZHAO R F, CHEN X P, ZHANG F S. Study on nitrogen optimized management at different growing stage of winter wheat based on nutrient balance and soil test. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11): 211-225. (in Chinese)
- [8] ACHIM D, Kenneth G C. Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Science in China (Series C: Life Sciences)*, 2005, 48(S2): 745-758.
- [9] LADHA J K, PATHAK H, KRUPNIK T J, Six J, VAN K C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85-156.
- [10] RAUN W R, SOLIE J B, JOHNSON G V, STONE M L, MULLEN R W, FREEMAN K W, THOMASON W E, LUKINA E V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 815-820.
- [11] CASSMAN K G, DOBERMANN A, WALTERS D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31: 132-140.
- [12] NRC(National Research Council). *An Agenda for Agriculture*, Washington, DC: Nation Academy Press, 1989.
- [13] 王旭, 李贞宇, 马文奇, 张福锁. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2469-2476.

- WANG X, LI Z Y, MA W Q, ZHANG F S. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(12): 2469-2476. (in Chinese)
- [14] 谭德水, 刘兆辉, 江丽华. 中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征研究进展. *中国农学通报*, 2016, 32(12): 13-19.
- TAN D S, LIU Z H, JIANG L H. Fertilization history evolution and stage characteristics of winter wheat in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(12): 13-19. (in Chinese)
- [15] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 张卫峰. 西北典型区域旱地冬小麦农户施肥调查分析. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 840-848.
- ZHAO H B, WANG Z H, GAO Y J, ZHANG W F. Investigation and analysis of dryland winter wheat fertilizer application in northwest typical areas. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(4): 840-848. (in Chinese)
- [16] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 孙本华, 张树兰, 杨学云. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 51-61.
- CHANG Y L, LIU J M, LI Y H, SUN B H, ZHANG S L, YANG X Y. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 51-61. (in Chinese)
- [17] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 况福虹, 陈轩敬, 张跃强, 石孝均. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 864-873.
- ZHAO Y N, SU M M, LV Y, KUANG F H, CHEN X J, ZHANG Y Q, SHI X J. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 864-873. (in Chinese)
- [18] 刘兆辉, 薄录吉, 李彦, 孙明, 仲子文, 张英鹏, 井永苹. 氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述. *中国土壤与肥料*, 2016(4): 1-8.
- LIU Z H, BO L J, LI Y, SUN M, ZHONG Z W, ZHANG Y P, JING Y P. Effect of nitrogen fertilizer reduction on crop yield and ecological environment: a review. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(4): 1-8. (in Chinese)
- [19] 马文奇, 毛达如, 张福锁. 山东省粮食作物施肥状况的评价. *土壤通报*, 1999, 30(5): 217-218.
- MA W Q, MAO D R, ZHANG F S. Evaluation of methods for fertilizing food crops in Shandong Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(5): 217-218. (in Chinese)
- [20] 初明光, 王激清, 马文奇, 张福锁. 山东省粮食作物的化肥施用状况分析. *土壤肥料*, 2006(2): 12-15.
- CHU M G, WANG J Q, MA W Q, ZHANG F S. Analysis of fertilizer application on grain crops in Shandong Province. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(2): 12-15. (in Chinese)
- [21] 李俊良, 张瑞清, 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的农田养分平衡模式. *中国农业科技导报*, 2003, 5(增刊): 40-44.
- LI J L, ZHANG R Q, ZHAO R F, CHEN X P, ZHANG F S. A typical nutrients budget model for winter-wheat/summer-maize rotation system in North China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2003, 5(Suppl.): 40-44. (in Chinese)
- [22] 宋海燕, 叶优良, 曲日涛. 山东省粮食生产与肥料施用状况研究. *中国农学通报*, 2005, 21(9): 380-385.
- SONG H Y, YE Y L, QU R T. Study on grain production and fertilizer application in Shandong Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(9): 380-385. (in Chinese)
- [23] 叶优良, 杨晓梅, 曲日涛, 宋海燕, 崔振岭, 陈新平. 山东省肥料施用与养分平衡状况研究. *土壤通报*, 2006, 37(3): 501-504.
- YE Y L, YANG X M, QU R T, SONG H Y, CUI Z L, CHEN X P. Study on fertilizer application and nutrient balance in Shandong. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 501-504. (in Chinese)
- [24] 刘钦普, 林振山, 周亮. 山东省化肥使用时空分异及潜在环境风险评价. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 208-214.
- LIU Q P, LIN Z S, ZHOU L. Spatio-temporal differentiation and environmental risk assessment of fertilization in Shandong Province, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 208-214. (in Chinese)
- [25] 阎鹏, 徐世良. 山东土壤. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- YAN P, XU S L. *Shandong Soil*. Beijing: China Agriculture Press, 1994. (in Chinese)
- [26] 高祥照, 马文奇, 杜森, 张福锁, 毛达如. 我国施肥中存在问题的分析. *土壤通报*, 2001, 32(6): 258-261.
- GAO X Z, MA W Q, DU S, ZHANG F S, MAO D R. Current status and problems of fertilization in china. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(6): 258-261. (in Chinese)
- [27] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 许为钢, 胡琳, 李民. 长期定位施肥小麦的肥料利用率研究. *麦类作物学报*, 2006, 26(2): 121-126.
- HUANG S M, BAO D J, HUANGFU X R, XU W G, HU L, LI M. Long-term effect of fertilization on fertilizer use efficiency of wheat in soil. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(2): 121-126. (in Chinese)
- [28] 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 450-459.
- YAN X, JIN J Y, HE P, LIANG M Z. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency. *Scientia Agricultura Sinica*,

- 2008, 41(2): 450-459. (in Chinese)
- [29] 于法稳, 李来胜. 西部地区农业资源利用的效率分析及政策建议. 中国人口·资源与环境, 2005, (6): 35-39.
- YU F W, LI L S. Efficiency analysis of the utilization of agricultural resources and policy suggestions in west regions of China. *China Population, Resources and Environment*, 2005, (6): 35-39. (in Chinese)
- [30] 李园庭, 漆志鹏, 胡结梅. 经验公式与施肥效果分析的数学模型. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2008, 22(3): 5-11.
- LI Y T, QI Z P, HU J M. Empirical formula and mathematical modeling for the problem of fertilizer effect analysis. *Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences)*, 2008, 22(3): 5-11.
- [31] 王东, 鞠正春. 山东小麦生产发展潜力分析. 山东农业科学, 2013, 45(12): 99-103.
- WANG D, JU Z C. Analysis on development potential of wheat production in Shandong Province. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(12): 99-103. (in Chinese)
- [32] 杜昌文, 周健民. 控释肥料的研制及其进展. 土壤, 2002(3): 127-133.
- DU C W, ZHOU J M. Progress in study of controlled-release fertilizers(CRF). *Soils*, 2002 (3): 127-133. (in Chinese)
- [33] 张民, 杨越超, 宋付鹏. 包膜控释肥料研究与产业化开发. 化肥工业, 2005, 32(2): 7-13.
- ZHANG M, YANG Y C, SONG F P. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers. *Chemical Fertilizer Industry*, 2005, 32(2): 7-13. (in Chinese)
- [34] 许秀成, 李葭萍, 王好斌. 保障国家安全的新型肥料. 中国科技成果, 2004(7): 8-10.
- XU X C, LI D P, WANG H B. A new type of fertilizer for national security. *China Science and Technology Achievements*, 2004(7): 8-10. (in Chinese)
- [35] 夏循峰, 胡宏. 我国肥料的使用现状及新型肥料的发展. 化工技术与开发, 2011, 40(11): 45-48.
- XIA X F, HU H. Utilization present situation of fertilizers in china and new type of fertilizers. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2011, 40(11): 45-48. (in Chinese)
- [36] 杨歆歆, 赵庚星, 李涛, 万广华, 李萍. 山东省土壤酸化特征及其影响因素分析. 农业工程学报, 2016, 32(增刊): 156-160.
- YANG X X, ZHAO G X, LI T, WANG H, LI P. Characteristics of soil acidification and its influencing factors in Shandong Province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl.): 156-160. (in Chinese)
- [37] 尚杰, 尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究. 生态经济, 2016, 3(5): 196-199.
- SHANG J, YIN X Y. Study on the present situation and reduction of fertilizer non-point source pollution of China. *Ecological Economy*, 2016, 3(5): 196-199. (in Chinese)
- [38] 赵玉金, 赵红, 徐法彬, 刘文. 利用卫星遥感信息解译山东冬小麦产量类型分布. 气象科技, 2004, 32(1): 57-59.
- ZHAO Y J, ZHAO H, XU F B, LIU W. Interpretation for winter wheat yield type distribution in Shandong Province using satellite remote sensing data. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(1): 57-59. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)