

中国小麦区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究

吴良泉^{1,2} 武良² 崔振岭² 陈新平^{2,3*} 张福锁^{1,2}

(1. 福建农林大学 国际镁营养研究所,福州 350002;

2. 中国农业大学 资源环境与粮食安全研究中心,北京 100193;

3. 西南大学 资源环境学院,重庆 402260)

摘要 为研究中国小麦不同区域氮磷钾肥优化用量及肥料配方,引导区域科学施肥并为肥料产品优化提供依据。在总结分析了2005—2010年在中国小麦主产区进行的各1575、4232和3924组的氮、磷和钾肥肥效试验,并在参考有关文献资料的基础上,将中国小麦主产区分为7个施肥亚区,并对这些区域的氮磷钾肥优化用量及肥料配方进行研究。结果表明:Ⅲ华北冬麦区的产量水平较高 $6.8\sim 7.5\text{ t/hm}^2$,Ⅱ-2西北灌溉冬麦区和Ⅳ长江中下游冬麦区次之 6.0 t/hm^2 ,其他区域较低 5.3 t/hm^2 ;7个小麦施肥亚区的氮肥推荐用量平均为 $\text{N } 169\text{ kg/hm}^2$,Ⅰ以东北春麦区最低 $\text{N } 106\text{ kg/hm}^2$,Ⅲ-1华北灌溉冬麦区最高 $\text{N } 184\text{ kg/hm}^2$;磷肥推荐用量平均为 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 77\text{ kg/hm}^2$,以Ⅴ西南麦区最低 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 55\text{ kg/hm}^2$,Ⅲ-1华北灌溉冬麦区最高 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 88\text{ kg/hm}^2$;钾肥推荐用量平均为 $\text{K}_2\text{O } 50\text{ kg/hm}^2$,以Ⅱ-1西北雨养旱作冬麦区最低 $\text{K}_2\text{O } 36\text{ kg/hm}^2$,Ⅲ-2华北雨养冬麦区最高 $\text{K}_2\text{O } 59\text{ kg/hm}^2$ 。根据上述不同生态区域的氮磷钾养分推荐用量及气候、栽培和土壤条件的差异,有针对性的为中国小麦7个施肥亚区确定了9个区域肥料配方,包括7个基追结合施肥方式下的配方和2个一次性施肥配方。

关键词 小麦;大区域;施肥亚区;推荐用量;肥料配方

中图分类号 S143

文章编号 1007-4333(2019)11-0030-11

文献标志码 A

Optimal regional nitrogen, phosphorus, potassium rates recommendations and special fertilizer formulae study for wheat in China

WU Liangquan^{1,2}, WU Liang², CUI Zhenling², CHEN Xinping^{2,3*}, ZHANG Fusuo^{1,2}

(1. International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Centre for Resources, Environment and Food Security, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract The aims of this study were to investigate the nitrogen, phosphorus, potassium rates and fertilizer formulae and provide references for optimal and scientific fertilization in different wheat production regions. Unreasonable formulae and application of fertilizer has been the main factors to limit wheat production. This study first summarized and analyzed a total of 1575, 4232 and 3924 on-farm experiments with various rates of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), and then conducted during 2005–2010 across major agro-ecological regions of wheat production in China. Based on the data and literature analysis, China wheat production area were divided into 7 sub-regions of fertilization. The optimal rates of N, P and K were then estimated and formulated optimized compound fertilizer in each sub-region. The results showed that: Wheat yield was highest in the North China Plain (Ⅲ), $6.8\sim 7.5\text{ t/hm}^2$, followed by the irrigated sub-region in the Northwest China (Ⅱ-2) and the middle and lower reaches of Yangtze River (region Ⅳ) 6.0 t/hm^2 , others were the lowest on average 5.3 t/hm^2 . In the nationwide, the optimal rates of N across all the 7 sub-regions were $\text{N } 169\text{ kg/hm}^2$ on average and ranged from $\text{N } 106\text{ kg/hm}^2$ in the Northeast China (Ⅰ) to $\text{N } 184\text{ kg/hm}^2$ in

收稿日期: 2019-02-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200400, 2016YFD0200401); 公益性行业(农业)科研专项(201103003, 201203013)

第一作者: 吴良泉, 讲师, 博士, 主要从事养分资源管理研究, E-mail: liangquan01@163.com

通讯作者: 陈新平, 教授, 主要从事养分资源管理研究, E-mail: chenxp@cau.edu.cn

the irrigated sub-region in the North China Plain (Ⅲ-1). The optimal rates of P were P_2O_5 77 kg/hm² on average and ranged from P_2O_5 55 kg/hm² in the southwest region (Ⅴ) to P_2O_5 88 kg/hm² in the irrigated sub-region in the North China Plain (Ⅲ-1). The optimal rates of K were K_2O 50 kg/hm² on average and ranged from K_2O 36 kg/hm² in the rain-fed sub-region in the Northwest China (Ⅱ-1) to K_2O 59 kg/hm² in the rain-fed sub-region in the North China Plain (Ⅲ-2). Given variation in the optimal nutrient rates, climate, crop production and soil types among different agro-ecological regions, a total of 9 regional special fertilizer formulae were designed for the 7 wheat sub-regions in China, including 7 formulae using a basal plus top-dressing fertilization approach and 2 formulae using only basal fertilization application.

Keywords wheat; region; sub-region of fertilization; optimal nutrient rate; fertilizer formula

中国是世界上最大的小麦生产和消费国。2012 年中国小麦总产量达到 12 058 万 t, 占世界小麦总产量的 17.9%^[1], 因此, 中国小麦生产在保障世界粮食安全中具有重要的地位。然而, 当前中国小麦主产区施肥不合理的问题仍比较突出。中国小麦的肥料利用率远低于国际水平, 与 20 世纪 80 年代相比均呈下降趋势^[2]; 已有研究对中国农户小麦的施肥状况的评价表明, 施用化肥过量较为明显, 施肥不经济^[3]; 中国小麦主产区施肥管理上存在不同区域和农户间化肥分布不均衡、化肥利用率低等问题^[4-5]。当前氮肥施用过量, 忽视土壤和环境养分的利用及与作物的养分供需不匹配是华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系肥料利用率低的重要原因, 应控制肥料总量并实现养分供需的时空匹配以协调作物高产和环境保护^[6-7]。因此, 确定区域优化肥料用量能够促进肥料的优化管理, 有助于国家制定相关政策。然而, 目前鲜有针对中国小麦不同区域优化施肥量的系统报道。

农业生产中复合肥施用量呈逐年增加的趋势, 2014 年复合肥施用量占中国化肥总施用量的 35.3%^[8]。然而, 当前市场上大多数复合肥产品尚不能很好地满足小麦生产需求。已有研究通过大样本的农户调查研究表明, 与施用单质肥的农户相比, 施用复合肥对小麦单产贡献不明显, 主要原因在于复合肥配方设计脱离小麦养分需求特征和区域土壤特点^[9]。因此, 基于小麦作物的养分需求特征和区域土壤的属性设计区域作物专用复合肥配方对于实现区域优化施肥意义重大。已有研究主要从田块、乡镇、县域等尺度对小麦肥料配方做了相关研究^[10-12], 然而, 由于缺乏大量的数据支撑, 在全国大区域范围内仍缺乏系统的报道。

因此, 本研究拟基于之前在玉米和水稻上建立的方法^[13-14], 以中国小麦主要产区作为研究对象, 整理分析 2005—2010 年开展的 1 575 氮肥肥效试验、4 232 磷肥肥效试验和 3 924 组钾肥肥效

试验, 根据气候、栽培、地形和土壤肥力等因素进行施肥分区, 在分区的基础上, 依据区域内土壤养分供应特征、作物养分需求和作物肥效反应确定区域氮磷钾肥的优化用量, 并根据“大配方、小调整”的技术思路, 以期确定中国小麦不同生态区域的肥料配方。

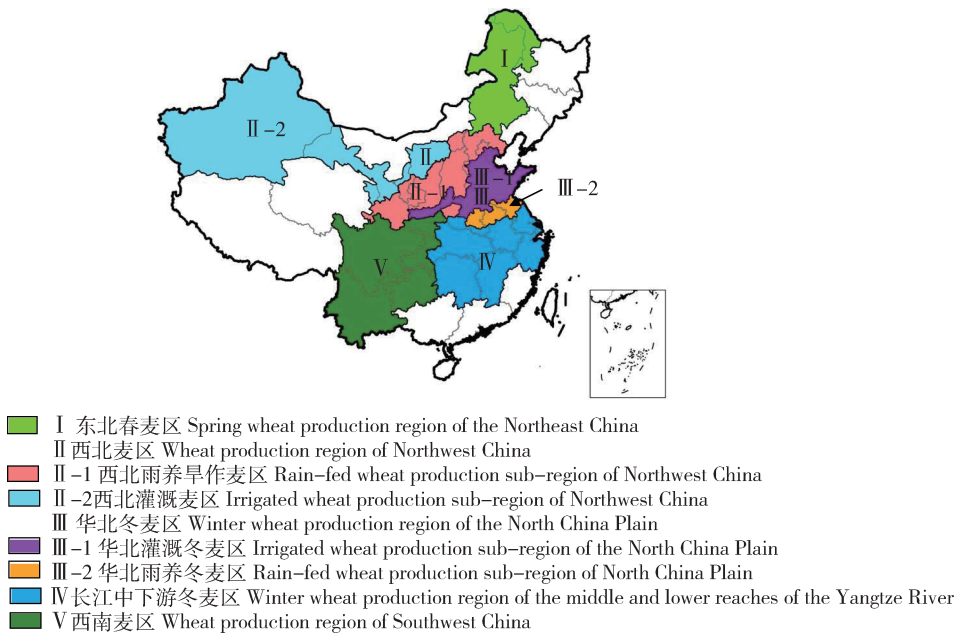
1 材料与方 法

1.1 中国小麦施肥分区

本研究基于 GIS(地理信息系统)的中国县域农业统计数据库, 在参考有关中国小麦区划文献的基础上^[15-20], 充分考虑影响小麦生产的气候、栽培、地形和土壤条件进行等关键因素, 确定中国小麦的施肥分区。本研究将中国小麦主产区分为 5 个大区, 即: I 东北春麦区、II 西北麦区、III 华北冬麦区、IV 长江中下游冬麦区和 V 西南麦区。在大区划分的基础上, 根据灌溉条件将西北麦区划分为 2 个亚区: II-1 西北雨养旱作麦区和 II-2 西北灌溉麦区。根据灌溉条件和土壤条件将华北冬麦区划分为 2 个亚区: III-1 华北灌溉冬麦区(此区以灌溉小麦为主, 土壤肥力较高)和 III-2 华北雨养冬麦区(此区以雨养旱作为主, 土壤肥力较低)。亚区的划分保持了县域行政单元的完整性(图 1)。这 7 个亚区(I、II-1、II-2、III-1、III-2、IV 和 V)的小麦播种面积占全国小麦播种面积的百分比分别为 1.7%、6.8%、7.4%、40.1%、18.0%、15.1%和 10.2%; 小麦总产量所占百分比分别为 1.1%、5.3%、6.7%、46.2%、20.1%、14.3%和 5.6%。

1.2 试验处理

为确定不同区域的氮、磷、钾肥推荐用量, 本研究采用了来自于 2005—2010 年公益性行业(农业)科研专项、全国养分资源管理协作网和农业部测土配方施肥项目的 1 575 氮钾肥肥效试验、4 232 磷肥肥效试验和 3 924 组钾肥肥效试验(表 1)。所有试验均未施用有机肥, 试验设计采用随机区组排列, 小



相关统计数据均未包含台湾省、香港和澳门地区,下同。

Not include data from Taiwan Province, Hong Kong and Macao regions. The same below.

图1 中国小麦施肥分区图

Fig. 1 Regionalization of wheat fertilization in China

区面积均在 30 m^2 以上。其中:1)所有氮肥肥效试验点均包含 4 个氮水平: N_0 (不施肥), $50\% N_{opt}$, N_{opt} (根据当地专家推荐确定的氮肥优化施用量)和 $150\% N_{opt}$ 。不同试验点 N_{opt} 的平均值为 $N 200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 变幅为 $N 60 \sim 344 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 2)磷肥肥效试验采用了不施磷对照和优化施磷区处理。不同试验点的优化施磷量平均为 $P_2O_5 115 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ($P_2O_5 35 \sim 210 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。该试验主要用于分析不同区域小麦对磷肥的产量反应及其与土壤有效磷含量的关系; 3)钾肥肥效试验中有 3 547 组包含 4 个钾水平: K_0 , $50\% K_{opt}$, K_{opt} (根据当地专家推荐确定的钾肥优化施用量)和 $150\% K_{opt}$; 397 组试验包含 2 个钾水平 (K_0 和 K_{opt})。不同试验点的 K_{opt} 水平施钾量平均为 $K_2O 105 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 变幅为 $K_2O 30 \sim 225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

1.3 取样、样品分析和测产

在试验实施之前,各试验取 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品,风干过筛后,采用电位法测定 pH,外加加热重铬酸钾容量法测定有机质,开氏法测定全氮, $0.5 \text{ mol}/\text{L}$ NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法测定有效磷, $1.0 \text{ mol}/\text{L}$ NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定速效钾^[21]。在小麦成熟期,按小区划取 $8 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的测产样方进行人工测产,小麦的产量换算成含有 15% 水分的标准产量。

1.4 数据处理

1.4.1 不同区域氮肥推荐用量的计算方法

本研究基于区域内多年多点的肥效试验,依据氮肥总量控制的方法确定不同区域氮肥推荐用量,具体计算方法见参考文献[13]。本研究中小麦价格为 $2.18 \text{ 元}/\text{kg}$,氮(N)肥价格为 $4.87 \text{ 元}/\text{kg}$,氮肥价格与小麦价格比为 $2.23 : 1$ (氮肥和小麦价格为 2012 年 4 个季度的平均值,数据来源于神农网 <http://www.sn110.com/>)。

1.4.2 不同区域磷肥推荐用量的计算方法

本研究基于养分平衡原理和土壤测试确定磷肥恒量监控的策略,将土壤有效磷含量控制在能够持续获得高产且不对环境构成风险的范围内,具体原理与方法见参考文献[13]。不同生态区域小麦单位产量下吸磷量由 2000—2012 年本课题组研究数据和文献调研数据计算获得:西北麦区和华北冬麦区每生产 100 kg 籽粒需磷量 (P_2O_5) 分别为 0.87 kg ($n=78$) 和 0.90 kg ($n=684$),东北春麦区参照西北麦区按 0.87 kg 、西南麦区和长江中下游冬麦区参照华北冬麦区按 0.90 kg 。当缺磷区相对产量 $< 85\%$ (或土壤 Olsen-P $< 20 \text{ mg}/\text{kg}$,土壤肥力处于较低水平),磷肥用量为作物带走量的 1.3 倍;当缺磷区相对产量介于 $85\% \sim 90\%$ (或土壤 Olsen-P 介于

20~25 mg/kg, 土壤肥力已接近于适宜水平), 磷肥用量为作物带走量的 1.15 倍, 以小幅度提高土壤地力, 其中由于 II-1 华北灌溉冬麦区为冬小麦-夏玉米轮作体系, 考虑到冬小麦苗期生长处于低温条件, 对磷的反应较为敏感, 磷肥推荐上将冬小麦-夏玉米视为一个整体^[22], 将更大比例的磷肥应用到冬小麦季上, 因此, 冬小麦季磷肥用量调整为作物带走量的

1.3 倍, 夏玉米季磷肥的用量为作物带走量。

1.4.3 不同区域钾肥推荐用量的计算方法

本研究以田间试验为基础, 依据钾肥肥效反应的方法, 通过施肥量与作物产量反应的数据关系计算最佳经济施肥量, 将钾肥优先施到增产效应明显的区域和作物上。钾肥肥效反应的方法见参考文献[13]。

表 1 不同区域小麦氮磷钾肥效试验样本数和土壤的基本养分性状

Table 1 The sample number of on-farm nitrogen, phosphorus and potassium experiments and the basic soil properties in seven wheat production sub-regions

区域 Region	样本数 Sample number			pH	有机质/ (g/kg) Organic matter	全氮/ (g/kg) Total N	有效磷/ (mg/kg) Available P	速效钾/ (mg/kg) Available K
	氮肥 Nitrogen	磷肥 Phosphorus	钾肥 Potassium					
I	22	22	22	6.9±0.4	61.5±14.3	2.8±0.6	16.7±6.6	222±72
II-1	254	254	245	8.1±0.6	15.5±6.3	1.3±5.4	19.9±18.5	160±72
II-2	160	160	161	8.1±0.7	17.0±7.1	0.8±0.4	16.2±9.3	186±87
III-1	2 836	2 836	2 696	7.9±0.5	15.1±5.6	1.0±1.1	22.8±14.4	123±53
III-2	661	661	509	7.6±0.8	16.2±4.8	1.0±0.7	18.8±12.1	131±53
IV	229	229	229	7.2±0.8	17.7±6.0	2.0±5.4	15.6±9.8	111±46
V	70	70	62	7.3±0.7	18.9±10.1	1.1±0.5	21.8±13.0	109±40
总计 Sum	1 575	4 232	3 924	7.8±0.6	15.8±6.7	1.1±0.7	21.3±14.1	128±58

1.4.4 区域大配方设计及小调整方案

1) 大配方设计

大配方的设计原理与方法见参考文献[13]。

① 基追结合的施肥方案, 即氮肥基追比例的确定: I 东北春麦区和 III-1 华北灌溉冬麦区的基追比例为 1:2; II-2 西北灌溉麦区的基追比例为 4:6; III-2 华北雨养冬麦区、IV 长江中下游冬麦区和 V 西南麦区的基追比例为 5:5;

② 一次性施肥方案: 在干旱雨养的区域 (II-1 西北雨养旱作麦区和 III-2 华北雨养冬麦区) 设计一次施肥的配方。

③ 总养分浓度的设计: 本研究所有区域都设计了高浓度配方 (以总养分浓度 (N+P₂O₅+K₂O) 45% 为例); 针对 IV 长江中下游冬麦区和 V 西南麦区同时设计中浓度配方 (以总养分浓度 (N+P₂O₅+K₂O) 30% 为例)。

2) 小调整方案

根据产量水平调整用量, 方法见参考文献[13]。

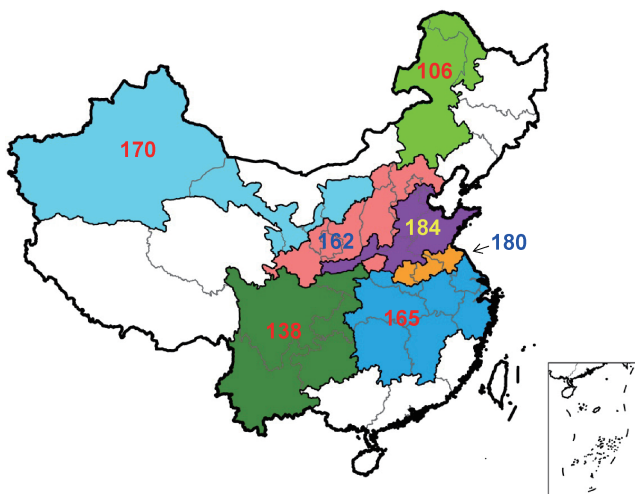
2 结果与分析

2.1 不同区域氮肥推荐用量

运用 MRTN 法 (Maximum return to N, 区域最大收益施氮量) 计算得到不同区域氮肥的推荐用量 (图 2)。7 个施肥区的氮肥推荐用量 (以纯 N 计) 变幅为 106~184 kg/hm², 加权平均为 169 kg/hm²。区域间的推荐用量存在较大差异: III 华北冬麦区最高 180~184 kg/hm²; II 西北麦区和 IV 长江中下游麦区次之, 分别为 162~170 和 165 kg/hm²; V 西南麦区略低 138 kg/hm²; I 东北春麦区最低为 106 kg/hm²。

2.2 不同区域磷肥推荐用量

不同区域的土壤速效磷 (Olsen-P) 在 15.6~22.8 mg/kg, 处于较低水平 (表 2); 为缺磷区相对产量在 82.8%~86.5%, 具有明显的增产效应; 不同区域的目标产量存在一定的差异, III 华北冬麦区的目标产量较高 6.8~7.5 t/hm², II-2 西北灌溉冬麦



单位: kg/hm² Unit: kg/hm²

图2 不同区域氮肥推荐用量

Fig. 2 Optimal regional N rates across all seven wheat sub-regions in China

表2 不同区域磷肥推荐用量

Table 2 Optimal regional phosphorus rates across all seven wheat sub-regions in China

区域 Region	速效磷/ (mg/kg) Olsen-P	相对产量/ % Relative yield	目标产量/ (t/hm ²) Target yield	施肥策略 Strategy of P recommendation	磷肥(P ₂ O ₅)推荐用量/ (kg/hm ²) Optimal P rate
I	16.7±6.6	83.4	5.3	等于作物带走量×1.3	60
II-1	19.8±18.5	84.1	5.3	等于作物带走量×1.3	60
II-2	15.8±9.3	82.8	6.0	等于作物带走量×1.3	68
III-1	22.8±14.4	86.5	7.5	等于作物带走量×1.3 [#]	88
III-2	18.8±12.1	85.2	6.8	等于作物带走量×1.3	80
IV	15.6±9.8	84.5	6.0	等于作物带走量×1.3	70
V	21.7±13.0	83.6	5.3	等于作物带走量×1.15	55

注: #, III-1 华北灌溉冬麦区的冬小麦主要与夏玉米轮作,磷肥施用时应将冬小麦-夏玉米作为一个整体来考虑,将大比例的磷应用到对磷肥更为敏感的冬小麦季上,故而将冬小麦季磷肥推荐用量调整为作物带走量的1.3倍,夏玉米季磷肥推荐用量为作物带走量。

Note: #, the cropping system of III-1 North China Plain irrigation winter wheat region is typical winter wheat-summer maize rotation system. P should be recommended as a whole and more P is applied to winter wheat. P recommendation rate of winter wheat is equivalent to 130% crop removal, while the P recommendation of summer maize is equivalent to crop removal.

区和IV长江中下游冬麦区次之6.0 t/hm²,其他区域较低5.3 t/hm²。

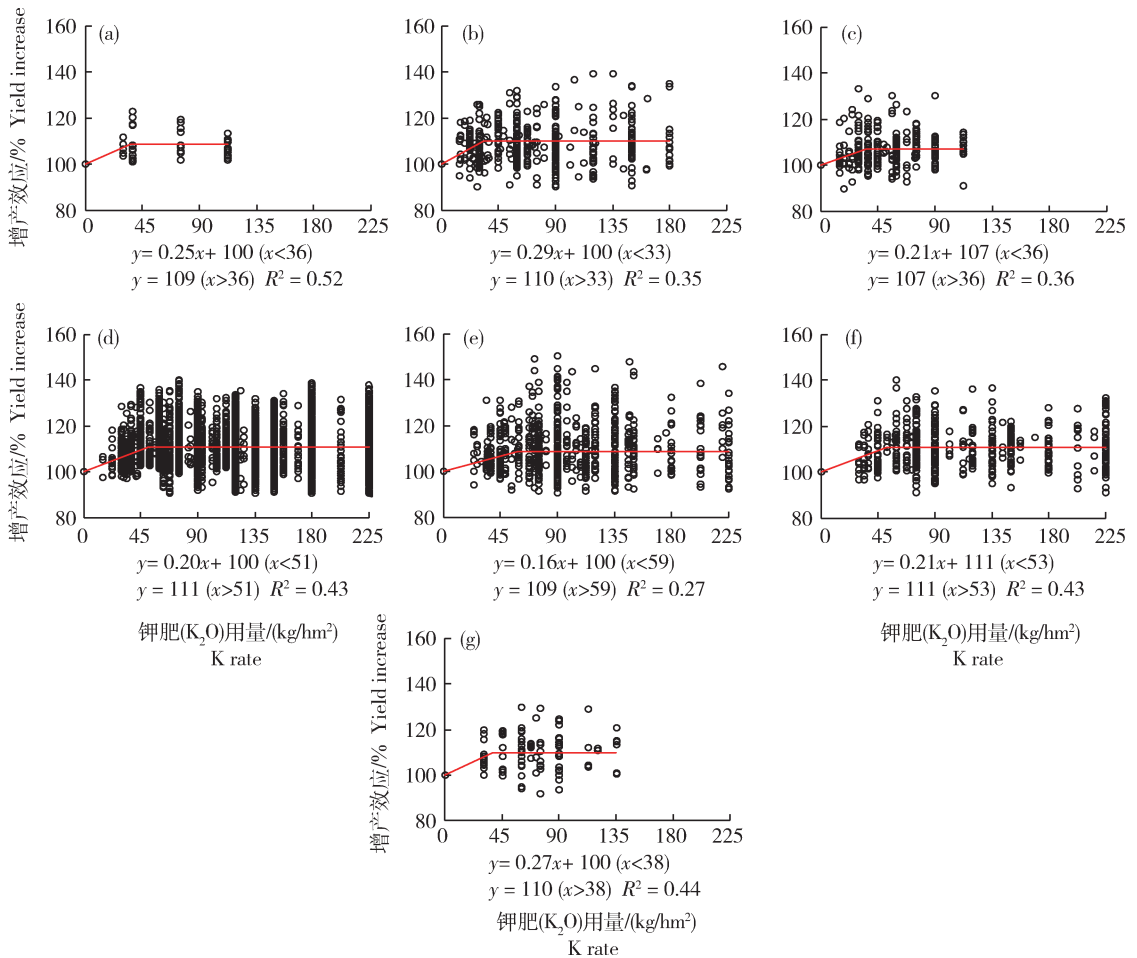
根据恒量监控的原则,缺磷区相对产量<85% (或土壤 Olsen-P<20 mg/kg) 的区域,如I东北春麦区、II-1西北雨养旱作麦区、II-2西北灌溉麦区、III-2华北雨养冬麦区和IV长江中下游冬麦区,应采

取较快提高土壤肥力的策略,磷肥用量为作物带走量的1.3倍;缺磷区相对产量介于85%~90% (或土壤 Olsen-P 介于20~25 mg/kg) 的区域,如V西南麦区,应采取适当提高肥力的策略,磷肥推荐用量为作物带走量的1.15倍。然而,由于II-1华北灌溉冬麦区为冬小麦-夏玉米轮作体系,磷肥推荐上应

将两季作物视为一个整体^[22],将更大比例的磷肥应用到对磷肥更为敏感的冬小麦上,因此,Ⅱ-1 华北灌溉冬麦区冬小麦季磷肥推荐用量调整为作物带走量的 1.3 倍,夏玉米季磷肥推荐用量为作物带走量。7 个小麦施肥亚区的磷肥推荐用量(以 P_2O_5 计)的变幅为 55~88 kg/hm^2 ,加权平均为 77 kg/hm^2 ;Ⅲ华北冬麦区的磷肥推荐用量最高 80~88 kg/hm^2 ;Ⅳ长江中下游冬麦区和Ⅱ-2 西北灌溉麦区次之 68~70 kg/hm^2 ;Ⅰ东北春麦区、Ⅱ-1 西北雨养旱作麦区和Ⅴ西南麦区较低 55~60 kg/hm^2 。

2.3 不同区域钾肥推荐用量

通过“线性+平台”模型拟合获得不同区域小麦的钾肥推荐用量(图 3)。7 个小麦施肥亚区的最佳钾肥用量(以 K_2O 计)的加权平均为 50 kg/hm^2 ,变幅在 36~59 kg/hm^2 ;Ⅲ华北冬麦区的钾肥最佳用量最高;Ⅲ-1 华北灌溉冬麦区和Ⅲ-2 华北雨养冬麦区分别为 51 和 59 kg/hm^2 ;Ⅳ长江中下游冬麦区的次之 53 kg/hm^2 ;其他区域较低Ⅰ东北春麦区,Ⅱ-1 西北雨养旱作麦区,Ⅱ-2 西北灌溉麦区和Ⅴ西南麦区的钾肥最佳用量分别为 36, 33, 36 和 38 kg/hm^2 。



(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)和(g)分别代表Ⅰ东北春麦区、Ⅱ-1西北雨养旱作麦区、Ⅱ-2西北灌溉麦区、Ⅲ-1华北灌溉冬麦区、Ⅲ-2华北雨养冬麦区、Ⅳ长江中下游冬麦区和Ⅴ西南麦区。

(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) and (g) represent spring wheat production region of Northeast China (Ⅰ), rain-fed wheat production sub-region of Northwest China (Ⅱ-1), irrigated wheat production sub-region of Northwest China (Ⅱ-2), irrigated wheat production sub-region of Northwest China (Ⅲ-1), rain-fed wheat production sub-region of North China Plain (Ⅲ-2), winter wheat production region of the middle and lower reaches of the Yangtze River (Ⅳ), wheat production region of Southwest China (Ⅴ).

图 3 不同区域钾肥用量与增产效应之间的关系

Fig. 3 Correlation between yield increase and K application rates across seven wheat sub-regions in China

2.4 不同区域的大配方

针对全国小麦的7个施肥亚区共设计了9个肥料配方(以 $N-P_2O_5-K_2O$ 计),其中包括基追结合施肥方式下的配方7个(表3): I 东北春麦区的配方为12-20-13; II-2 西北灌溉麦区的配方为17-18-10; III-1 华北灌溉冬麦区的配方为15-20-12; III-2 华北雨养冬麦区的配方为18-15-12; IV 长江中下游冬麦区的低浓度配方为12-10-8、高浓度配方为18-15-12; V 西南麦区的低浓度配方为12-10-7、高浓度配方为19-15-11。这些配方适宜作为基肥施用,在关键生育时期追施氮肥,并根据产量水平进行相应调整肥料用量。另外,根据气候特点和栽培管理条件(是否雨养),本研究针对2个亚区设计了一次性施肥配方2个: II-1 西北雨养旱作麦区的配方为28-12-5; III-2 华北雨养冬麦区的配方为25-12-8。这些配方适宜作为基肥一次性施用。

3 讨论

3.1 中国小麦生产中氮肥的区域优化

李红莉等^[23]调查结果显示,2007年中国小麦氮肥平均施用量为 $N\ 229\ kg/hm^2$,显著高于本研究中基于总量控制方法确定的全国平均用量 $N\ 169\ kg/hm^2$ 。华北平原作为中国小麦生产的主产区(小麦总产量占全国总产的66%),氮肥的过量施用也仍较为普遍。华北灌溉冬麦区和华北雨养冬麦区的氮肥平均用量分别达 $N\ 240$ 和 $200\ kg/hm^2$ ^[24]。华北地区冬小麦过量的氮肥施用造成农田氮素大量盈余,氮素存在严重的浪费和损失问题^[6];Ju等^[25]研究表明华北地区的冬小麦-夏玉米轮作体系中,农户传统施肥量高达 $N\ 550\sim\ 600\ kg/hm^2$ 的情况下,与最优施肥相比没有增加作物产量,而氮素损失量却大约是最优施肥处理的两倍,引起严重的大气和水体污染;Cui等^[26-27]研究也表明,由于过量施肥,小麦生长季有大量的硝酸盐累积(超过 $N\ 172\ kg/hm^2$ 累积于 $0\sim\ 90\ cm$ 土层);与农户传统施肥习惯相比,氮肥优化管理明显减少硝酸盐的累积量 $N\ 81\ kg/hm^2$ 和氮损失量 $N\ 118\ kg/hm^2$ 。根据总量控制的方法,III-1 华北灌溉冬麦区和III-2 华北雨养冬麦区的为 $N\ 184$ 和 $180\ kg/hm^2$,显著低于农户施氮水平。因此,通过氮肥的总量控制不仅可以满足作物高产的需求,同时可以提高养分资源利用效率,保护生态环境。

3.2 中国小麦生产中磷肥的合理施用

磷肥的施用应将土壤速效磷含量持续控制在能够持续获得高产且不造成环境风险的适宜范围内^[28]。一些地区由于连续多年大量施用磷肥,农田土壤磷大量累积盈余,土壤有效磷上升较快。曹宁等^[28-29]研究表明,中国主要农田土壤中每盈余 $100\ kg/hm^2$ 磷(P)平均可使土壤Olsen-P提高约 $3.1\ mg/kg$,而1980年到2003年间除经济作物农田之外的农田土壤磷(P)盈余约为 $392\ kg/hm^2$ 。根据土壤磷收支平衡和有效磷的关系可知,土壤磷养分处于一个快速提高的过程。当前中国小麦不同区域的土壤有效磷(Olsen-P)在 $15.6\sim\ 22.7\ mg/kg$ (加权平均为 $19.9\ mg/kg$),与1982—1985年期间的全国土壤有效磷平均含量 $7.4\ mg/kg$ (Olsen-P)^[30]相比,有明显的提升。Tang等^[31]对北京昌平、河南郑州和陕西杨凌的长期定位试验研究结果显示,冬小麦获得高产的土壤磷临界浓度为 $12.5\sim\ 19.0\ mg/kg$;Bai等^[32]对陕西杨凌和湖南祁阳的长期定位试验研究表明,小麦获得最佳产量的土壤Olsen-P临界值分别为 12.7 和 $16.1\ mg/kg$;孙义祥^[33]对山东省冬小麦施肥技术的研究认为,土壤有效磷(Olsen-P)应控制在 $30\sim\ 40\ mg/kg$ (缺磷区相对产量达到90%~95%)以保证高产和避免环境风险。根据上述结果分析,可将土壤有效磷水平调控在 $15\sim\ 40\ mg/kg$,既能保障作物持续高产又能避免环境风险。总体而言,当前中国小麦主产区的土壤磷已经由缺乏转为较适宜的水平,磷肥的管理的策略也应做相应的调整,由过去的大量投入快速培肥的阶段转向适当控制磷肥用量逐步走向维持平衡,否则在未来不久的时间内将面临过高肥力可能造成的环境风险。李红莉^[23]通过大量的调查研究表明2000—2007年中国小麦主产区农户磷肥的平均用量有一定下降,由2000年的 $P_2O_5\ 114\ kg/hm^2$ 下降到 $P_2O_5\ 98\ kg/hm^2$,然而仍显著高于本研究中基于恒量监控方法推荐的 $P_2O_5\ 55\sim\ 88\ kg/hm^2$ (加权平均 $P_2O_5\ 77\ kg/hm^2$)。因此,在现阶段应适当控制小麦生产中的磷肥用量,加强宏观调控,引导磷肥工业合理发展并指导磷肥的合理施用,使肥料用量趋于合理,既能保证作物稳产高产,同时又不对环境构成威胁。

3.3 中国小麦生产中钾肥的合理使用

由于中国钾矿资源的缺乏,钾肥的进口依赖度较高,钾肥的应用很大程度受到国际钾矿资源垄断

表 3 中国小麦不同区域肥料配方与施肥建议

Table 3 Regional fertilizer formula and fertilizer recommendations across all seven wheat sub-regions in China

区域 Region	推荐配方 Fertilizer formula N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	产量水平/ (t/hm ²) Yield level	基肥(配方肥)用量/ (kg/hm ²) Basal dosage of special fertilizer	追肥(尿素)用量/ (kg/hm ²) Side dressing urea
I	12-20-13 [#] ‡	3.8~5.3	214~300	107~150
		5.3~6.8	300~385	150~193
		>6.8	385~471	193~236
		<3.8	128~214	64~107
II-1	28-12-5*‡	3.8~5.3	357~500	0
		5.3~7.5	500~714	0
		>7.5	714~856	0
		<3.8	214~357	0
II-2	17-18-10 [#] ‡	4.5~6.0	283~377	165~219
		6.0~8.3	377~518	219~302
		>8.3	518~613	302~356
		<4.5	189~283	110~165
III-1	15-20-12 [#] ‡	6.0~7.5	360~450	196~245
		7.5~9.0	450~540	245~293
		>9.0	540~630	293~342
		<6.0	270~360	147~196
III-2	18-15-12 [#] ‡	5.3~6.8	415~533	142~183
		6.8~9.0	533~711	183~243
		>9.0	711~830	243~284
		<5.3	296~415	101~142
	25-12-8*‡	5.3~6.8	583~750	0
		6.8~9.0	750~1 000	0
>9.0	1 000~1 167	0		
<5.3	417~583	0		
IV	12-10-8 [#] §	4.5~6.0	510~680	136~181
		6.0~8.3	680~935	181~249
		>8.3	935~1105	249~295
		<4.5	340~510	91~136
	18-15-12 [#] ‡	4.5~6.0	340~453	136~181
		6.0~8.3	453~623	181~249
>8.3	623~737	249~295		
<4.5	227~340	91~136		
V	12-10-7 [#] §	3.8~5.3	379~530	100~140
		5.3~7.5	530~757	140~200
		>7.5	757~909	200~240
		<3.8	227~379	60~100
	19-15-11 [#] ‡	3.8~5.3	252~353	95~132
		5.3~7.5	353~505	132~189
>7.5	505~606	189~227		
<3.8	151~252	57~95		

注：#指基追结合施肥方式下的配方，基肥施用配方肥，起身期到拔节期结合灌水追施尿素（西南麦区（V）于返青期到拔节期结合灌水追施尿素）；*指一次性施肥方式下的配方，基肥一次性施用配方肥；‡指高浓度配方；§指中浓度配方。

Note: #, "Basal plus top dressing" fertilization, appropriate amounts of special fertilizer is applied as basal fertilizer at pre-sowing and appropriate amounts of urea applied as side dressing during GS30 and GS31 (but top dressing is applied during regreening stage and GS31 in Southwest China-region V); *, single basal fertilization, appropriate amounts of special fertilizer is applied at pre-sowing; ‡, high nutrient concentration compound fertilizer formulae; §, medium nutrient concentration compound fertilizer formulae.

及国际市场钾肥价格的影响,因此,有必要通过技术优化以满足农业需求并降低受国际钾肥市场的冲击影响。钾肥施用的推荐应首先关注增产效应,将钾肥优先施到增产效应明显的区域。本研究中钾肥推荐施用量以田间试验为基础,通过施肥量与作物产量反应的数据关系计算最佳经济施肥量,可以在保证作物产量的同时,有效地将肥料用量控制在合理的范围内,达到节肥、稳产的目的。不同区域的钾肥用量表现为Ⅲ华北冬麦区的最高,Ⅳ长江中下游冬麦区的次之,其他区域较低,这与不同区域的产量水平变化趋势一致(表2和图3)。西北麦区的钾肥推荐用量较低 K_2O 33~36 kg/hm²,这与该区域的土壤养分供应能力较高有关(Ⅱ-1 西北雨养旱作麦区和Ⅱ-2 西北灌溉麦区的平均速效钾分别为 160 和 186 mg/kg,表1)。李红莉等^[23] 调查结果显示,2000年和2007年中国小麦钾肥平均施用量分别为 K_2O 67 和 78 kg/hm²,已高于本研究中基于肥效反应方法确定的全国平均用量 K_2O 50 kg/hm²。尽管全国钾肥(K_2O)消费量由2007年的高峰648万t下降下来,2008年的消费量为469万t,2010年恢复到520万t^[1],目前中国小麦的钾肥消费量也应该基本上能满足生产需求。然而,为进一步培肥土壤,土壤-作物系统钾素管理中还应强调秸秆还田,原因是作物吸收的钾大部分贮存在秸秆中,如小麦吸收的钾素有80%以上贮存在秸秆中^[34]。相关研究表明通过秸秆还田配施钾肥可以有效提高土壤钾库和速效钾含量^[35]。

参考文献 References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Statistics[EB/OL]. (2019-01-09). <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风. 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, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. 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] 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,2008,39(5):1049-1055
Zhang W F, Ma W Q, Wang Y F, Zhang F S. Assessment on farmers' fertilization behavior for wheat production in China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008,39(5):1049-1055 (in Chinese)
- [4] 叶优良,韩燕来,谭金芳,崔振岭. 中国小麦生产与化肥施用状况研究[J]. 麦类作物学报,2007,27(1):127-133
Ye Y L, Han Y L, Tan J F, Cui Z L. Wheat production and fertilizer application in China[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007,27(1):127-133 (in Chinese)
- [5] 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[J]. 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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010,43(12):2469-2476 (in Chinese)
- [6] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报,2009,46(4):684-697
Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Nitrogen cycling and balance in winter wheat-summer maize rotation system in northern China plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009,46(4):684-697 (in Chinese)
- [7] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China[J]. *Ambio*, 2010,39(5-6):376-384
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社,2015
National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015 (in Chinese)
- [9] 李亮科,张卫峰,王雁峰,陈新平,马骥,高利伟,张福锁. 中国农户复合(混)肥施用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(3):623-629
Li L K, Zhang W F, Wang Y F, Chen X P, Ma J, Gao L W, Zhang F S. Effectiveness of compound fertilizer on grain yields in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011,17(3):623-629 (in Chinese)
- [10] 高祥照,胡克林,郭焱,李保国,马福韬,杜森,王运华. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精准施肥[J]. 中国农业科学,2002,35(6):660-666
Gao X Z, Hu K L, Gao Y, Li B G, Ma W T, Du S, Wang Y H. Spatial variability of soil nutrients and crop yield and site-specific fertilizer management[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002,35(6):660-666 (in Chinese)
- [11] 黄绍文,金继运,杨俐苹,程明芳. 乡(镇)级区域土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 资源科学,2002,24(2):76-82
Huang S W, Jin J Y, Yang L P, Cheng M F. Spatial variability

- and regionalized management technology of soil nutrients: A case study of Hongqiao Town[J]. *Resources Science*, 2002, 24(2):76-82 (in Chinese)
- [12] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1):79-88
Huang S W, Jin J Y, Yang L P, Cheng M F. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in Yutian County[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1):79-88 (in Chinese)
- [13] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4):802-817
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):802-817 (in Chinese)
- [14] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 中国水稻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*, 2016, 21(9):1-13
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formula for different rice production regions in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9):1-13 (in Chinese)
- [15] 周立三. 中国综合农业区划[M]. 北京: 农业出版社, 1981:1-265
Zhou L S. *China Comprehensive Agricultural Regionalization* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1981: 1-265 (in Chinese)
- [16] 吴永常. 中国耕作制度 15 年演变规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002
Wu Y C. Study on the evolving regularities of farming system in the recent 15 years, China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002 (in Chinese)
- [17] 孙颖, 石玉林. 中国农业土地利用[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2003
Sun H, Shi Y L. *Chinese Agricultural Land Use* [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2003 (in Chinese)
- [18] 农业农村部. 小麦优势区域布局规划(2008—2015 年) [EB/OL]. (2019-01-09). <http://news.aweb.com.cn/z/qybgh/index.html>
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China. Arrangement and planning of wheat dominant regions [EB/OL]. (2019-01-09). <http://news.aweb.com.cn/z/qybgh/index.html> (in Chinese)
- [19] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(5):886-895
- Zhao G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (I)[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5):886-895 (in Chinese)
- [20] 千怀遂. 中国小麦遥感估产区划研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2):97-104
Qian H S. A study on the regionalization for estimating of wheat yield of China by using remote sensing data[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2):97-104 (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [22] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
Chen X P, Zhang F S. *Integrated Nutrient Management for Wheat-Maize Rotation System* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006 (in Chinese)
- [23] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 杜芬, 李亮科. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5):1136-1143
Li H L, Zhang W F, Zhang F S, Du F, Li L K. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1136-1143 (in Chinese)
- [24] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
Wu L. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [25] 于 X T, 邢 G X, 陈 X P, 张 S L, 张 L J, 刘 X J, 崔 Z L, 尹 B, 克里斯蒂 P, 朱 Z L, 张 F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9):3041-3046
- [26] 崔 Z L, 陈 X P, 苗 Y X, 李 F, 张 F S, 李 J L, 叶 Y L, 杨 Z P, 张 Q, 刘 C S. On-farm evaluation of winter wheat yield response to residual soil nitrate-N in North China plain[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(6):1527
- [27] 崔 Z L, 张 F S, 陈 X P, 苗 Y X, 李 J L, 史 L W, 徐 J F, 叶 Y L, 刘 C S, 杨 Z P, 张 Q, 黄 S M, 包 D J. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test[J]. *Field Crops Research*, 2008, 105(1-2):48-55
- [28] 曹宁, 陈新平, 张福锁, 曲东. 从土壤肥力变化预测中国未来磷

- 肥需求[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 536-543
- Cao N, Chen X P, Zhang F S, Qu D. Prediction of phosphate fertilizer demand in China based on change in soil phosphate fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 536-543 (in Chinese)
- [29] Cao N, Chen X P, Cui Z L, Zhang F S. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2-3): 161-170
- [30] Li H, Huang G, Meng Q, Ma L, Yuan L, Wang F, Zhang W, Cui Z, Shen J, Chen X, Jiang R, Zhang F. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1-2): 157-167
- [31] Tang X, Ma Y B, Hao X Y, Li X Y, Li J M, Huang S M, Yang X Y. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 323(1-2): 143-151
- [32] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, Zhou B K, Shi X J, Wang B R, Li D C, Shen J B, Chen Q, Qin W, Oenema O, Zhang F S. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1-2): 27-37
- [33] 孙义祥. 测土配方施肥中区域配肥关键技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2010
- Sun Y X. Fertilization recommendation and designing special compound fertilizer in regional scale [D]. Beijing: China Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [34] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 梁鸣早. 我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 123-132
- Liu R L, Jin J Y, Wu R G, Liang M Z. Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 123-132 (in Chinese)
- [35] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 李书田, 何萍. 不同种植制度下长期施钾和秸秆还田对作物产量与土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 133-139
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, Li S T, He P. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133-139 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东