

doi: 10.11838/sfsc.20170309

# 河北省低平原区近 16 年来农田施肥量、作物产量和养分效率的变化特征

贾良良<sup>1\*</sup>, 刘克桐<sup>2</sup>, 孙彦铭<sup>1</sup>, 杨云马<sup>1</sup>, 杨振立<sup>3</sup>, 黄少辉<sup>1</sup>, 杨军芳<sup>1</sup>

- (1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北 石家庄 050051;  
2. 河北省农业厅土壤肥料工作站, 河北 石家庄 050000;  
3. 河北省农林科学院, 河北 石家庄 050051)

**摘要:** 为阐明近 16 年来河北省低平原区农田养分管理措施对作物产量和养分效率的影响, 提高农田养分管理技术水平, 对 1998~2014 年在河北省开展的 6 个土壤肥力定位监测试验进行了统计分析。结果发现, 河北省低平原区小麦氮、磷、钾肥施用量一直维持在较高的水平, 年平均施用量分别为 315.2、199.5 和 173.2 kg/hm<sup>2</sup>。玉米施肥量逐年增加, 2014 年氮、磷、钾施用量分别为 247.0、69.8 和 128.5 kg/hm<sup>2</sup>。小麦、玉米施肥区产量分别较 1998 年提升了 40.7% 和 72.4%, 小麦无肥区没有明显增产, 玉米无肥区产量提高了 36.1%。施肥量增加对小麦产量没有明显的影响, 但对玉米产量增加有显著的促进作用, 其中氮素是影响玉米产量的最主要因素。小麦的氮肥偏生产力和农学效率因施肥量较高在过去 16 年间没有明显的变化, 而玉米则随时间和施肥量的增加呈下降趋势。土壤基础地力对小麦、玉米产量的贡献率呈逐年下降的趋势。

**关键词:** 长期定位监测; 施肥量; 土壤基础地力贡献率; 小麦; 玉米

**中图分类号:** S147.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-6257(2017)03-0050-06

河北省低平原区位于河北省中南部, 主要包括邢台、邯郸、衡水、沧州等地的平原区, 耕地面积约占全省三分之一, 是河北省重要的粮食产区<sup>[1]</sup>。但是, 这一地区也是河北省主要的中低产区, 土壤肥力较低、盐碱、干旱问题突出, 严重影响粮食产量的增长<sup>[2]</sup>。近年来, 随着经济的发展和农业技术水平的提高, 这一地区的土壤肥力有了明显的提升<sup>[3]</sup>, 作物产量有了明显的提高。系统的评价这一过程中的农田养分投入与作物产量、养分效率的关系, 可以为更好的改良土壤、提高养分资源利用效率, 实现农业资源与生态环境协调发展提供数据支撑。因此, 本研究基于自 1998 年开始的多个定位肥力监测试验<sup>[4]</sup>的监测数据, 对河北省低平原区典型粮田长期定位监测下的农田施肥状况、作物产量和养分效率变化进行分析, 为科学施肥提供数据

支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域基本情况

河北省低平原区位于河北省中南部, 平均海拔低于 50~150 m, 属大陆型暖温带半干旱半湿润季风气候, 年平均气温 12.7~13.3℃, 年无霜期为 180~220 d, 年均日照时数为 2 500~2 700 h, 年均降水量 500~600 mm, 时空分布不均, 年蒸发量平均达 1 100~1 800 mm。

本研究共选取邢台市的邢台县、邯郸市的临漳县、衡水市的冀州和深州、沧州市的献县和盐山共计 6 个定位监测点 (表 1)。上述监测点为河北省土壤肥力定位监测点<sup>[4]</sup>, 主要分布在河北省平原区, 分别代表了褐土、潮土以及盐化潮土等主要土壤类型, 能够代表当地生产力水平。种植模式均为冬小麦-夏玉米轮作, 小麦于每年 10 月上旬播种, 第二年 6 月上旬收获。玉米于小麦收获后播种, 当年 10 月初收获。

### 1.2 定位监测试验设置与管理

定位监测点的试验设置与管理按照耕地质量监测技术规程<sup>[5]</sup>执行, 在每个定位监测点设置无肥区和施肥区两个处理。其中无肥区面积不小于

收稿日期: 2016-05-10; 最后修订日期: 2016-07-10

基金项目: 河北省“渤海粮仓”科技示范工程; 河北省现代农业产业体系玉米创新团队资助项目。

作者简介: 贾良良 (1975-), 男, 河北武强人, 博士, 研究员, 主要从事植物营养研究, 同时为通讯作者, E-mail: jiall99@hotmail.com。

66.7 m<sup>2</sup>，且在所有年份均不施用任何肥料。施肥区面积不小于 333.3 m<sup>2</sup>，按照常规施肥进行处理，施肥量能够代表当地农民的习惯施肥量。监测点田

间管理措施同农民习惯管理方式，小麦、玉米秸秆均还田，其中小麦播种前旋耕整地，玉米在小麦收获后直接贴茬播种，不整地。

表 1 1998 年开始的定位监测点土壤肥力基本情况

监测地点	监测点位置	土壤类型	地形部位	栽培作物	熟制	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
邢台县	南大郭乡北大郭村	石灰性褐土	洪冲积扇	冬小麦/夏玉米	一年两熟	18.6	0.90	4.6	84
临漳	南东坊乡南岗一村	潮土	二坡地	冬小麦/夏玉米	一年两熟	16.2	0.90	11.6	78
深州	东安庄乡西安庄	潮土	冲积平原	冬小麦/夏玉米	一年两熟	12.1	0.77	8.4	47
冀州	冀州镇张宣子村	潮土	平原	冬小麦/夏玉米	一年两熟	12.6	1.00	11.2	68
献县	河街乡农技校	潮土	平原	冬小麦/夏玉米	一年两熟	14.0	0.96	9.2	158
盐山	城关镇小刘牛村	盐化潮土	低洼地	冬小麦/夏玉米	一年两熟	7.3	0.10	3.8	92

### 1.3 数据收集和处理

自 1998 年开始连续定位收集无肥区和施肥区作物产量、施肥区氮、磷、钾肥施用量等。

为减少分析误差，对 6 个监测点的数据进行了平均处理，利用 Excel 对施肥量、作物产量、氮肥偏生产力 (PFP - N)<sup>[6]</sup> 和氮肥农学效率 (AE - N)<sup>[7]</sup>、基础地力贡献率<sup>[8]</sup>等进行了计算与分析。

主要计算公式如下：

$$\text{氮肥偏生产力 (PFP - N, kg/kg)} = \frac{\text{施肥区作物产量}}{\text{施氮量}} \quad (1)$$

$$\text{氮肥农学效率 (AE - N, kg/kg)} = \frac{\text{施肥区作物产量} - \text{空白区作物产量}}{\text{施氮量}} \quad (2)$$

$$\text{基础地力贡献率} = \frac{\text{空白区作物产量}}{\text{施肥区作物产量}} \times 100\% \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥量和施肥结构变化特征

1998 ~ 2014 年定位监测田块小麦的氮肥施用量一直呈波动增加状态 (图 1)，在 268.1 ~ 391.7 kg/hm<sup>2</sup>，平均施氮量 315.2 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥的施用量也呈波动状态，在 141.2 ~ 252.4 kg/hm<sup>2</sup> 之间，年平均 199.5 kg/hm<sup>2</sup>。钾肥施用量与磷肥施用量比较接近，在 116.8 ~ 260.9 kg/hm<sup>2</sup> 之间，年平均 173.2 kg/hm<sup>2</sup>。总体来看，小麦氮磷钾肥施用比例为 1:0.63:0.51 左右，氮磷钾肥施用量均明显偏多。

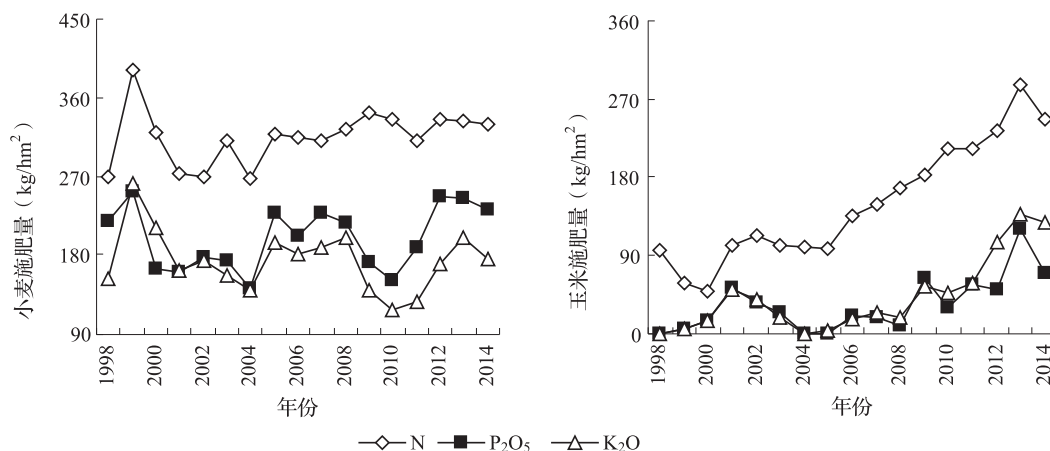


图 1 定位监测田块小麦、玉米年均施肥量变化

定位监测田块玉米的氮肥施用量在 1998 ~ 2005 年期间呈波动状态 (图 1)，平均施用量在 90 kg/hm<sup>2</sup> 左右。而 2006 ~ 2014 施氮量呈明显的波动增加趋势，从 2006 年的 134.7 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2014 年

的 247.0 kg/hm<sup>2</sup>，平均施氮量为 202 kg/hm<sup>2</sup>。磷、钾肥的施用量呈明显的波动状态，1998 ~ 2005 年间平均施磷、钾量仅为 17.0 和 16.5 kg/hm<sup>2</sup>，而从 2006 年开始迅速增加，分别从 2006 年的 20.5

和 16.6 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2014 年的 69.8 和 128.5 kg/hm<sup>2</sup>。2006 ~ 2014 年平均施磷量为 49.1 kg/hm<sup>2</sup>，平均施钾量为 69.5 kg/hm<sup>2</sup>。总体来看，玉米氮磷钾肥施用比例为 1:0.25:0.27，氮肥施用量从施用不足逐渐到目前的较高水平，而磷钾肥也从原来的不施用逐渐增加到目前相对较合理的水平。

### 2.2 无肥区和施肥区作物产量的年际变化特征

定位监测田块小麦产量呈波动上升趋势（图 2），施肥区产量从 1998 年的 4 855 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2014 年的 6 831 kg/hm<sup>2</sup>，增加了 40.7%，年均增产 2.5%，而同期无肥区产量基本上保持不变。玉米施肥区产量也呈波动性上升趋势，从 1998 年的

5 374 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2014 年的 9 263 kg/hm<sup>2</sup>，增加了 72.4%，年均增产 4.5%。玉米无肥区产量也呈增加的趋势，从 1998 年的 2 232 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2014 年的 3 038 kg/hm<sup>2</sup>，增加了 36.1%。

### 2.3 施肥对小麦、玉米产量的贡献

施肥区小麦氮、磷、钾肥施用量与产量间没有明显的关系（图 3），而玉米肥料施用量则与玉米产量有显著的线性相关关系。另外，从拟合方程与产量的截距来看，氮肥模型与产量轴的截距最小为 4 983.5 kg/hm<sup>2</sup>，远小于磷肥的截距 6 187.9 kg/hm<sup>2</sup> 和钾肥的截距 6 101.3 kg/hm<sup>2</sup>，表明在本试验条件下氮肥是玉米产量提升的首要限制因素。

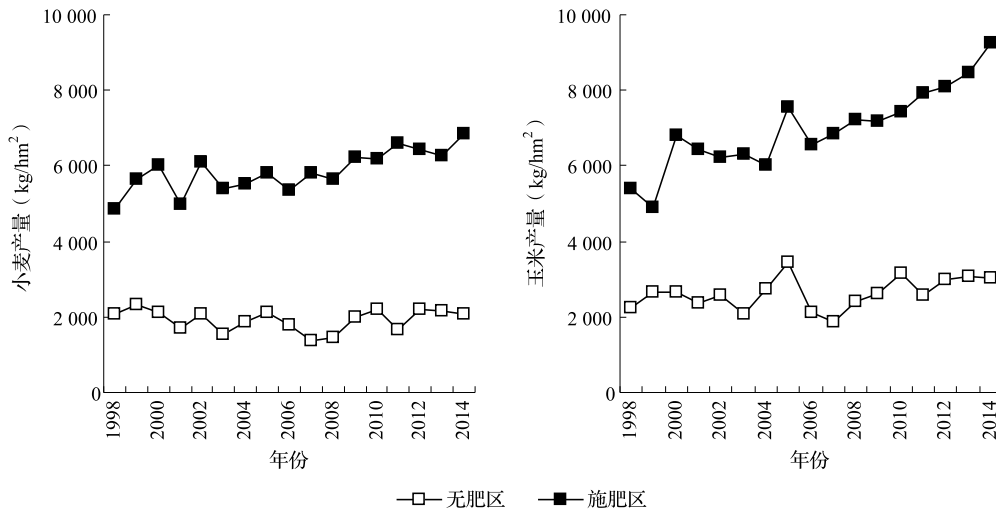


图 2 定位监测田块小麦、玉米产量变化

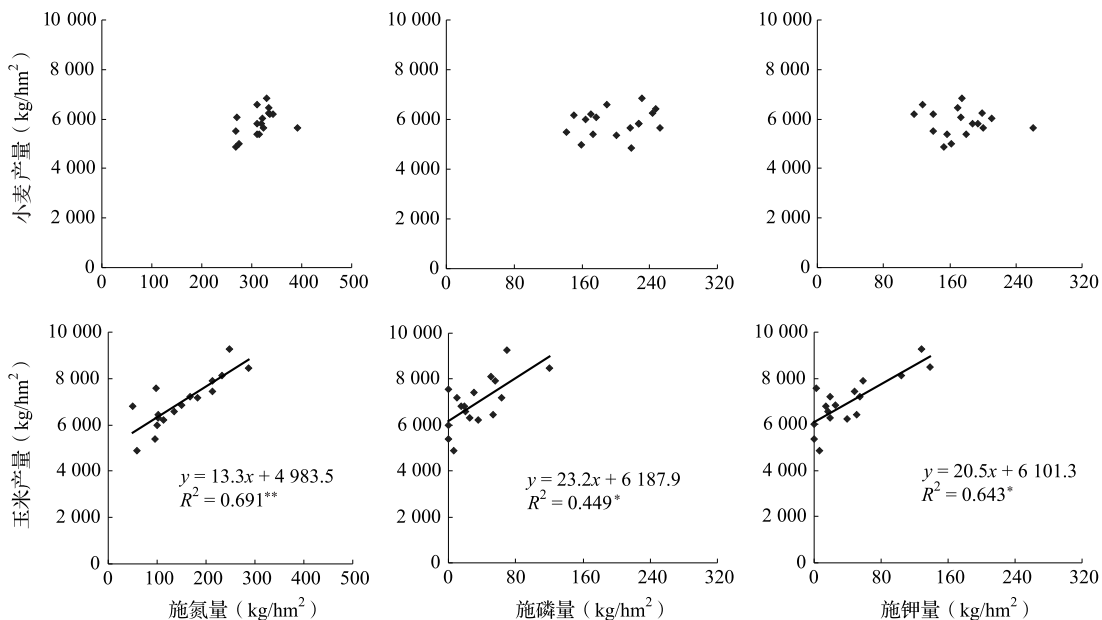


图 3 施肥量与小麦、玉米产量的关系

## 2.4 农田土壤肥力贡献率和施肥处理的养分效率变化

小麦施肥处理的氮肥偏生产力 (PFP-N) 和氮肥农学效率 (AE-N) 在 1998~2014 年间变化并不明显, PFP-N 在 11.1~18.0 kg/kg 之间, AE-N 在 7.3~11.9 kg/kg 之间。玉米的 PFP-N 和 AE-N 总体呈逐渐降低的趋势, PFP-N 在 29.5~137.9 kg/kg 之间, AE-N 在 18.9~83.8 kg/kg 之间。总体来看, 玉米的 PFP-N 和 AE-N 均显著高于小麦, 但随着玉米施氮量的不断增加, 养分效率迅速下降。

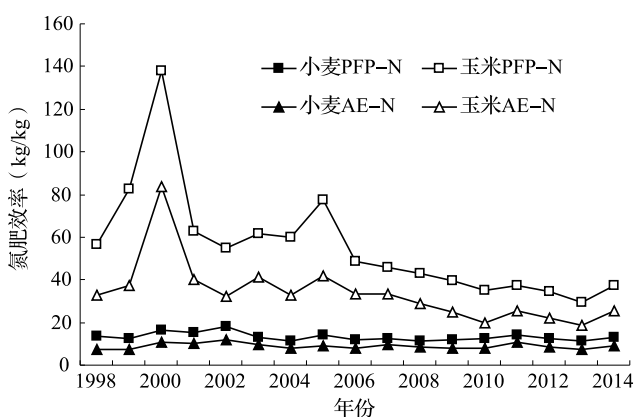


图4 定位监测田块养分效率的变化

## 2.5 土壤基础地力贡献率

从无肥区农田基础地力贡献率 (图5) 来看, 小麦和玉米季农田基础地力的贡献率呈逐年下降的趋势, 小麦无肥区的基础地力贡献率从 1998 年的 40.7% 下降到 2014 年的 30.2%, 玉米无肥区的基础地力贡献率则从 1998 年的 41.5% 下降到 2014 年的 32.8%。玉米季农田土壤基础地力贡献率略高于小麦季, 但没有明显差异。

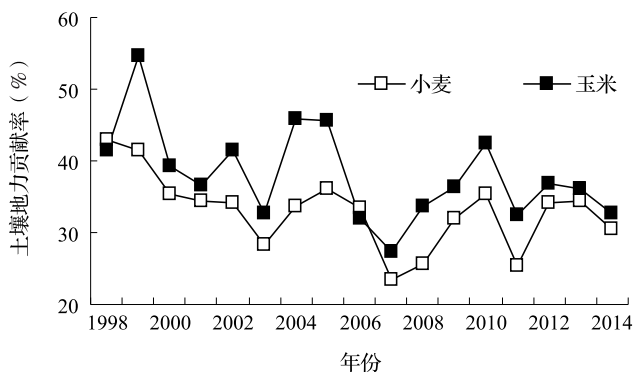


图5 农田土壤地力贡献率的年际变化

## 3 讨论与结论

1998~2014 年的定位监测表明, 河北省低平原区小麦氮磷钾施用量一直维持在较高的水平, 处于明显过量的水平。这可能是因为小麦作为口粮作物, 农民偏爱通过高施肥获得高产<sup>[9]</sup>。但是, 农民过量施用肥料并没有带来小麦产量的显著提高, 施肥量与小麦产量间没有明显的相关关系。定位监测施肥区小麦产量的提升可能与土壤肥力的提升、品种改良、耕作栽培技术的改进有关。而对玉米来说, 施肥量的增加确实对玉米产量的提升有明显的促进作用, 其中氮肥是玉米高产的主要限制因子, 表明在目前的种植模式下, 适当施用氮肥有助于玉米产量潜力的发挥。

从本研究施肥区作物的养分效率来看, 虽然小麦产量比定位监测初期有了明显的提升, 但小麦的 PFP-N 和 AE-N 一直处于较低的水平, 且并没有随着产量的提高有明显的变化, 其主要的原因就是小麦的氮肥施用量过高<sup>[10]</sup>。玉米的 PFP-N 和 AE-N 则明显高于小麦, 但随着施氮量逐年增加氮肥效率迅速降低, 到 2014 年 PFP 已下降到 37.5 kg/kg, 低于 Doberman<sup>[11]</sup> 提出的谷物生产氮肥偏生产力目标 (40~70 kg/kg), 因此提高养分效率是目前研究的重点。提高养分效率的主要技术渠道是提高作物产量水平或者降低施肥量。据分析, 华北平原夏玉米的产量潜力在 16.5 t/hm<sup>2</sup><sup>[12]</sup>, 河北平原的产量潜力在 13.5 t/hm<sup>2</sup><sup>[13]</sup>, 远高于目前农民的产量水平。Chen 等<sup>[14]</sup> 通过综合优化农田养分投入和管理水平, 已经在华北平原实现了作物高产和高效同步。因此, 进一步优化养分投入、提高栽培管理技术水平是减少产量差, 实现作物高产和养分高效的关键。

从无肥区产量来看, 在监测期间小麦产量一直没有明显变化, 而玉米产量则有一定程度的增加。无肥区作物产量是土壤基础地力产量和环境沉降养分综合作用的结果。李忠芳等<sup>[15]</sup> 的研究认为, 长期不施肥处理会导致土壤肥力明显下降, 从而影响产量。从土壤基础地力对产量的贡献率来看, 小麦、玉米也确实呈逐年下降的趋势, 但从下降的原因来看, 主要是小麦、玉米施肥区产量的显著提高。据 Liu 等<sup>[16]</sup> 分析发现 1980~2000 年间我国农田氮沉降量增加了约 60%, 长期定位试验空白小区的作物吸氮量平均增加了 13 kg/hm<sup>2</sup>。从试验点降

水资料来看,过去16年间,降水量呈增加的趋势(图6),且降水主要分布在夏季(图7)。因此,环境养分供应增加可能是玉米无肥区产量增加的一个重要原因。此外,耕作栽培技术的进步、玉米品种的改良等也可能对玉米无肥区产量提高有促进作用。根据调查,定位监测点的小麦的播种量、行距等在过去16年中没有明显变化,但玉米播种密度从1998年的每公顷52000株左右,提升到2014年的每公顷60000株左右,播种密度有了明显提高。但对无肥区小麦来说,上述增产因素可能还不足以抵消长期不施肥造成的土壤肥力下降的影响,尚需要进一步深入探讨。

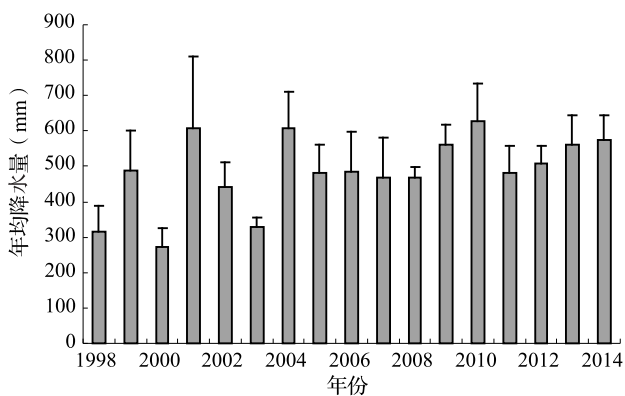


图6 6个定位监测点1998~2014年年均降水量

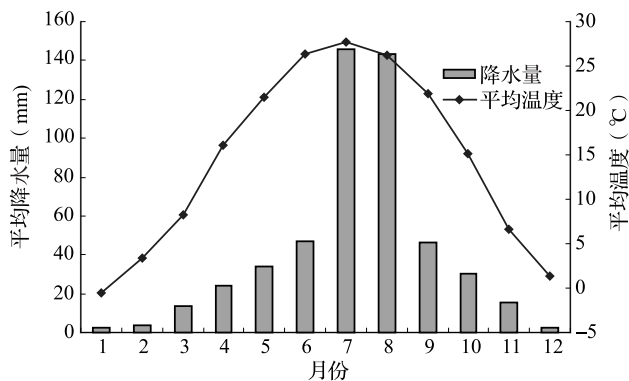


图7 6个定位监测点1998~2014年每月平均降水量和平均温度变化

大量的研究表明,长期连续施肥对土壤肥力提升有明显的促进作用<sup>[17-18]</sup>。在本研究中,并没有讨论施肥区土壤肥力提升对作物产量提升的贡献率。Fan等<sup>[19]</sup>研究认为,自20世纪80年代土壤肥力提升对我国小麦、玉米增产的贡献率分别为42.5%和21.8%。施肥区土壤基础地力的提升促进了作物产量的进一步提高,起到了“水涨船高”的作用<sup>[20]</sup>。另外耕作栽培技术的进步、作物品种的更替等都对

作物产量的提升有巨大的贡献。如何定量化的分析上述因素对产量提升和效率提升的贡献可能是今后农田养分管理研究中需要重点考虑的问题。

#### 参考文献:

- [1] 李承绪,姚祖芳,高广惠. 河北低平原土壤养分状况与培肥途径 [J]. 河北农学报, 1981, 2: 11-15.
- [2] 丁鼎治. 河北土种志 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1992.
- [3] 孙彦铭,刘克桐,贾良良,等. 河北省冀中南平原区典型农田土壤肥力演变特征 [J]. 中国农学通报, 2016, 32 (9): 164-169.
- [4] 刘克桐. 河北省主要农田土壤肥力变化趋势 [J]. 河北农业科学, 2005, 9 (3): 29-35.
- [5] NY/T 1119-2012. 耕地质量监测技术规程 [S].
- [6] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production [J]. Plant and Soil, 1981, 58: 177-204.
- [7] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems [J]. Field Crops Research, 1998, 56: 7-38.
- [8] 高静,马常宝,徐明岗,等. 我国东北黑土区耕地施肥和玉米产量的变化特征 [J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 28-31, 56.
- [9] Chen X, Zhang F, Römheld V, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved  $N_{min}$  method [J]. Nutrient Cycling in Agro-ecosystems, 2006, 74 (2): 91-98.
- [10] 张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略 [J]. 植物学通报, 2007, 24 (6): 687-694.
- [11] Doberman A. Nitrogen use efficiency - state of art [R]. Frankfurt, Germany: Paper of the IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, 2005. 28-30.
- [12] Meng Q, Hou P, Wu L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China [J]. Field Crop Research, 2013, 143: 91-97.
- [13] 曹云者,刘宏,王中义,等. 基于作物生长模拟模型的河北省玉米生产潜力研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008, (2): 826-832.
- [14] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108 (16): 6399-6404.
- [15] 李忠芳,徐明岗,张会民,等. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (7): 2407-2414.
- [16] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, 494: 459-463.
- [17] 徐明岗,梁国庆,张夫道. 中国土壤肥力演变 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.

- [18] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 长期定位施肥对冬小麦产量及潮土土壤肥力的影响 [J]. 华北农学报, 2010, 25 (6): 217 – 220.
- [19] Fan M S, Rattan L, Cao J, et al. Plant – based assessment of inherent soil productivity and contributions to China’s cereal crop yield increase since 1980 [J]. Plos One, 2013, 8 (9): e74617.
- [20] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥方式对南方黄泥田水稻产量及基础地力贡献率的影响 [J]. 福建农业学报, 2010, 25 (5): 631 – 635.

**Dynamic changes of fertilization rate, yield and nutrient use efficiency in recent 16 years in the low plain area of Hebei province**

JIA Liang-liang<sup>1\*</sup>, LIU Ke-tong<sup>2</sup>, SUN Yan-ming<sup>1</sup>, YANG Yun-ma<sup>1</sup>, YANG Zhen-li<sup>3</sup>, HUANG Shao-hui<sup>1</sup>, YANG Jun-fang<sup>1</sup> (1. Institute of Agro-Resources & Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang Hebei 050051; 2. Soil and Fertilizer Station of Hebei Province, Shijiazhuang Hebei 050000; 3. Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang Hebei 050051)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of farmers’ nutrient management strategy on yield and nutrient use efficiency in recent 16 years in the low plain area of Hebei province, six in-site soil fertility monitoring experiments data sets, which was conducted since 1998 to 2014, were used to evaluate the changes in this region. The results showed that the fertilization rate for wheat kept at high level, averaged yearly N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O application rates were 315.2, 199.5 and 173.2 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The fertilization rate of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O for maize increased year by year, and had reached 247.0, 69.8 and 128.5 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, in 2014. The wheat and maize yield for fertilization plots increased about 40.7% and 72.4%, respectively, in 2014 than that in 1998. But for the no fertilization plots, there was no yield increasing for wheat and 36.1% yield increasing for maize. The fertilization rate increasing did not affect the wheat yield, but significantly increased the maize yield. The nutrient use efficiency of PFP-N and AE-N for wheat did not change too much due to the high fertilization rates, but all had the declining trend for maize with the time and the fertilization rates increasing. And the percentage of basic soil fertility contribution to wheat and maize yield kept declining.

**Key words:** long-term experiment; fertilization rate; percentage of soil basic productivity contribution; wheat; maize