

近 14 年北方冬小麦肥料产量效应变化及优化施肥方案

贾可^{1,2}, 刘建玲^{1*}, 沈兵³

(1 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071001; 2 中国-阿拉伯化肥有限公司, 河北秦皇岛 066003;
3 中海石油化学股份有限公司, 北京 100029)

摘要:【目的】通过分析近 14 年来北方冬小麦肥料产量效应的多点试验数据, 明确北方冬小麦产量变化特征及肥料产量效应, 为该区冬小麦养分管理和合理施肥提供科学依据。【方法】通过我国北方冬小麦区 2002—2016 年 96 个定位监测试验, 研究小麦地力产量和肥料农学效率变化趋势; 通过 120 个田间肥料效应的检验试验, 研究不同时段和不同施肥水平时氮、磷、钾在冬小麦上的产量效应; 以肥料农学效率变化和施肥产量效应为依据, 通过 24 个田间试验对习惯施用的复合配肥配方进行田间校验, 提出相应的节肥增效建议。

【结果】1) 2002—2016 年间, 北方冬小麦区的土壤供肥能力呈逐渐增加的趋势, 其平均地力产量自 2002 年的 4721 kg/hm² 增加到 2016 年的 5828 kg/hm², 年均增加 1.6%。施肥能显著增加小麦产量, 但施肥增产率从 2005 年后呈下降趋势, 由 2005 年的 30.9% 下降至 2016 年的 20.2%。2) 2002—2016 年, 肥料的农学效率呈下降趋势, 由 2002 年的 9.0 kg/kg 下降至 2010 年的 6.7 kg/kg, 2010 年后维持在 6.3~6.7 kg/kg。3) 基于不同时段氮、磷、钾在冬小麦上的产量效应函数计算出经济施肥量, 其中 2002—2006 年间, 最高产量的 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 180.5、107.4、55.9 kg/hm²; 经济最佳用量分别为 167.8、102.5、53.7 kg/hm²; 经济合理用量 ($R=0.1$) 分别为 155.5、99.9、52.8 kg/hm²; 2012—2016 年间, 最高产量的 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 184.3、125.1、52.4 kg/hm²; 经济最佳用量分别为 171.7、118.5、48.6 kg/hm²; 经济合理用量分别为 159.2、114.9、47.0 kg/hm²; 优化复合肥 N-P₂O₅-K₂O 配方为 16-20-8, 比常规原配方减少氮磷钾总用量的 12.0%。

【结论】从 2002 年到 2016 年, 北方冬小麦区土壤地力产量逐渐提高, 虽然施肥仍有显著增产效果, 但增产率和农学效率呈逐渐降低的趋势, 2016 年施肥增产率为 20.2%, 肥料农学效率维持在 6.5 kg/kg。北方冬小麦 N-P₂O₅-K₂O 优化配方为 16-20-8, 推荐施肥方案为: 基肥该配方肥 600 kg/hm², 追施氮 69 kg/hm²。

关键词: 冬小麦; 氮磷钾; 产量效应; 农学效率; 优化配方

Yield effect change of fertilizers in the past 14 years and optimized fertilization of winter wheat in north of China

JIA Ke^{1,2}, LIU Jian-ling^{1*}, SHEN Bing³

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China; 2 China-Arab Chemical Fertilizer Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066003, China; 3 CNOOC Chemical Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: 【Objectives】Clarifying the winter wheat yield change and the effect of fertilization will set up a fundamental basis for scientific nutrient management in the winter wheat production in north of China.

【Methods】Ninety-six localized field experiments were carried out, in which the treatments were all composed of no fertilizer control and conventional fertilizer rate, and the yield effect and agronomic efficiency of N, P and K fertilizers of winter wheat were investigated. The fertilizer optimization experiments were carried out in 120 sites, using local winter wheat cultivars and fertilizers as tested materials. The experiment used split plot design, with the main factor of different levels of N, P and K, and the secondary factor was high, middle and low levels of the other two nutrients. The yield effects of N, P and K were calculated, and the recommended rates were proposed.

收稿日期: 2020-08-10 接受日期: 2020-10-10

基金项目: 河北省磷肥减量、高效利用关键技术研究 (2017220102)。

联系方式: 贾可 E-mail: 35441091@qq.com; * 通信作者 刘建玲 E-mail: jlliu@hebau.edu.cn

【 Results 】 From 2002 to 2016, the supply capacity of soil nutrients were kept increasing. The average soil fertility yield increased from 4721 kg/hm² in 2002 to 5828 kg/hm² in 2016, with an average annual increase of 1.6%. Application of N P K fertilizers significantly increased wheat yield, however, the yield increase rate became lower with diminishing returns (quadratic equation of one variable), the growth rate decreased from 30.9% in 2005 to 20.2% in 2016. The agronomic efficiency of NPK decreased from 9.0 kg/kg in 2002 to 6.7 kg/kg in 2010, and remained at 6.3–6.7 kg/kg after 2010. Based on the yield effect function of N, P and K in different periods, the calculated average N, P₂O₅ and K₂O rates for maximum yield were 180.5 kg/hm², 107.4 kg/hm² and 55.9 kg/hm², and for the economic yield were 167.8 kg/hm², 102.5 kg/hm² and 53.7 kg/hm², and for the reasonable yield were 155.5 kg/hm², 99.9 kg/hm² and 52.8 kg/hm², and the optimized formula was 18–18–8 in 2002–2006. The average rates of N, P₂O₅ and K₂O for the maximum yield in 2012–2016 were 184.3 kg/hm², 125.1 kg/hm², 52.4 kg/hm², for economic optimal yield were 171.7 kg/hm², 118.5 kg/hm² and 48.6 kg/hm², and for the reasonable yield were 159.2 kg/hm², 114.9 kg/hm² and 47.0 kg/hm², and the optimized formula in 2016 was 16–20–8, the total nutrient input was reduced by 12%, compared with the original formula. 【 Conclusions 】 From 2002 to 2016, the supply capacity of soil nutrients is kept improving in the main winter wheat yield areas in north of China. The yield increase rate and the agronomic efficiency are decreased, in spite of the significant yield effects. The averaged fertilizer yield increase rate is about 20.2%, and the agronomy efficiency is maintained at 6.5 kg/kg in 2016. The proposed regional compound fertilizer formula of winter wheat is 16–20–8, the recommended total base NPK fertilizer nutrient rate is 600 kg/hm², and top-dressing rate is N 69 kg/hm².

Key words: winter wheat; NPK fertilizer; yield effect; agronomic efficiency; formula optimization

冬小麦是北方地区(河北、河南、安徽、山东)主要的粮食作物。据统计,2018年该地区冬小麦种植面积为 1503.1×10^4 hm²,产量为 9132.8×10^4 t,分别占全国小麦总种植面积和总产量的61.9%和69.4%^[1]。近年来,农业生产中过量施肥现象比较普遍,约占种植面积的75%^[2],这也是小麦生产中的一个重要问题。有研究表明,北方冬小麦肥料用量远高于需肥量^[3-4],农民习惯的氮、磷肥投入量分别是消耗量的2.6倍和4.1倍^[5]。长期过量施肥增加了土壤养分含量和供肥能力,与第二次土壤普查相比,土壤有机质、全氮、有效磷含量分别增加了2.61~6.10 g/kg、0.12~0.23 g/kg、7.89~20.68 mg/kg,1996—1999年冬小麦茬口土壤供氮、磷、钾能力分别增加了37.9%、0.7%、2.1%^[6],土壤氮、磷、钾实际平衡盈余分别高达81.1%、88.5%和11.9%^[7]。已有基于小区试验或统计数据的土壤养分状况的分析报道^[3-5],而没有基于整个北方冬小麦生产区进行多年多点田间研究试验,尤其缺乏基于北方地区冬小麦土壤实际供肥能力、地力产量和肥料农学效率变化的资料。

随着土壤供肥能力和肥料农学效率的变化,肥料在作物上的产量效应也随之改变。一般认为,根据肥料效应函数计算出的最高产量施肥量及最高产

量,能够反映土壤肥力的变化及肥料增产效应的变化^[8-9]。有学者认为,随着土壤养分含量的增加,一元二次肥料曲线或二元二次肥料效应曲面二次项系数逐渐变大,曲线曲率变缓^[10],在此基础上,提出用二次式和平台两组函数拟合肥料效应,进而计算推荐施肥量^[11]。但是,这两种方法都是基于某一田块试验得出的结论,并没有进行多点田间试验验证。20世纪80年代,杨守春等^[12]根据多年多点田间试验,利用肥料效应函数计算了北方地区冬小麦推荐施肥量和最高产量,并进一步分析了该地区冬小麦施肥产量效应及变化规律,与其他学者不同的是,他们采用了经济合理施肥量作为小麦施肥推荐量。

肥料效应函数可以计算出最高产量施肥量、经济最佳施肥量和经济合理施肥量。经济最佳施肥量指边际产值与边际成本相等,边际利润率等于零($R=0$)时的施肥量,为单位面积利润最大的施肥量。经济合理施肥量是指肥料投资利润等于最优投资利润($R=0.1$)的施肥量,代表单位肥料投资利润最大^[8-9]。由经济最佳施肥量和经济合理施肥量的定义可知,后者更符合农民实际施肥需求。

近些年,复合肥在小麦生产中的应用比例逐年增高^[13],既有根据土壤养分状况、作物需肥规律或土壤养分平衡状况确定的合理施肥量和复合肥配方^[14-17],

也有采用肥料效应函数计算的合理施肥量^[18]。但在小麦生产中,推荐施肥配方与复合肥生产依然处于脱节状态,有必要将产量效应田间试验与复合肥配方校验试验有机结合起来,解决肥料生产和农业需求脱节的问题。为此,我们通过多年、多点田间试验,研究了氮、磷、钾肥在北方冬小麦上的产量效应和农学效率的变化趋势;又进一步研究了不同时段、不同施肥水平下氮、磷、钾肥产量响应状况,通过肥料产量效应田间校验法优化复合肥配方,为冬小麦生产的减肥增效提供科学依据。

1 材料与方法

试验在安徽、河北、河南和山东 4 个北方冬小麦主产省份进行。通过 96 个施肥监测试验点,研究农田施肥对冬小麦产量和肥料农学效率的影响;通过 120 个产量效应试验点,研究不同时段和不同施肥水平时氮、磷、钾在冬小麦上的产量效应;通过 24 个田间试验点对小麦施肥进行优化,并提出相应节肥增效建议。

1.1 冬小麦产量和肥料农学效率监测试验

96 个小麦施肥监测试验点分布为安徽省 21 个、河北省 26 个、河南省 26 个、山东省 23 个。试验分别于 2002 年、2005—2013 年、2016 年实施。所有试验均设两个处理:不施肥(对照)和习惯施肥,不设重复。小麦收获后分别统计两个处理的小麦平均产量并计算肥料农学效率,小麦增产率 (%) = $(Y_{\text{施肥}} - Y_{\text{对照}})/Y_{\text{对照}} \times 100$,式中 Y 代表产量;肥料农学效率 (kg/kg) = $(Y_{\text{施肥}} - Y_{\text{对照}})/\text{养分投入总量}$ 。

1.2 氮、磷、钾施用水平对冬小麦产量的影响试验

试验点分布于安徽、河北、河南和山东 4 个省共计 120 个小麦试验点(图 1),其中安徽 24 个、河北 35 个、河南 31 个、山东 30 个。试验于 2002—2006 年和 2012—2016 年两个时间段内实施。试验点都相对均匀地分布在 4 个试验省份内。土壤类型主



图 1 北方冬小麦试验地点分布
Fig. 1 Fertilization experimental locations of winter wheat in north of China

[注 (Note): 黑色点代表农学效率试验地点 The black dots represent the locations of agronomic efficiency experiment; 灰色三角代表产量效应试验点 The grey triangles represent the locations of yield response experiment.]

要是褐土、潮土和潮褐土。各试验点土壤基础 pH 及养分状况见表 1。

试验采用裂区设计,主处理因素为氮、磷、钾肥水平,副处理为该处理主因素外的另外两个因素水平,均设低、中、高 3 个水平,每个试验点,3 次重复。小区之间以田埂分隔,每个小区的面积为 40~60 m²,试验地周围设 1 m 保护行。2002—2006 年和 2012—2016 年两个时间段的试验相对独立,磷、钾肥全部作为基肥,氮肥基追比 1 : 0.71。各处理主、副因素及施肥水平见表 2。

试验所用肥料包括复合肥、尿素、磷酸二铵、磷酸一铵、氯化钾。各试验地点小麦种植密度采用当地水平,品种为当地主栽品种,共有 18 个,分别为:烟农 935031、淄麦 12、山农 664、豫麦 18、偃展 4110、焦农 D1、石新 733、百农矮抗 58、潍麦 8 号、石麦 14、衡观 35、石新 828、鲁麦 24 号、矮

表 1 冬小麦试验点土壤基本性状
Table 1 Soil properties of experiment locations in North China

年份 Year	pH		有机质 Organic matter (g/kg)		有效磷 Available P (mg/kg)		速效钾 Available K (mg/kg)	
	范围	均值 ± SD	范围	均值 ± SD	范围	均值 ± SD	范围	均值 ± SD
	Range	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range	Mean ± SD
2002—2006	6.50~8.31	7.52 ± 0.63	9.06~36.0	14.0 ± 6.2	6.90~46.0	27.2 ± 12.0	56.4~270	105 ± 48.0
2012—2016	6.90~8.03	7.51 ± 0.41	8.01~28.7	15.0 ± 9.3	18.0~59.0	21.8 ± 11.3	43.3~287	108 ± 48.3

表 2 试验设计及各因素水平
Table 2 Levels of main and secondary factors in split-plot design

年份 Year	主处理 Main factor	主处理水平 (kg/hm ²) Main factor levels	副处理 Secondary factor	副处理水平 (kg/hm ²) Secondary factor levels	试验点数 Experiment number
2002—2006	N	105, 135, 150, 165, 180, 210, 240	低量磷钾 Low P and K	P ₂ O ₅ 80, K ₂ O 20	19
			中量磷钾 Mid P and K	P ₂ O ₅ 100, K ₂ O 50	
			高量磷钾 High P and K	P ₂ O ₅ 120, K ₂ O 70	
	P ₂ O ₅	75, 90, 105, 120, 135, 150	低量氮钾 Low N and K	N 140, K ₂ O 20	20
			中量氮钾 Mid N and K	N 180, K ₂ O 50	
			高量氮钾 High N and K	N 220, K ₂ O 70	
	K ₂ O	15, 30, 45, 60, 90	低量氮磷 Low N and P	N 140, P ₂ O ₅ 80	21
			中量氮磷 Mid N and P	N 180, P ₂ O ₅ 100	
			高量氮磷 High N and P	N 220, P ₂ O ₅ 120	
2012—2016	N	150, 180, 195, 210, 225, 240	低量磷钾 Low P and K	P ₂ O ₅ 90, K ₂ O 20	19
			中量磷钾 Mid P and K	P ₂ O ₅ 120, K ₂ O 50	
			高量磷钾 High P and K	P ₂ O ₅ 140, K ₂ O 70	
	P ₂ O ₅	75, 90, 105, 120, 135, 150	低量氮钾 Low N and K	N 150, K ₂ O 20	21
			中量氮钾 Mid N and K	N 190, K ₂ O 50	
			高量氮钾 High N and K	N 230, K ₂ O 70	
	K ₂ O	15, 30, 45, 60, 90	低量氮磷 Low N and P	N 150, P ₂ O ₅ 90	20
			中量氮磷 Mid N and P	N 190, P ₂ O ₅ 120	
			高量氮磷 High N and P	N 230, P ₂ O ₅ 140	

抗 58、冀 5265、良星 99、武农 148、平安 7 号。每年秋季 9 月 20 日—10 月 10 日期间播种, 次年 5 月 25 日—6 月 10 日期间收获。田间灌溉、除草和病虫害防治等管理措施均采用当地常规方法。

选用小区中间 30 m² 的小麦进行测产。所有数据用 Excel 2010 整理, 用 SPSS 17.0 软件做方差分析, 用 LSD 分析处理间差异显著性 ($P < 0.05$)。采用一元二次方程 $y = ax^2 + bx + c$ (R^2)^[9] 分析主因素肥料水平在冬小麦上的产量效应, 其中, y (kg/hm²) 代表小麦产量, x (kg/hm²) 代表主因素肥料用量, 使用 Excel 2010 绘制二次曲线并求出方程, 得出效应系数 a 、 b 、 c 值。

对肥料产量效应函数 $y = ax^2 + bx + c$ 求导: $dy/dx = Px/Py(R + 1)$, 式中, y 为小麦产量, x 为主处理肥料用量, Px 为小麦单价, Py 为肥料单价, R 为边际利润率。当 $R = 0$ 时计算的施肥量为最佳经济施肥量, 当 $R = 0.1$ 时计算的施肥量为经济合理用量^[9]。

1.3 冬小麦施肥配方优化

于 2006 及 2016 选择位于安徽、河北、河南和

山东 4 个省内的 24 个试验点进行施肥配方优化试验, 这些试验点分布相对均匀, 土壤 pH 及基本肥力水平及所用品种见表 3。

田间试验包括 4 个处理, 3 次重复, 随机区组设计, 试验详情见表 4。处理 1: 常规施肥 (CK), 供试肥料为当年市场上销量最大的复合肥, 2006 年复合肥 N-P₂O₅-K₂O 配比为 16-16-10, 2016 年为 18-22-10; 处理 2: 2006 年比处理 1 增加 2% 氮肥, 2016 年比处理 1 减少 2% 氮肥, 磷、钾用量同处理 1; 处理 3: 2006 年比处理 1 增加 2% 磷肥, 2016 年比处理 1 减少 2% 磷肥, 氮、钾用量同处理 1; 处理 4: 比处理 1 减少 2% 钾肥, 氮、磷用量同处理 1。

复合肥在市场上采购, 氮、磷、钾肥分别用尿素、磷酸二铵、氯化钾。磷、钾全部作基肥, 氮肥以基肥和追肥施用。除肥料外, 田间灌溉、除草和病虫害防治等管理措施均采用当地常规方法。所有品种均为当地主栽品种。

所有数据由 Excel 2010 整理, SPSS 17.0 软件做

表 3 2006 和 2016 年北方冬小麦试验点土壤基本情况

Table 3 Basic situation of winter wheat fertilization test in north of China in 2006 and 2016

年份 Year	省份 Province	县/市 County/City	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/g) Available K	品种 Cultivar
2006	安徽 Anhui	利辛 Lixin	8.13	11.2	19.6	132	淮麦15 Huaimai 15
		宿州 Suzhou	6.54	17.3	18.3	127	温麦6 Wenmai 6
	河北 Hebei	利辛 Lixin	7.71	10.1	11.2	60	淮麦15 Huimai 15
		邯郸 Handan	7.50	17.7	9.8	87	石新733 Shixin 733
		新乐 Xinle	6.90	11.8	13.2	105	石麦15 Shimai 15
		邢台 Xingtai	7.14	9.11	14.2	132	石新733 Shixin 733
	河南 Henan	夏邑 Xiayi	8.02	11.4	32.0	147	郑麦9023 Zhengmai 9023
		方城 Fangcheng	7.79	16.0	8.1	90	温麦6号 Wenmai 6
		南阳 Nanyang	8.01	17.6	11.0	95	开麦13 Kaimai 13
	山东 Shandong	济宁 Nining	6.71	36.0	7.0	126	济宁16号 Jining 16
		泰安 Tai'an	8.85	9.03	36.2	85	淄麦12号 Zimai 12
		菏泽 Heze	7.43	13.5	15.8	105	潍麦9009 Weimai 9009
2016	江苏 Jiangsu	徐州 Xuzhou	8.01	17.3	13.8	103	烟农19 Yannong 19
	安徽 Anhui	阜阳 Fuyang	8.13	17.0	18.6	156	连麦2 Lianmai 2
		宿州 Suzhou	7.95	14.5	19.7	95	连麦2 Lianmai 2
	河北 Hebei	石家庄 Shijiazhuang	8.67	16.4	22.7	154	衡观35 Hengguan 35
		辛集 Xinji	8.79	18.7	22.9	149	冀5265 Ji 5265
		永年 Yongnian	7.56	12.1	28.6	126	温麦6 Wenmai 6
	河南 Henan	浚县 Xunxian	5.05	16.2	12.6	129	矮抗58 Aikang 58
		南阳 Nanyang	5.47	16.9	23.0	156	矮抗58 Aikang 58
		许昌 Xuchang	8.59	13.8	19.5	105	4110
	山东 Shandong	德州 Dezhou	9.02	10.0	11.9	93.0	济麦22 Jimai 22
		青州 Qingzhou	7.56	12.0	14.0	113	济南17 Jiman 17
		潍坊 Weifang	7.28	23.3	24.3	96.0	良星99 Liangxing 99

表 4 冬小麦施肥氮磷钾配比优化试验设计

Table 4 Treatments of N, P₂O₅ and K₂O adjustment for winter wheat (kg/hm²)

处理 Treatment	基肥 Basal dressing			追施氮 Top-dressing N
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
2006				
常规对照 Conventional control (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=16-16-10)	96	96	60	69
增加2%氮肥 Increasing 2% N	108	96	60	69
增加2%磷肥 Increasing 2% P ₂ O ₅	96	108	60	69
减少2%钾肥 Reducing 2% K ₂ O	96	96	48	69
2016				
常规对照 Conventional control (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=18-22-10)	108	132	60	69
减少2%氮肥 Reducing 2% N	96	132	60	69
减少2%磷肥 Reducing 2% P ₂ O ₅	108	120	60	69
减少2%钾肥 Reducing 2% K ₂ O	108	132	48	69

方差分析。用 LSD 分析处理间的差异 ($P < 0.05$ 为显著)。

2 结果与分析

2.1 农田施肥对冬小麦产量和肥料农学效率的影响

通过 4 个省 96 个小麦生产地区 14 年的试验监测可以看出, 施肥提高了小麦的地力产量而降低了肥料农学效率 (表 5)。在不施肥条件下, 从 2002 年到 2016 年小麦平均地力产量持续增加, 由 2002 年的 4721 kg/hm^2 增加到 2016 年的 5828 kg/hm^2 , 增加了 23.4%, 年平均增加 1.6%。在施肥条件下, 从 2002 年至 2016 年小麦产量也呈增加趋势, 而施肥增产率呈下降趋势。2016 年的小麦产量只比 2002 年增加了 16.8%, 施肥增产幅度小于同期不施肥的小麦增产幅度。另外, 施肥条件下, 2012—2016 期间的小麦单位面积产量比 2002—2006 期间增加 12.6%。

2002 年至 2010 年肥料农学效率由 9.0 kg/kg 下降至 6.7 kg/kg , 年均下降 0.28 kg/kg , 2010 年后肥料农学效率维持在 $6.3\sim 6.7\text{ kg/kg}$, 变化幅度较小 (表 6)。

2.2 氮、磷、钾不同施用水平对冬小麦的产量效应及变化规律

2002—2006 及 2012—2016 两个时间段内的试验结果分别基于肥料效应函数 $y = ax^2 + bx + c$ 进行分析 (表 6)。结果显示, 2002—2006 年小麦获得最高产量

时 N、 P_2O_5 、 K_2O 平均用量分别为 180.5 、 107.4 、 55.9 kg/hm^2 ; 平均经济最佳用量分别为 167.8 、 102.5 、 53.7 kg/hm^2 ; 平均经济合理用量 ($R = 0.1$) 分别为 155.5 、 99.9 、 52.8 kg/hm^2 。2012—2016 年小麦获得最高产量时 N、 P_2O_5 、 K_2O 平均施肥量分别为 184.3 、 125.1 、 52.4 kg/hm^2 ; 平均经济最佳用量分别为 171.7 、 118.5 、 48.6 kg/hm^2 ; 平均经济合理用量 ($R = 0.1$) 分别为 159.2 、 114.9 、 47.0 kg/hm^2 。

在 2002—2006 年和 2012—2016 年的两个时间段内, 当氮为主处理、磷钾为副处理时, 中水平磷钾对应的小麦经济最佳氮用量和经济合理氮用量最高, 其次是磷钾为高水平时的氮用量, 而磷钾为低水平时的经济最佳氮用量和经济合理氮用量最低。当磷为主处理氮钾为副处理时, 经济最佳磷用量和经济合理磷用量规律与氮肥相同。经济最佳钾用量和经济合理钾用量在低、中氮磷水平下用量较高, 两种条件下没有明显差异, 而在高氮磷水平下用量较低。

将 2002—2006 年与 2012—2016 年两个时间段比较, 小麦获得最高产量时的氮用量无明显差异; 2002—2006 年期间小麦获得最高产量时的磷用量明显低于 2012—2016 年时间段内小麦获得最高产量的磷用量, 而钾用量略高。经济最佳用量和经济合理用量呈相同规律。

2.3 冬小麦施肥配方优化

2.3.1 冬小麦氮、磷、钾施肥比例 经济合理施肥

表 5 2002—2016 年冬小麦产量和肥料农学效率
Table 5 Wheat yield and fertilizer agronomic efficiency in north of China from 2002 to 2016

年份 Year	试验点 Experiment locations	不施肥产量 (kg/hm^2) Yield in CK	施肥产量 (kg/hm^2) Yield in treatment	增产率 (%) Yield increase	肥料农学效率 (kg/kg) Agronomic efficiency
2002	21	4721.1 ± 731.9	5999.3 ± 824.0	27.1	9.0 ± 4.2
2005	24	4856.9 ± 946.5	6359.0 ± 715.1	30.9	8.2 ± 2.9
2006	15	5092.1 ± 553.2	6421.1 ± 623.9	26.1	8.0 ± 1.8
2007	27	5390.2 ± 567.7	6632.9 ± 731.2	23.1	7.8 ± 2.8
2008	36	5472.8 ± 880.2	6717.8 ± 666.4	22.7	7.2 ± 2.1
2009	33	5684.9 ± 537.2	6877.5 ± 661.8	21.0	7.3 ± 2.9
2010	27	5758.5 ± 851.7	6941.6 ± 438.6	20.5	6.7 ± 1.8
2011	24	5797.1 ± 839.7	7037.5 ± 729.8	21.4	6.3 ± 2.6
2012	30	5805.3 ± 678.3	7132.3 ± 678.3	22.9	6.5 ± 2.4
2013	36	5832.0 ± 769.5	7015.4 ± 599.1	20.3	6.4 ± 2.1
2016	30	5828.3 ± 799.1	7007.0 ± 612.2	20.2	6.5 ± 1.8

注 (Note): 数据为平均值 $\pm$ 标准差 The data are mean $\pm$ SD.

表 6 不同时间段氮、磷、钾在冬小麦上的产量效应
Table 6 Yield response of winter wheat to N, P and K fertilizer in different experimental periods

年份 Year	主处理 Main factor	副处理 Secondary factor	肥料效应系数 Coefficient of fertilizer response function			R ²	最高产量 Max. yield (kg/hm ²)	施肥量 (kg/hm ²) Fertilization rate		
			a	b	c			最高产量 施肥量	最佳经济 用量	经济合理 用量
								Max.	Opt.	Reas.
2002—2006	N	低量磷钾 Low P and K	0.0961	28.445	4704.3	0.9063	6809.2	148.0	137.1	126.7
		中量磷钾 Mid P and K	0.0741	29.723	4513.4	0.9891	7494.0	200.6	186.4	172.3
		高量磷钾 High P and K	0.0828	31.938	4289.9	0.9934	7369.7	192.9	180.2	167.5
	P ₂ O ₅	低量氮钾 Low N and K	0.5415	94.324	3184.1	0.9248	7291.7	87.1	84.6	83.3
		中量氮钾 Mid N and K	0.1858	45.613	4981.0	0.9186	7780.4	122.8	115.5	111.7
		高量氮钾 High N and K	0.2771	62.309	4024.7	0.9350	7527.4	112.4	107.6	105.0
	K ₂ O	低量氮磷 Low N and P	0.7479	84.266	5281.0	0.9123	7654.8	56.3	54.4	53.6
		中量氮磷 Mid N and P	0.7662	87.486	5238.8	0.9530	7736.1	57.1	55.2	54.4
		高量氮磷 High N and P	0.5211	56.703	5422.5	0.9574	6965.0	54.4	51.6	50.4
2012—2016	N	低量磷钾 Low P and K	0.0911	33.660	4709.0	0.9677	7809.2	184.7	173.2	161.9
		中量磷钾 Mid P and K	0.0739	28.536	5055.0	0.9988	7818.8	193.1	178.9	164.7
		高量磷钾 High P and K	0.0863	30.243	4924.0	0.9927	7573.6	175.2	163.1	150.9
	P ₂ O ₅	低量氮钾 Low N and K	0.2628	57.177	4474.1	0.9905	7584.1	108.8	103.7	100.8
		中量氮钾 Mid N and K	0.1851	50.358	4636.2	0.9858	8061.3	136.0	128.7	124.7
		高量氮钾 High N and K	0.1822	47.555	4787.5	0.9773	7890.5	130.5	123.1	119.0
	K ₂ O	低量氮磷 Low N and P	0.3561	35.025	6732.1	0.8537	7593.3	49.2	45.1	43.5
		中量氮磷 Mid N and P	0.4147	45.607	6720.6	0.9526	7974.5	55.0	51.5	50.0
		高量氮磷 High N and P	0.3781	40.142	6790.0	0.9348	7855.5	53.1	49.3	47.6

注 (Note) : 2002—2006 年高、中、低氮量分别为 220、180、140 kg/hm²; 2002—2006 年高、中、低磷量分别为 120、100、80 kg/hm²; 2002—2006 年高、中、低钾量分别为 70、50、20 kg/hm²; 2012—2016 年高、中、低氮量分别为 230、190、150 kg/hm²; 2012—2016 年高、中、低磷量分别为 140、120、90 kg/hm²; 2012—2016 年高、中、低钾量分别为 90、70、50 kg/hm². High, middle and low N input was 220 kg/hm², 180 kg/hm², 140 kg/hm² from 2002 to 2006; High, middle and low P input was 120 kg/hm², 100 kg/hm², 80 kg/hm² from 2002 to 2006; high, middle and low K input was 70 kg/hm², 50 kg/hm², 20 kg/hm² from 2002 to 2006; high, middle and low N input was 230 kg/hm², 190 kg/hm², 150 kg/hm² from 2012 to 2016; high, middle and low P input was 140 kg/hm², 120 kg/hm², 90 kg/hm² from 2012 to 2016; high, middle and low K input was 90 kg/hm², 70 kg/hm², 50 kg/hm² from 2012 to 2016. Max.—Fertilization rate for the maximum yield; Opt—Optimum fertilizer rate; Reas—Reasonable fertilizer application rate. 肥料效应函数 Fertilizer effect function: $y = ax^2 + bx + c$; Wheat 2.0 yuan/kg; N 4.35 yuan/kg; P₂O₅ 5.43 yuan/kg; K₂O 5.83 yuan/kg.

量反映了最优施肥投资收益,更符合农户的实际需求^[9],因此我们进一步采用经济合理施肥量计算施肥配方。通常冬小麦生产中使用 600 kg/hm² 复合肥做基肥,追施氮肥 (N) 69.0 kg/hm²,根据 1.2 的试验,我们采用氮、磷、钾在副处理“中量磷钾”“中量氮钾”和“中量氮磷”的经济合理用量值计算冬小麦复合肥中氮、磷、钾比例。2002—2006 年,这 3 个值分别为 172.3、111.6 和 54.0 kg/hm² (表 6),则复合肥中氮、磷、钾含量分别为 N = (172.3-69.0)/

600.0 × 100% = 17.2%, P₂O₅ = 111.6/600.0 × 100% = 18.6%, K₂O = 54.0/600.0 × 100% = 9.0%。即 2002—2006 年时间段内冬小麦所用复合肥氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 配比为 1.0-1.08-0.52。2012—2016 年,氮、磷、钾在副处理“中量磷钾”“中量氮钾”和“中量氮磷”中的经济合理用量值分别为 164.7、124.7 和 50 kg/hm² (表 6),计算得复合肥中氮、磷、钾含量为 N 16.0%、P₂O₅ 20.8%、K₂O 8.3%,因此 2012—2016 年冬小麦复合肥氮 (N)、磷

(P_2O_5)、钾 (K_2O) 配比为 1.0–1.3–0.51。

2006 年农民习惯施肥的氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 配比为 16–16–10, 与冬小麦生产所需的理论配比相比, 氮肥和磷肥的比例略低, 而钾肥配比比正常需要量大约多 60%。所以施肥优化方案应该增加肥料中的氮、磷含量, 减少钾的含量。2016 年农民习惯施肥的氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 配比为 18–22–10, 与理论配比相比, 氮、磷、钾肥均偏多, 所以冬小麦生产的优化施肥方案是减少氮、磷、钾的用量。

2.3.2 冬小麦施肥配方优化田间试验 根据冬小麦施肥配方优化试验结果 (表 7) 可知, 2006 年, 与常规配方处理 1 相比, 增氮 2%、增磷 2% 处理分别使冬小麦平均增产 5.8% 和 6.8%, 差异均达到显著水平; 减钾 2% 处理中小麦产量与处理 1 相比无显著变化。即在北方冬小麦区常规施肥配方中增施 2% 氮或 2% 磷均能使小麦产量显著增加, 而减少 2% 钾对小麦产量没有显著影响。因此, 冬小麦施肥氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 配比 16–16–10 可调为 18–18–8。

2016 年, 与常规配方处理比较, 氮肥减少 2% 后小麦产量没有发生显著变化, 即氮肥减少 2% 没有造成小麦减产; 磷肥减少 2% 使小麦产量平均增加 6.6%; 减钾 2% 处理中, 91% 试验点的小麦产量没有发生显著变化, 变幅低于 5%。因此, 小麦生产施肥氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 为 18–22–10 可统一调低 2%, 即为 16–20–8。此施肥配方比常规配方氮、磷、钾的总量减少 12.0%, 同时没有造成小麦明显减产。

比较 2016 年与 2006 年小麦生产氮、磷、钾优化配比发现, 针对当前市场上肥料配比现状, 我们在生产中应该适当降低氮肥施用量, 适当增加磷肥施用量, 而钾肥可以保持不变。华北地区小麦生产中施肥氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 优化配比为 16–20–8。

3 讨论

3.1 土壤供肥能力变化对推荐施肥量的影响

过量施肥往往造成养分在土壤中累积, 土壤养分供应能力逐渐增强^[19–21]。在 1978–2008 年 30 年间, 太行山山麓平原冬小麦生产地区土壤供应氮、磷、钾的能力分别增加了 37.9、0.7、2.1 个百分点^[6]。过量施肥导致肥料利用率下降、土壤养分累积等问题引起了广泛关注: 张福锁等^[22]和闫湘等^[23]统计分析

了中国 2001–2005 年粮食作物氮、磷、钾利用率; 朱兆良^[24]分析了中国 1998 年粮食作物氮、磷、钾利用率。以上研究结果发现, 近年来中国粮食作物肥料利用率呈下降趋势。本研究也发现, 小麦地力产量由于施肥过量而逐年增加; 但是施肥量增幅高于产量增幅, 导致肥料的农学效率、施肥增产率总体呈逐年下降趋势。

1986 年, 杨守春等^[12]根据多年多点试验效应函数计算出我国黄淮海地区小麦的最高理论产量为 5031 kg/hm², 获得最高产量所需 N、 P_2O_5 分别为 183.3、160.5 kg/hm²。本研究计算 2016 年冬小麦最高产量为 7796 kg/hm², 获得最高产量的平均 N、 P_2O_5 用量分别为 184.3、125.1 kg/hm²。此结果与 1986 年的结果相比, 理论最高产量增加了 54.9%, 氮肥用量一致, 磷肥用量下降 22.0%, 即 2016 年磷肥用量减少 22.0%, 但小麦产量增产 54.9%。这些结果说明, 过量施用氮肥增加了氮肥损失, 降低氮肥增产效应, 也使土壤供氮量变幅减少; 过量施用磷肥导致土壤磷积累, 土壤供磷量明显增加, 使高产时磷肥推荐量逐渐降低。这些结果都为当前推荐施肥和减肥增效提供了有力的理论支撑。

另外, 本研究还设计了不同肥力下的氮磷钾肥料效应田间试验, 其中不同肥力水平代表不同的土壤供肥能力。此试验结果表明, 中、低肥力下, 肥料效应函数计算出的氮、磷、钾用量与基础施肥水平呈正相关; 而高量施肥时则相反, 这与 20 世纪 80 年代杨守春等^[12]的研究结果一致。对于钾肥产量效应, 不同施肥水平下钾肥推荐用量变化幅度较小, 这可能与连续秸秆还田后提高了土壤供钾能力, 进而降低了钾肥产量效应有关, 在生产实践中, 农户不施用钾肥未造成小麦显著减产的情况也确实比较普遍。

3.2 田间试验优化施肥配方

根据多年多点试验, 华北地区冬小麦氮、磷、钾最佳经济施肥量分别为 163.1~173.2、103.7~128.7、45.1~51.5 kg/hm², 其中氮、磷推荐量与其他学者研究结果基本一致^[25–26]。另外, 本研究计算出华北冬小麦氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 优化配比为 16–20–8, 此结果与农业部 2014 年推荐配比 15–20–12^[27]相比, 氮、磷占比基本一致但钾的用量降低, 这可能是近年来秸秆还田的结果。在秸秆还田过程中, 秸秆中的钾肥随秸秆重新进入耕地, 土壤中钾肥含量损失相对较少, 因此钾肥用量降低。

表 7 2006 和 2016 年北方冬小麦优化配方施肥产量 (kg/hm²) 及相对原配方的增长率 (%)

Table 7 Yield and yield increase of winter wheat in optimized compound fertilizer formula over the original one in north of China in 2006 and 2016

年份 Year	地点 Location		原配方 Original formula (kg/hm ²)	增氮配方		增磷配方		减钾配方	
				Increased N formula		Increased P formula		Decreased K formula	
				(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)
2006	安徽 Anhui	利辛 Lixin	7795.8 b	8235.2 a	5.6	8231.4 a	5.6	7789.3 b	−0.1
		宿州 Suzhou	4954.5 b	5311.5 a	7.2	5322.0 a	7.4	5012.7 a	1.2
		利辛 Lixin	6435.0 b	6830.5 a	6.1	6850.0 a	6.4	6469.2 b	0.5
	河北 Hebei	邯郸 Handan	5610.0 a	5760.0 a	2.7	5980.0 a	6.6	5730.0 a	2.1
		新乐 Xinle	7962.0 b	8496.0 a	6.7	8332.1 a	4.6	8032.0 a	0.9
		邢台 Xingtai	6784.3 b	7283.0 a	7.4	7197.1 a	6.0	6778.3 b	−0.1
	河南 Henan	夏邑 Xiayi	6162.0 b	6509.0 a	5.6	6634.8 a	7.8	6332.5 a	2.8
		方城 Fangcheng	7563.0 b	7857.5 a	3.9	7878.9 a	4.2	7743.0 a	2.4
		南阳 Nanyang	6003.0 b	6403.5 a	6.7	6300.5 a	4.7	6203.5 a	3.3
	山东 Shandong	济宁 Jining	8205.0 b	8645.0 a	5.4	8374.0 a	16.2	8314.5 a	1.3
		泰安 Tai'an	7272.0 b	7690.0 a	5.7	7662.0 a	5.3	7309.5 a	0.5
		菏泽 Heze	6399.0 b	6782.5 a	6.0	6852.0 a	7.0	6675.0 a	4.3
	平均 Mean		6762.1 b	7150.3 a	5.8	7134.6 a	6.8	6865.8 b	1.6
2016	江苏 Jiangsu	徐州 Xuzhou	6166.8 a	6178.0 a	0.2	6418.4 a	4.1	6622.8 a	7.4
	安徽 Anhui	阜阳 Fuyang	6948.0 a	7012.4 a	0.9	7639.5 a	10.0	6955.5 a	0.1
		宿州 Suzhou	7290.0 a	7384.5 a	1.3	7679.2 a	5.3	7705.0 a	5.7
	河北 Hebei	石家庄 Shijiazhuang	7242.0 a	7367.4 a	1.7	7546.9 a	5.6	7345.5 a	1.4
		辛集 Xinji	7150.0 a	7349.6 a	2.8	7442.0 a	4.1	7175.5 a	0.3
		永年 Yongnian	8673.0 a	8649.7 a	−0.3	9267.1 a	6.8	8709.0 a	0.4
	河南 Henan	浚县 Xunxian	8670.0 a	8744.5 a	0.9	8792.0 a	8.9	9045.0 a	4.3
		南阳 Nanyang	8875.0 a	9121.6 a	2.7	9364.5 a	5.5	8912.5 a	0.4
		许昌 Xuchang	6584.7 a	6673.4 a	1.3	7060.6 a	7.2	6829.1 a	3.7
	山东 Shandong	德州 Dezhou	6694.8 a	6743.1 a	0.7	7041.2 a	5.2	6886.4 a	2.9
		青州 Qingzhou	7952.4 a	8031.9 a	1.0	8643.3 a	8.6	7976.5 a	−0.1
		潍坊 Weifang	6797.5 a	6874.2 a	1.1	7264.7 a	8.3	6874.2 a	0.3
	平均 Mean		7420.4 a	7510.9 a	1.2	7846.6 a	6.6	7586.4 a	2.2

注 (Note): 2006 年增氮磷配方分别较原配方增加 2%, 减钾配方减少 2%; 2016 年试验 NPK 处理较原配方均减少了 2%。数据后不同小写字母表示同一地点小麦产量在不同处理间差异达 0.05 显著水平 In NPK treatment of 2006, N and P were added by 2% and K was decreased by 2%, compared with the original formula; In NPK treatments of 2016 the N, P and K inputs were all decreased by 2%, compared with the original formula. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments in the same location at 0.05 level.

受条件限制, 本研究仅对北方灌区冬小麦施肥配方进行了优化, 并没有研究北方雨养冬小麦区的最佳施肥方案。肥料产量效应田间校验法是将现有肥料配方与施肥产量效应试验结果进行对比, 对现有肥料配方进行田间校验, 同时结合肥料生产条件和成本因素制定肥料配方的方法。此方法以企业现有配

方为基础, 依据施肥产量效应试验对肥料配方进行调整, 一方面保证肥料配方科学性, 另一方面适应肥料规模化生产的需要, 简便可行。2016 年肥料配比经过肥料产量效应田间校验法优化后, 比原配方氮、磷、钾共减量 12.0%, 未造成小麦明显减产, 实现了农业推荐施肥技术与工业生产的有机结合。

4 结论

从 2002 年至 2016 年, 北方冬小麦土壤供肥能力逐渐提高, 平均地力产量由 2002 年的 4721.1 kg/hm² 增加到 2016 年的 5828.3 kg/hm², 年均增加 1.6%。施用氮磷钾能显著增加冬小麦产量, 但氮磷钾的增产率总体呈逐渐下降趋势; 氮磷钾农学效率由 2002 年的 9.0 kg/kg 逐渐降低至 2010 年后的 6.3~6.7 kg/kg, 年均降低 0.28 kg/kg。冬小麦优化 N-P₂O₅-K₂O 配比为 16-20-8, 推荐施肥方案为基肥施用该配方复合肥 600 kg/hm², 追施氮 69 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 中国国家统计局. 中国统计年鉴[EB]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>, 2018-6-28.
National Bureau of Statistics of China. China national statistical yearbook[EB]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>, 2018-6-28.
- [2] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 等. 华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析[J]. 华北农学报, 2008, (S1): 224-229.
Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Analysis of the current situation of wheat fertilization and the factors affecting wheat yield in the North China Plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, (S1): 224-229.
- [3] Chen X P. Optimization of the fertilizer management of a winter wheat summer maize rotation system in the Northern China Plain[D]. Stuttgart, Germany: PhD Dissertation, University of Hohenheim, 2003.14-30.
- [4] 赵久然. 北京郊区作物产量和氮肥施用的调查与分析[J]. 北京农业科学, 1997, 15: 36-38.
Zhao J R. Investigation and analysis of crop yield and nitrogen application in Beijing suburbs[J]. *Beijing Agricultural Science*, 1997, 15: 36-38.
- [5] 王法宏, 李汉元, 王旭清, 等. 当前山东小麦生产中存在的主要问题及技术对策[J]. 山东农业科学, 1998, (4): 4-6.
Wang F H, Li H Y, Wang X Q, *et al.* The main problems and technical countermeasures in wheat production in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Science*, 1998, (4): 4-6.
- [6] 刘建玲, 贾可, 廖文华, 等. 太行山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1325-1335.
Liu J L, Jia K, Liao W H, *et al.* Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang mountain during the period of 1978-2008[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1325-1335.
- [7] 张卫峰, 马文奇, 王雁峰, 张福锁. 中国农户小麦施肥水平和效应的评价[J]. 土壤通报, 2008, (5): 1049-1055.
Zhang W F, Ma W Q, Wang Y F, Zhang F S. Evaluation of fertilization level and effect of wheat in Chinese farmers[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, (5): 1049-1055.
- [8] 陈伦寿, 李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984.
Chen L S, Li R G. The principles and practices of fertilizer application in croplands[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1984.
- [9] 李仁岗. 肥料效应函数[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Li R G. Function of the yield response of crops to fertilizer[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [10] Liu J L, Liao W L, Zhang Z X, *et al.* Effect of phosphate fertilizer and manure on crop yield, soil P accumulation, and the environmental risk assessment[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1107-1114.
- [11] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 等. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择-经济和环境效益分析[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 346-353.
Chen X P, Zhou J C, Wang X R, *et al.* Economic and environmental evaluation on model for describing crop yield response to nitrogen fertilizer at winter-wheat and summer-corn rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 346-353.
- [12] 杨守春, 孙昭荣, 刘秀奇. 黄淮海平原不同土壤小麦氮、磷最佳用量的研究[J]. 土壤肥料, 1988, (1): 1-5.
Yang S C, Sun Z R, Liu X Q. Study on the optimum amount of nitrogen and phosphorus for wheat in different soils in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Soil and Fertilizer*, 1988, (1): 1-5.
- [13] 周竹叶. 我国化肥工业概况与发展趋势[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(10): 1-4.
Zhou Z Y. General situation and development trend of chemical fertilizer industry in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2019, 34(10): 1-4.
- [14] 朱彦锋, 刘建玲, 赵营. 河北省冬小麦专用肥配方优化研究[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(4): 15-18, 26.
Zhu Y F, Liu J L, Zhao Y. Study on the formula optimization of winter wheat special fertilizer in Hebei Province[J]. *Ningxia Agricultural and Forestry Science and Technology*, 2018, 59(4): 15-18, 26.
- [15] 车升国. 区域作物专用复合(混)肥料配方制定方法与应用[D]. 北京: 中国农业大学博士学位, 2015.
Che S G. Formulation method and application of regional crop specific compound (mixed) fertilizer[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [16] 吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
Wu L Q. Study on regional fertilization technology of three major grain crops in China based on “large formula and small adjustment” [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.
- [17] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2015.
Xu X P. Study on recommended fertilization methods for rice and maize based on yield response and agronomic efficiency[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [18] 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 experiment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1): 197-203.
- [19] 王乐, 张淑香, 马常宝, 等. 潮土区 29 年来土壤肥力和作物产量演

- 变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1435–1444.
- Wang L, Zhang S X, Ma C B, *et al.* Evolution characteristics of soil fertility and crop yield in fluvo-aquic soil area in the past 29 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1435–1444.
- [20] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 133–139.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133–139.
- [21] 孔宏敏, 何圆球, 吴大付, 等. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 782–786.
- Kong H M, He Y Q, Wu D F, *et al.* Effect of long term fertilizer application on crop yield and soil fertility of upland red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 782–786.
- [22] 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): 916–924.
- 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): 916–924.
- [23] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 450–459.
- Yan X, Jin J Y, He P, *et al.* Recent advances and prospects on the technology to increase fertilizer use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 450–459.
- [24] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 1–4.
- Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(1): 1–4.
- [25] 付文, 黄玉芳, 岳松华, 等. “大配方, 小调整” 施肥模式对不同地力小麦产量及经济效益的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (6): 235–240.
- Fu W, Huang Y F, Yue S H, *et al.* Effect of “regional fertilizer formula and site specific adjustment” fertilization mode on yield and economic benefit of wheat under soils with different fertilities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (6): 235–240.
- [26] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平. 中国小麦区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(11): 30–40.
- Wu L Q, Wu L, Cui Z L, Chen X P. Optimal regional nitrogen, phosphorus, potassium rates recommendations and special fertilizer formulae study for wheat in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(11): 30–40.
- [27] 农业部办公厅. 《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议(2013)》的通知[DB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2013/dbaq/201712/t20171219_6119839.htm.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Notice on regional large formula and fertilizer recommendation of wheat, corn and rice (2013) [DB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2013/dbaq/201712/t20171219_6119839.htm.