

不同地力水平下的小麦施肥效应

徐霞¹, 赵亚南¹, 黄玉芳¹, 闫军营², 叶优良¹

(¹ 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; ² 河南省土壤肥料站, 郑州 450002)

摘要: 【目的】整理 2005—2013 年在河南省布置的 1 247 个小麦的“3414”田间试验, 分析不同地力水平下小麦施肥后的增产效果、经济效益及氮、磷、钾肥利用效率, 明确不同地力水平下河南省小麦施肥效应, 为科学施肥提供理论依据。【方法】选取不施肥处理 ($N_0P_0K_0$)、-N 处理 ($N_0P_2K_2$)、-P 处理 ($N_2P_0K_2$)、-K 处理 ($N_2P_2K_0$) 和 NPK 处理 ($N_2P_2K_2$), 根据不施肥处理的产量将土壤基础地力划分为 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $3.0\text{—}4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4.5\text{—}6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 4 个等级, 研究不同处理不同地力水平下小麦施用氮、磷、钾肥的增产量、增产率、产值、施肥成本、施肥利润和产投比, 以及肥料的农学效率、偏生产力、肥料贡献率、地力贡献率。另外, 分析不施肥处理及各缺素处理的产量与相应养分肥料贡献率的关系。【结果】相比不施肥处理, 施肥后小麦的产量显著提高, 各施肥处理的增产量及增产率随地力水平的提高而下降。其中基础地力 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时氮磷钾配施及增施氮、磷、钾肥的增产率分别为 126.07%、75.98%、24.93%、17.73%, 基础地力 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时仅为 24.35%、15.39%、10.36%、8.70%。在施肥经济效益方面, 各施肥处理的产值、施肥成本、施肥利润及产投比均随地力水平的提高而升高, 其中小麦产值和施肥利润均以基础地力 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的氮磷钾配施处理最高, 分别为 19.64×10^3 、 $18.24\times 10^3\text{ yuan}/\text{hm}^2$, 基础地力 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的 -N 处理最低, 分别为 8.52×10^3 、 $7.87\times 10^3\text{ yuan}/\text{hm}^2$ 。在肥料利用率方面, 农学效率和肥料贡献率总体随地力水平的提高而下降。地力贡献率平均为 63.72%, 随地力水平的提高而提高, 各地力水平从 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 到 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 4 个等级的地力贡献率平均分别为 43.57%、57.80%、70.29%、80.34%。肥料贡献率随相应不施肥处理小麦产量的提高呈对数趋势下降, 并且显著相关, 说明提高基础地力可减少小麦的对化肥的依赖。【结论】提高土壤基础地力能够促进小麦增产、增收, 降低小麦产量对施用化肥的依赖; 河南省小麦生产中应重视培肥土壤, 并根据不同地力水平合理施肥以保证小麦高产稳产、提高施肥利润及肥料施用效率。

关键词: 小麦; 地力水平; 施肥; 产量; 经济效益; 肥料利用率; 河南省

Fertilization Effect of Wheat Under Different Soil Fertilities

XU Xia¹, ZHAO YaNan¹, HUANG YuFang¹, YAN JunYing², YE YouLiang¹

(¹ College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; ² Soil and Fertilizer Station of Henan Province, Zhengzhou 450002)

Abstract: 【Objective】The data of 1 247 “3414” field experiments, conducted in Henan Province during 2005-2013, were collected in this paper to evaluate effects of nitrogen (N), phosphorous (P) and potassium (K) fertilizer application on wheat yields, economic benefits and fertilizer use efficiencies under different soil fertilities, aiming to clarify the response of fertilization effect to different soil fertilities, and to provide reference for reasonable fertilizer application. 【Method】The five treatments, including $N_0P_0K_0$, $N_0P_2K_2$, $N_2P_0K_2$, $N_2P_2K_0$ and $N_2P_2K_2$, were chosen. According to the wheat grain yield of $N_0P_0K_0$ treatment, the soil fertilities were classified into four grades: $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $3.0\text{ to }4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $4.5\text{ to }6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. The yield responses to N, P and K fertilizers, gross income, fertilizer profit, input-output ratio, and the agronomic efficiency (AE), partial factor

收稿日期: 2018-04-03; 接受日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金 (31571607)

联系方式: 徐霞, E-mail: xuxia2011@163.com. 通信作者叶优良, E-mail: ylye2004@163.com

productivity (PFP), the fertilizer contribution rate (FCR) and contribution rate of soil fertilities were also compared. 【Result】 Compared with $N_0P_0K_0$ treatment, the wheat yields with fertilizer application were increased significantly, and the yield increase and yield increase rate showed a significant downtrend with increasing soil fertilities. The yield increase rate of NPK and N, P, and K fertilizers application were 126.07%, 75.98%, 24.93% and 17.73% under soil fertilities $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, while which were 24.35%, 15.39%, 10.36% and 8.70% under soil fertilities $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The gross income, fertilization cost, fertilizer profit and input-output ratio of all treatments increased with the improvement of the soil fertilities level. The gross income and fertilizer profit of NPK treatment was the highest under the soil fertilities $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, which were 19.64×10^3 yuan/ hm^2 and 18.24×10^3 yuan/ hm^2 , respectively; the gross income and fertilizer profit of -N treatment was the lowest, under the soil fertilities $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, which were 8.52×10^3 yuan/ hm^2 , 7.87×10^3 yuan/ hm^2 , respectively. In terms of fertilizer use efficiency, the AE and FCR generally decreased when the soil fertilities improved. The contribution rate of soil fertilities was 63.72% averagely, and increased with the increase of the soil fertilities, the contribution rate of soil fertilities of different soil fertilities ($<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 3.0 to $4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 4.5 to $6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) were 43.57%, 57.80%, 70.29%, and 80.34%, respectively. The FCR of the NPK treatments or N, P and K fertilizers decreased with the increase of wheat yield under the CK treatment or corresponding fertilizer omission treatment, indicating that enhancing soil indigenous fertilities could reduce the yield dependence on chemical fertilizers. 【Conclusions】 Improving soil fertilities could increase the yield and income of wheat, reduce the dependence of wheat yield on chemical fertilizer application. Therefore, it was important to improve the soil fertilities, and apply fertilization rationally according to soil fertilities levels to ensure high and stable yield, increase fertilizer profit, and improve the fertilizer use efficiency in wheat production in Henan Province.

Key words: wheat; soil fertilities; fertilization; yield; economic benefit; fertilizer use efficiency; Henan Province

0 引言

【研究意义】河南省小麦的种植面积、总产量和对国家的贡献一直居于全国首位,在保障我国粮食安全方面,起着举足轻重的作用^[1]。小麦产量提高的同时施肥量也在猛增,1987—2016 年河南省小麦产量增加了 1.9 倍,化肥用量增加了 5.3 倍^[2]。过量和不平衡施肥现象突出,这不仅会造成肥料浪费和利用率的下降,还会给农业生态环境带来危害^[3-4]。合理施肥需要做到因地制宜,不同的地力水平的土壤有不同的供肥特性。因此,研究河南省不同地力水平下小麦的施肥效果、经济效益与肥料利用效率,然后有针对性地施肥,对实现小麦的高产稳产,变得尤为重要。

【前人研究进展】2005 年起,在全国范围内开展了测土配方施肥项目,并布置了大量的“3414”田间试验,可以用该项目提供的大量数据开展不同区域的施肥研究工作^[5-6]。王旭等^[7]利用“3414”数据整理了我国主要生态区小麦施肥增产效应;张鹏等^[8]利用“3414”数据总结了施肥对陕西关中地区小麦的养分吸收及肥料利用率的影响;王寅等^[9]利用布置在吉林省的 1 110 个“3414”试验,评估了吉林省玉米的施肥效果及肥料利用率,提出应重视平衡施肥,提高肥料利用率的建议。赵秀娟等^[10]分析了长期施肥条件下褐土小麦和玉米地力贡献率的演变,发现我国东北玉米褐土及华北小麦褐土的基础地力均有明显下

降。马常宝等^[11]利用 32 个长期定位点试验研究了土壤地力和长期施肥对小麦、玉米产量演变趋势的影响,表明土壤地力对小麦、玉米获得高产具有重要作用,其对产量的贡献率均大于肥料贡献率。梁涛等^[12]通过研究四川盆地稻田土壤基础地力、养分供应能力和施肥效果,评价了土壤基础地力和施肥对水稻产量的影响,发现提高基础地力有助于水稻实现高产稳产。【本研究切入点】小麦作为河南省第一大粮食作物,分布区域广、环境差异大,以往的研究主要集中在不同施肥措施对小麦产量及土壤肥力的影响,但对河南省小麦基础地力与施肥效应、经济收益及肥料利用效率之间关系的研究鲜有报道,因而探究不同基础地力下的小麦施肥效果来指导小麦因地施肥显得尤为重要。【拟解决的关键问题】本研究通过整理测土配方施肥项目在河南省布置的“3414”田间试验,分析不同地力水平下的河南省小麦施用氮、磷、钾肥的增产效果、经济效益、肥料利用效率,并对土壤基础供肥能力与肥料贡献率的关系进行了研究,以明确不同基础地力下河南省小麦的施肥效果及肥料利用状况,为小麦科学施肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究选取 2005—2013 年国家测土配方施肥项目在河南省布置的 1 247 个小麦“3414”田间肥料试

验。该试验为多年多点试验,研究区域涵盖河南省 111 个县区,主要土壤类型有潮土($n=586$)、褐土($n=257$)、黄褐土($n=135$)、砂姜黑土($n=143$)等,试验区耕层土壤 pH 为 4.9—8.8,平均 7.6 ± 0.8 ,有机质为 $1.1\text{—}42.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $(15.6\pm 5.0)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮为 $0.3\text{—}1.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $(1.0\pm 0.2)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷为 $1.4\text{—}118.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $(16.8\pm 11.8)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾为 $24.0\text{—}330.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $(116.4\pm 47.5)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试小麦品种主要有豫麦 49 ($n=238$)、新麦 18 ($n=185$)、郑麦 9023 ($n=163$)、矮抗 58 ($n=144$)、偃展 4110 ($n=67$)等。

本研究所选用的“3414”试验的试验设计包括氮、磷、钾 3 因素,每个因素 4 (0、1、2、3) 水平,共 14 个处理的肥料试验设计。其中 0 水平为不施肥处理,2 水平为当地最佳施肥量,由当地农技专家根据目标产量、作物需肥量、土壤供肥量及当地施肥习惯等综合考虑确定。1 水平、3 水平分别为 2 水平的 0.5 倍和 1.5 倍。本研究选取处理 1 ($\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$)、处理 2 ($\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$)、处理 4 ($\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$)、处理 6 ($\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$) 和处理 8 ($\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$),即不施肥处理(CK)、缺氮处理(-N)、缺磷处理(-P)、缺钾处理(-K)和氮磷钾配施处理(NPK)来进行数据分析,其中各个处理的样本量一致,在进行数据分析时对各指标下的异常值进行剔除。本研究整理的试验数据中氮肥用量为 $75.0\text{—}240.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均 $(190.6\pm 32.4)\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;磷肥用量为 P_2O_5 $60.0\text{—}240.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均 $(107.0\pm 21.8)\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;钾肥用量为 K_2O $60.0\text{—}180.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均 $(99.6\pm 19.2)\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各缺素处理不施用相应的肥料,其余两种肥料施用量与该试验最佳施肥处理保持一致。试验所用氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%)。磷、钾肥和 40%的氮肥于播种前基施,余下 60%的氮肥于小麦拔节期追施,并进行合理的田间管理,整个生育期没有明显的涝害、旱害、病虫害害。

1.2 样品采集与测定

各试验点于小麦播种前取 0—20 cm 的耕层土壤,测定土壤理化性质。用电位法测定土壤 pH(水土比 2.5:1);用重铬酸钾容量法测定有机质;用半微量开氏法测定全氮;用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定有效磷;用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法测定速效钾^[13]。

小麦生理成熟后,所有小区用实打实收的方式测产,最后折算为含水量 13%的产量。

1.3 数据处理与分析

不施肥条件下的作物产量反应了土壤的基础供肥能力,本研究用不施肥处理($\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$)产量的来表示^[14]。小麦施肥效果及肥料利用率的相关参数采用以下公式计算^[15-18]:

肥料农学效率(agronomic efficiency, AE, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)指单位施肥量所增加的小麦产量,即, $\text{AE} = (\text{Y}-\text{Y}_0)/\text{F}$;

肥料偏生产力(partial factor productivity, PFP, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)指投入单位肥料所生产的小麦产量,即, $\text{PFP} = \text{Y}/\text{F}$;

肥料贡献率(contribution rate of fertilizer, FCR)指施用肥料增加的小麦产量占总产量的百分比,即, $\text{FCR} = (\text{Y}-\text{Y}_0)/\text{Y}\times 100\%$;

地力贡献率(contribution rate of soil fertilities, %)指不施肥时小麦产量与施肥时小麦产量的百分比,即, $\text{地力贡献率} = \text{Y}_0/\text{Y}\times 100\%$;

施肥利润(net profit, yuan/hm²)定义为产值与施肥成本之差,即, $\text{施肥利润} = \text{小麦产量}\times\text{小麦价格}-\text{施肥量}\times\text{肥料价格}$;

产投比(input-output ratio)=施肥利润/施肥成本。

式中, Y 为施肥区小麦产量, Y_0 为无肥区小麦产量, F 为施肥量。

小麦价格按 2.50 yuan/kg 计, N、 P_2O_5 、 K_2O 价格分别为 3.30、4.18 和 3.58 yuan/kg。

采用 Microsoft Excel 2010 软件计算和处理试验数据,用 SPSS20.0 软件统计分析, LSD 法检验处理间在 $P<0.05$ 水平的差异显著性。

2 结果

2.1 河南省小麦基础地力等级划分

河南省小麦基础地力产量在 $2.08\text{—}7.74\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均 $4.60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,变异系数为 30.1%。根据基础地力状况采用等产量差的方法^[5]按 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $3.0\text{—}4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4.5\text{—}6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 将基础地力产量划分为 4 个等级,则 4 个地力等级的样本量分别占总样本的 15.11% ($n=189$)、30.63% ($n=382$)、38.60% ($n=481$)、15.65% ($n=195$) (图 1)。

2.2 不同地力水平下的增产效果

小麦氮磷钾配施处理比不施肥处理平均增产 $2.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,变异系数为 44.05%,增产率平均为 63.85%,变异系数为 58.2%。施用氮、磷、钾肥的增产量和增

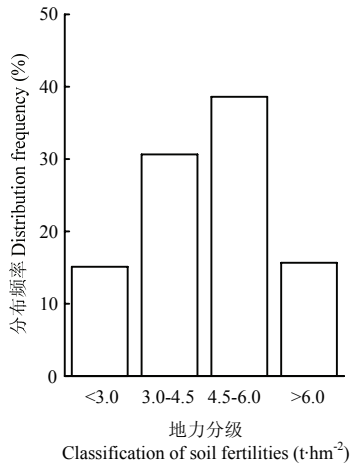
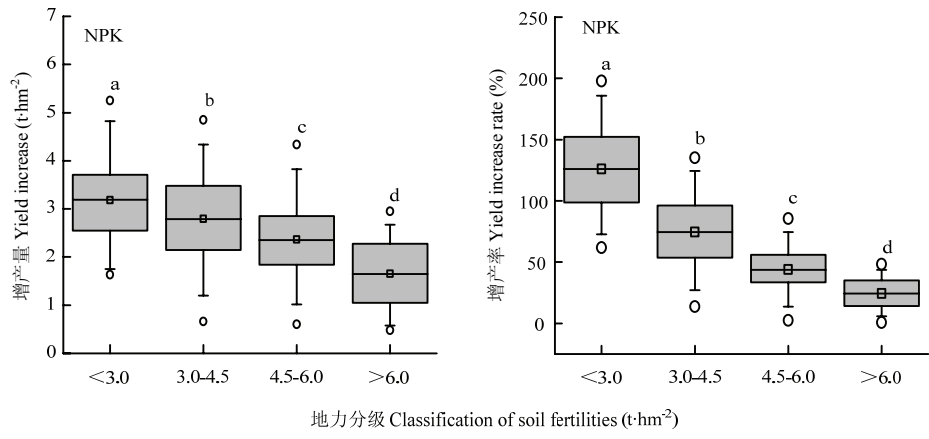


图 1 河南省小麦基础地力分布频率

Fig. 1 Distribution frequency of soil fertilities of wheat in the Henan Province

产率均随地力水平的提高而下降（图 2）。当基础地力由 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升到 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，4 个地力等级土壤施用氮磷钾肥的增产量平均为： 3.18 、 2.79 、 2.36 和 $1.65\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，且各地力等级间差异显著。增产率变化趋势与增产量基本一致，即施用氮磷钾肥的增产率随地力水平的提高而下降，各地力水平间差异显著。

增施氮、磷、钾肥的增产效果总体低于氮磷钾配施，其中以增施氮肥的增产效果最好，增产量、增产率平均分别为 $1.86\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 39.19% ；磷肥次之，平均 $0.99\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 17.40% ；钾肥最低，平均 $0.72\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 12.22% （图 3）。随地力水平的提高，增施氮、磷、钾肥的变化趋势与氮磷钾配施一致。从各地力水平分级来看，增施氮肥的增产量及增产率随地力水平升高的下降趋势最显著，其中地力水平 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下的增产量、增产率分别为 $2.30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 75.98% ， $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的增



箱形框中的实线和正方形分别表示数据集的中值和平均值，上下边界分别表示数据集的 25%和 75% 位分数，上下水平短线表示数据集的 5%和 95% 区间，箱外上下圆点分别表示数据集的最小值和最大值。误差线上部的小写字母表示不同地力水平间的差异显著 ($P<0.05$)。下同

The horizontal solid lines and squares inside boxes indicate the median and the mean of dataset, the upper and lower limits of box represent 25% and 75% of dataset, the upper and lower short lines outside box indicate the 5% and 95% of dataset, the upper and lower dots outside box indicate the minimum and maximum, respectively. Letters above histogram indicate statistical significance among different classification of soil fertilities ($P<0.05$). The same as below

图 2 不同基础地力水平下河南省小麦氮磷钾配施的增产量、增产率

Fig. 2 Wheat yield increase and yield increase rate of NPK fertilizers under different soil fertilities in Henan Province

产量、增产率分别为 $0.88\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 15.39% ，并且各个地力水平间的增产量及增产率均差异显著。磷肥的下降趋势次之，地力水平 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下的增产量、增产率分别为 $1.15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 24.94% ， $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的增产量、增产率分别为 $0.78\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 10.36% ，各个地力等级间的增产率差异显著。钾肥的下降趋势较缓和，地力水平 $3.0\text{—}4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4.5\text{—}6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下的

增产量间差异不显著。

2.3 不同地力水平下的肥料利用效率

将河南省小麦氮磷钾配施及增施氮、磷、钾肥的农学效率、偏生产力按不同的地力水平进行划分（表 1），发现各施肥处理的农学效率随地力水平的提升均表现出递减的趋势，且差异显著。总体以增施磷肥的农学效率最高（平均为 $11.9\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），变异系数为

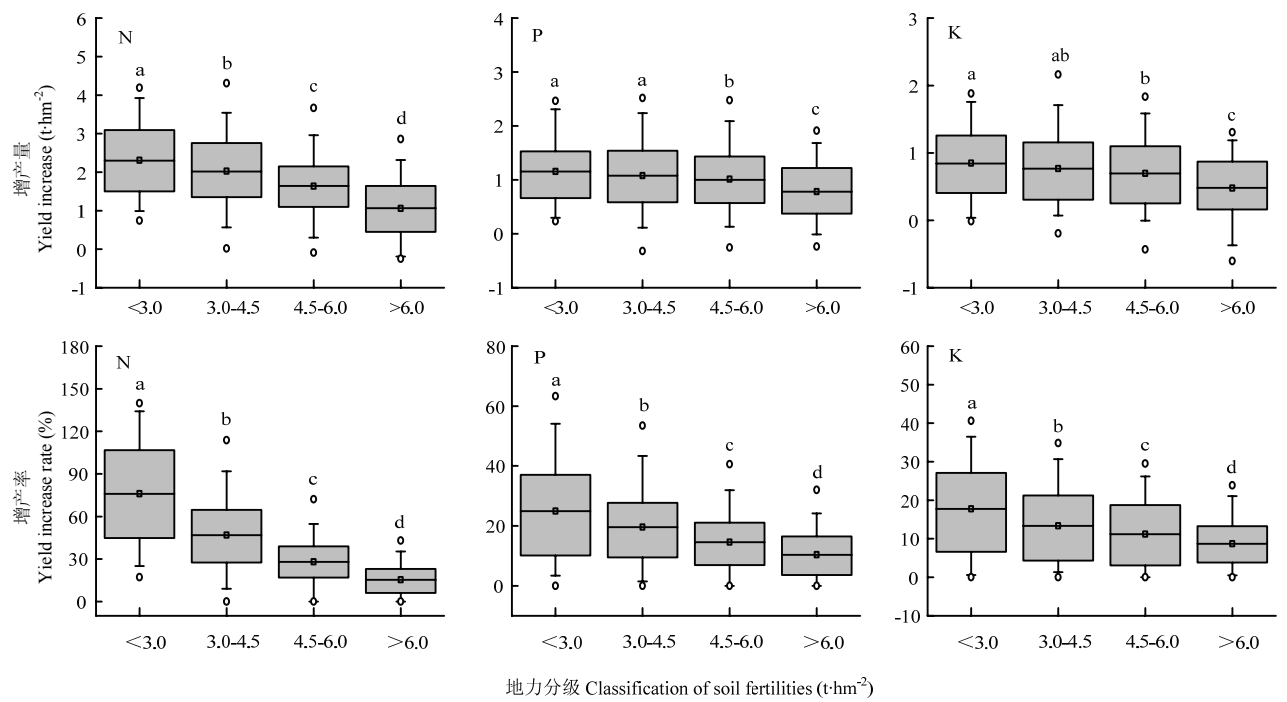


图 3 不同基础地力水平下河南省小麦施用氮、磷、钾肥的增产量、增产率

Fig. 3 Wheat yield increase and yield increase rate of N, P and K fertilizers under different soil fertilities in Henan Province

表 1 不同基础地力下河南省小麦氮、磷、钾肥的农学效率和偏生产力

Table 1 Agronomic efficiency and partial factor productivity of N, P and K fertilizers in wheat under different soil fertilities in Henan Province

处理 Treatmen	基础地力 Soil fertilities (t·hm ⁻²)	农学效率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)		偏生产力 Partial factor Productivity (kg·kg ⁻¹)	
		范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean
NPK	<3.0	2.71—16.70	10.05±3.29a	9.39—30.27	18.31±4.39b
	3.0—4.5	1.38—17.61	8.35±3.42b	9.73—34.38	20.11±4.85a
	4.5—6.0	0.00—17.58	6.07±3.18c	10.71—34.59	20.39±4.79a
	>6.0	0.00—12.50	3.45±2.32d	10.60—31.91	20.46±3.87a
N	<3.0	0.00—32.67	14.93±7.42a	18.60—49.44	36.22±8.47b
	3.0—4.5	0.00—29.71	12.13±6.29b	20.10—63.50	41.23±9.16a
	4.5—6.0	0.00—24.03	8.75±5.58c	15.74—69.94	42.52±10.46a
	>6.0	0.00—25.78	5.81±4.76d	24.73—59.70	42.99±8.01a
P	<3.0	0.00—44.25	13.06±9.65a	37.56—98.88	69.71±15.15b
	3.0—4.5	0.00—34.43	13.01±8.45a	40.20—120.25	76.21±18.24a
	4.5—6.0	0.00—34.78	10.43±7.41b	40.12—135.22	78.34±19.80a
	>6.0	0.00—20.00	7.38±5.46c	49.61—119.40	78.54±15.70a
K	<3.0	0.00—30.63	10.77±8.12a	32.55—142.83	72.78±21.33b
	3.0—4.5	0.00—33.80	9.28±7.43ab	36.46—155.25	78.59±21.60a
	4.5—6.0	0.00—28.80	8.48±6.57b	50.44—138.35	80.28±19.60a
	>6.0	0.00—16.19	5.35±4.58c	48.24—153.75	79.67±18.44a

82.8%，氮磷钾配施最低（平均为 $7.43 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），变异系数为 78.2%。将各地力水平进行比较，发现地力水平 $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时增施氮肥的农学效率最高，达 $14.93 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时氮磷钾肥配施的农学效率最低，平均为 $3.45 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各处理的偏生产力总体随地力水平的提高逐渐增高，但各处理在地力水平为 $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4.5\text{—}6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的偏生产力差异不显著。其中，地力水平 $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时氮磷钾配施的偏生产力最低（平均为 $18.31 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）， $4.5\text{—}6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时钾肥的偏生产力最高（平均为 $80.28 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。

2.4 不同地力水平下的地力与肥料对小麦产量的贡献率

河南省小麦基础地力贡献率平均为 63.72%（26.09%—94.75%），变异系数为 22.6%。分析基础地力与地力贡献率的关系可知，基础地力越高其对产量的贡献率越高（图 4）。各地力水平从 $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 到 $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的地力贡献率分别为 43.57%、57.80%、70.29%、80.34%。河南省土壤氮、磷、钾对小麦产量的贡献率平均分别为 73.45%（32.54—99.32%）、

85.04%（61.24—99.90%）、88.95%（65.58—99.99%），总体为土壤氮素贡献率 $>$ 土壤磷素贡献率 $>$ 土壤钾素贡献率。在变化规律方面，其均随地力水平的提高而增大，其中土壤氮素贡献率分别为 57.55%（ $<3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）、69.61%（ $3.0\text{—}4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）、78.17%（ $4.5\text{—}6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）、84.93%（ $>6.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）。因此，由地力贡献率与肥料贡献率的关系（二者之和为 100%）可知各施肥处理的肥料贡献率均随地力水平的提高而逐渐下降。

2.5 土壤基础供肥能力与肥料贡献率的关系

将不施肥处理、各缺素处理的产量与对应所缺养分的肥料贡献率进行拟合（图 5），可以看到氮磷钾配施处理的总养分贡献率随 CK 产量的增加呈下降趋势，且拟合曲线符合对数函数关系， R^2 为 0.613，达到极显著水平。氮素、磷素、钾素的肥料贡献率与相应缺素处理之间也有相似的拟合结果，其中 -N 处理和氮素贡献率的拟合相关性最高， R^2 达 0.508，并且氮素贡献率随土壤 -N 处理产量的增加下降斜率也最大。

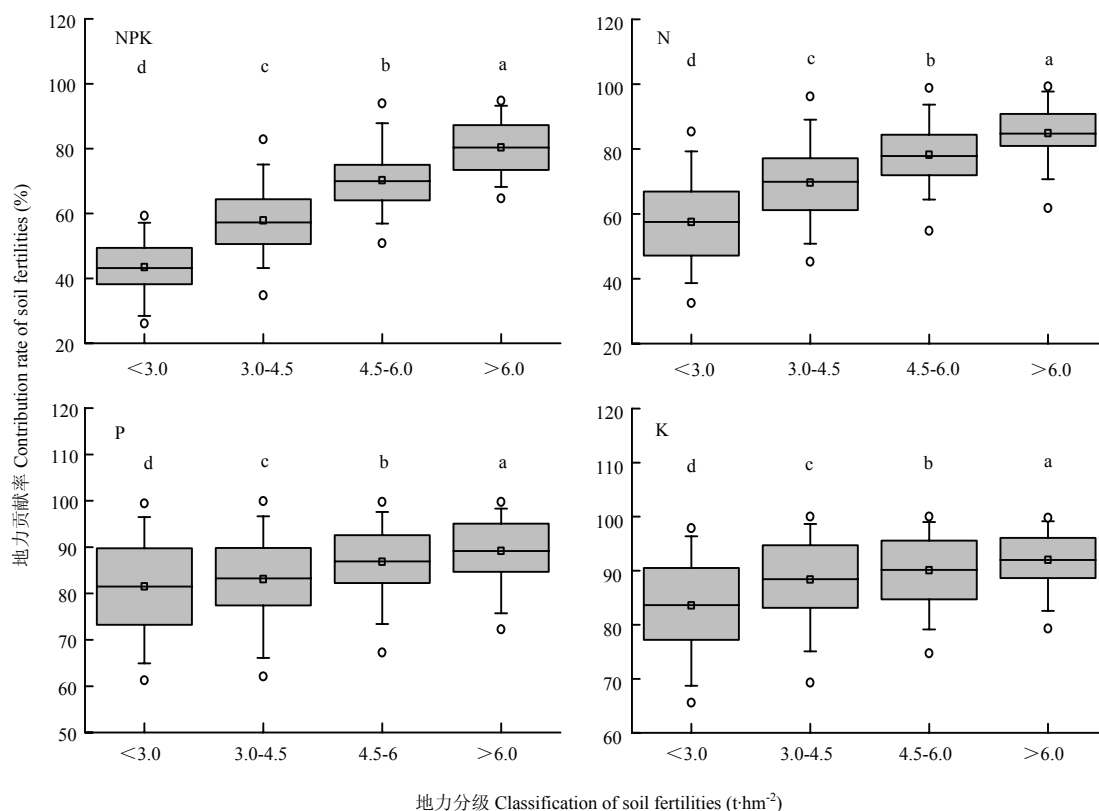


图 4 不同基础地力水平下的地力贡献率

Fig. 4 The relative contribution of soil fertilities to wheat yield under different soil fertilities

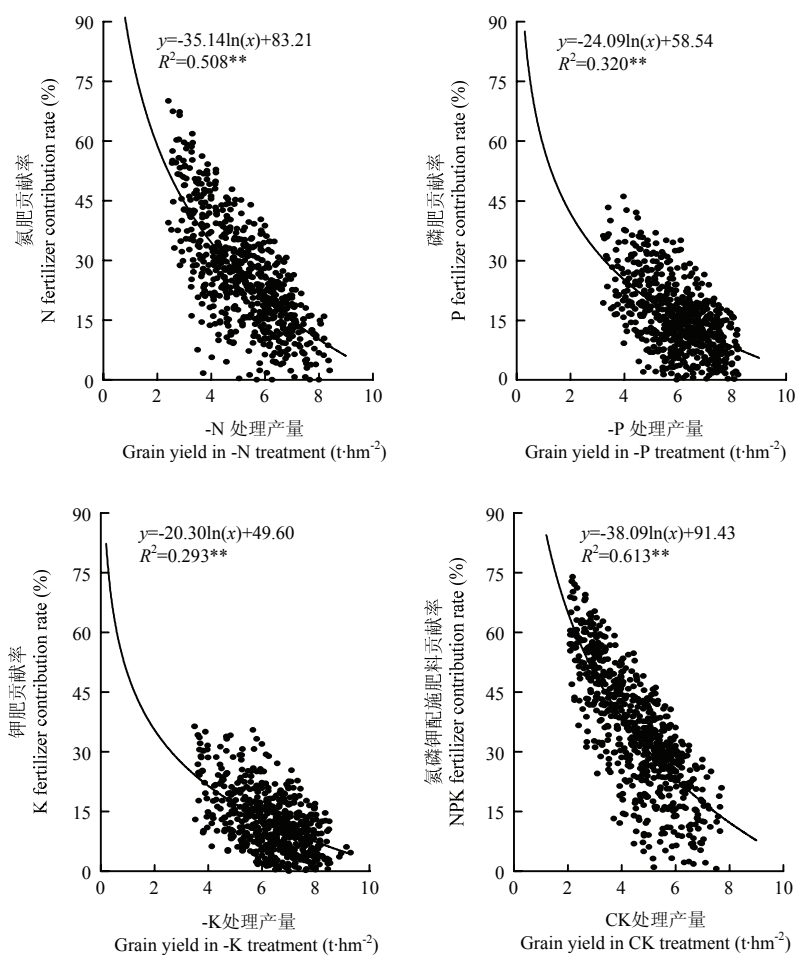


图5 河南省小麦土壤基础供肥能力与肥料贡献率的关系

Fig. 5 Relationships between soil indigenous nutrient supply and fertilizer contribution rate of wheat in Henan Province

2.6 不同地力水平下的施肥经济效益

获得高产的最终目的是为了获得经济收益, 因此在关注产量的同时也应该关注成本投入和最终收益 (表 2)。不施肥条件下河南省小麦的产值平均为 11.6×10^3 yuan/hm², 变异系数为 28.8%。施用氮、磷、钾肥后提高了生产投入, 但产值与不施肥处理相比均显著提高。小麦的产值、施肥成本及施肥利润均以 NPK 处理最高, 平均分别为 17.50×10^3 、 1.27×10^3 、 16.20×10^3 yuan/hm², 变异系数分别为 18.8%、24.7%、20.0%。各缺素处理的经济效益显著低于 NPK 处理, 它们的产值、施肥成本及施肥利润均以 -K 处理的影响最小, -P 处理次之, -N 处理的影响最大。

各处理的产值 (产值=产量×小麦价格) 均随地力水平的提高逐渐升高, 即小麦的产量随地力水平的提高而增加, 且各地力水平间差异显著。其中地力水平 >6 t·hm⁻² 时氮磷钾配施的产值最高 ($19.64 \times$

10^3 yuan/hm²), <3 t·hm⁻² 下的 -N 处理产值最低 (8.52×10^3 yuan/hm²)。在施肥成本方面, 各处理的施肥成本整体随地力水平的升高而升高, 说明随着地力水平的提升施肥量也在增加。随地力水平的提高各处理的施肥利润、产投比表现出和产值一样的变化趋势, 即逐渐提高, 且各处理的地力水平间的施肥利润差异显著。各处理的施肥利润以地力水平 >6 t·hm⁻² 时氮磷钾配施最高 (18.24×10^3 yuan/hm²), 其次为该地力水平下的 -K 处理 (17.52×10^3 yuan/hm²), 以地力水平 <3 t·hm⁻² 时的 -N 处理最低 (7.87×10^3 yuan/hm²)。

3 讨论

3.1 河南省基础地力特征

研究表明, 土壤基础地力对小麦产量的贡献率平均为 63.72%, 土壤氮、磷、钾素对小麦产量的贡献

表 2 不同基础地力下河南省小麦施肥经济效益
Table 2 The economic benefit of wheat under application of N, P and K fertilizers under different soil fertilities in Henan Province

处理 Treatment	基础地力 Soil fertilities (t·hm ⁻²)	产值		施肥成本				施肥利润				产值比					
		Gross income (×10 ³ yuan/hm ²)		Fertilizer cost (×10 ³ yuan/hm ²)				Net profit (×10 ³ yuan/hm ²)				Input-output ratio					
		范围	Range	平均值	Mean	范围	Range	平均值	Mean	范围	Range	平均值	Mean	范围	Range	平均值	Mean
CK	<3.0	5.21—7.47		6.42±0.70d													
	3.0—4.5	7.50—11.23		9.36±1.12c													
	4.5—6.0	11.25—15.00		13.05±1.06b													
	>6.0	15.00—19.14		16.53±1.14a													
NPK	<3.0	9.46—21.65		12.84±3.00d		0.33—2.00		1.14±0.33c		8.14—20.54		13.69±3.02d		5.01—22.50		11.78±3.31b	
	3.0—4.5	10.28—25.00		16.45±2.78c		0.33—2.00		1.18±0.33c		8.98—23.21		15.27±2.76c		5.73—24.94		13.03±3.48a	
	4.5—6.0	9.44—24.00		18.53±2.72b		0.33—1.91		1.32±0.31b		7.72—24.16		17.21±2.74b		6.38—27.48		13.34±3.65a	
	>6.0	11.13—24.00		19.64±2.67a		0.86—2.18		1.39±0.25a		9.60—23.19		18.24±2.63a		6.30—25.77		13.36±3.04a	
-N	<3.0	6.00—17.27		8.52±1.64d		0.23—0.93		0.63±0.20c		5.01—16.57		7.87±1.65d		5.37—38.22		13.93±6.81d	
	3.0—4.5	6.00—20.85		11.44±2.21c		0.23—0.93		0.67±0.20c		5.17—20.15		10.79±2.19c		5.55—46.52		17.73±7.04c	
	4.5—6.0	8.91—21.14		14.90±2.05b		0.23—1.11		0.74±0.19b		8.21—20.44		14.15±2.03b		8.97—37.90		19.73±5.47b	
	>6.0	9.12—21.34		17.18±2.11d		0.47—1.40		0.81±0.16a		8.42—20.41		16.37±2.10a		9.69—40.13		21.40±5.72a	
-P	<3.0	8.06—19.20		12.49±2.85d		0.21—1.22		0.81±0.23c		7.04—18.28		11.69±2.86d		6.80—22.87		14.44±3.91d	
	3.0—4.5	8.00—21.99		13.69±2.67c		0.21—1.23		0.83±0.23c		7.21—20.99		12.86±2.67c		6.42—30.23		15.74±4.48c	
	4.5—6.0	8.51—21.00		16.24±2.29b		0.21—1.35		0.92±0.22b		7.49—20.38		15.32±2.30b		6.12—31.50		16.98±4.49b	
	>6.0	8.16—22.00		17.9±2.44a		0.57—1.44		0.97±0.16a		7.34—21.06		16.94±2.43a		8.98—33.50		18.05±4.52a	
-K	<3.0	8.81—19.78		13.04±3.02d		0.22—1.29		0.86±0.24b		7.84—19.56		12.19±3.06d		6.10—24.38		14.15±4.34c	
	3.0—4.5	9.11—21.08		14.65±2.49c		0.22—1.30		0.88±0.24b		7.94—20.03		13.78±2.49c		6.80—30.31		15.83±4.30b	
	4.5—6.0	9.48—23.00		16.84±2.35b		0.22—1.47		0.99±0.24a		8.41—23.06		15.86±2.36b		7.87—33.50		16.53±4.50ab	
	>6.0	12.37—23.66		18.56±2.21a		0.62—1.54		1.04±0.18a		11.40—22.57		17.52±2.19a		8.20—30.02		17.38±3.93a	

率分别为 73.45%、85.04%、88.95%。刘芬^[19]分析了 2006—2010 年布置在陕西省的小麦“3414”试验,发现陕西省土壤地力对小麦产量的贡献率平均为 61.5%,而土壤氮、磷、钾对小麦产量的贡献率平均分别为 72.6%、83.7%、88.6%。马宝常等^[11]通过分析全国 32 个长期定位试验,发现我国潮土区小麦产量的地力贡献率平均为 51.4%。黄绍敏等^[20]研究发现,1991—2004 年土壤地力对河南省潮土区小麦产量的贡献率为 34%—53% (平均 44%)。可以看出,河南省小麦基础地力贡献率要略高于刘芬的研究结果,明显高于马宝常及黄绍敏的研究。基础地力小麦产量受生长环境和土壤供肥性等多方面影响,气温、降水、前茬作物残留肥量都会影响到基础地力的产量表现。河南省的气温、降水适宜小麦生长,小麦种植区以潮土、黄褐土为主,而这两种土壤分别具有较好的供肥

性和保肥性^[21],这可能是基础地力对产量贡献率产生区域性差异的原因。另外,本研究的试验数据来自不同的试验点、不同年度,小麦品种的逐年更新也会影响基础地力的发挥^[22],并且随着小麦单产的提高,施肥量也在不断增加,导致试验田土壤前期土壤养分残留较高,再加上秸秆还田等措施,河南省基础地力逐步提高^[14]。

3.2 基础地力与产量的关系

李忠芳等^[23]研究表明作物产量与土壤基础地力相关性极显著,施肥条件下作物产量随着基础地力的提高而提高,且作物产量对基础地力的依赖程度高于化肥、有机肥。还有大量研究也表明了土壤基础地力对作物获得高产的重要性,土壤基础地力较高时,连续 50 年不施肥小麦产量依然呈增加状态,但地力水平较低时,若持续不施肥,小麦产量将连年下降^[24-26]。

本研究表明小麦的产量随地力水平的提高而增加,且各地力水平间差异显著;基础地力贡献率随基础地力的提高显著提高,肥料贡献率降低;将缺肥处理产量与肥料贡献率进行拟合,发现施肥对小麦产量的贡献率随土壤供肥力的提高而显著下降。这些都说明培肥土壤、提高土壤肥力可以减少对肥料施用的需求。另外本研究还发现小麦种植的经济效益随着基础地力的提高而显著提高,因此提高土壤肥力是保障小麦高产、节本增收的重要措施,应通过增施有机肥、秸秆还田、合理轮作等措施培肥土壤、提高土壤肥力。张莉等^[27]研究表明秸秆造粒后还田能提高土壤肥力和小麦产量,另外用适宜比例的生物炭、有机肥和缓释氮肥替换部分化肥氮也可实现土壤地力的可持续性提高^[28]。

3.3 基础地力对施肥增产效果的影响

比较不同地力水平下各处理施肥的增产效果(相对不施肥处理)发现,各处理的增产量和增产率均随地力水平的提高而下降。其中氮磷钾配施在地力水平 $<3.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的增产量和增产率分别为 $3.18\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 126.07% ,而在地力水平 $>6.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时分别为 $1.65\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 24.35% ,即随基础地力的提高小麦施肥的增产效果变差,这与刘芬^[19]的研究结果基本一致。这一规律在其他地区及其他作物上也有发现。徐春丽等^[29]分析西南地区不同地力水平下的玉米产量发现,基础地力越低施肥的增产效果越好,而基础地力高的地区施肥增产效果反而差。鲁艳红等^[30]通过布置的水稻长期定位施肥试验及盆栽试验研究了不施肥条件下水稻产量及土壤基础地力的变化,发现肥料对水稻产量的贡献率随地力水平的提升而下降。因此,进行施肥管理时应考虑土壤地力状况,高地力水平应适当减少施肥,发挥土壤地力的作用,重视中、低肥力土壤,尤其是低肥力土壤的施肥,以实现养分高效利用。

4 结论

4.1 比较不同基础地力下的施肥效果发现,各施肥处理小麦的产量、施肥利润、产投比、肥料偏生产力及地力贡献率均随基础地力水平的提升而显著升高,说明提高土壤基础地力可以降低小麦对化肥的依赖,并对确保小麦高产、获得高收益具有举足轻重的作用。因此在施肥的过程中应重视培肥土壤,提高基础地力,以保障小麦高产稳产。

4.2 分析小麦施用氮、磷、钾肥的增产效果发现各施肥处理的增产量、增产率均随地力水平的提高而下降,在肥料利用效率方面肥料农学效率、肥料贡献率随地

力水平的提高也呈现出下降的趋势,因而应根据土壤地力状况进行科学的施肥管理,以提高肥料利用率,降低施肥成本、节约养分资源。

References

- [1] ZHANG J. China's success in increasing per capita food production. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(11): 3707.
- [2] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2016.
Ministry of Agriculture, PRC. *China Agriculture Statistical Report*. Beijing: China Agriculture Press, 2016. (in Chinese)
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [4] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, H Kolbe. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
ZHANG W L, WU S X, JI H J, KOLBE H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese)
- [5] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 毛达如, 张福锁. "3414"肥料试验模型拟合的探讨. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409-413.
WANG S R, CHEN X P, GAO X Z, MAO D R, ZHANG F S. Study on simulation of "3414" fertilizer experiments. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(4): 409-413. (in Chinese)
- [6] 孙义祥, 郭跃升, 于舜章, 蒋庆功, 程琳琳, 崔振岭, 陈新平, 江荣凤, 张福锁. 应用"3414"试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 197-203.
SUN Y X, GUO Y S, YU S Z, JIANG Q G, CHENG L L, CUI Z L, CHEN X P, JIANG R F, ZHANG F S. Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the "3414" field experiments. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(1): 197-203. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 张鹏, 刘瑞, 崔亚胜, 王天泰, 乌鸿科, 周建斌. 施肥对陕西关中西部灌区小麦养分吸收及肥料利用率的影响. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011(1): 166-170.
ZHANG P, LIU R, CUI Y S, WANG T T, WU H K, ZHOU J B.

- Effects of different fertilizer applications on the N, P and K uptakes and fertilizer use efficiency on winter wheat in the irrigation region of Western Guanzhong, Shaanxi province. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2011(1): 166-170. (in Chinese)
- [9] 王寅, 冯国忠, 焉莉, 高强, 宋立新, 刘振刚, 房杰. 吉林省玉米施肥效果与肥料利用效率现状研究. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1441-1448.
- WANG Y, FENG G Z, YAN L, GAO Q, SONG L X, LIU Z G, FANG J. Present fertilization effect and fertilizer use efficiency of maize in Jilin Province, *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1441-1448. (in Chinese)
- [10] 赵秀娟, 任意, 张淑香. 长期试验条件下褐土地力贡献率的演变特征及其影响因素分析. *中国土壤与肥料*, 2017(5): 67-72.
- ZHAO X J, REN Y, ZHANG S X. Basic soil productivity change and influence factors analysis in cinnamon soil under long-term fertilization. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 67-72. (in Chinese)
- [11] 马常宝, 卢昌艾, 任意, 展晓莹, 李桂花, 张淑香. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 796-802.
- MA C B, LU C Y, REN Y, ZHAN X Y, LI G H, ZHANG S X. Effect of soil fertility and long-term fertilizer application on the yields of wheat and maize in fluvo-aquic soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(4): 796-802. (in Chinese)
- [12] 梁涛, 陈轩敬, 赵亚南, 黄兴成, 李鸿, 石孝均, 张跃强. 四川盆地水稻产量对基础地力与施肥的响应. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4759-4768.
- LIANG T, CHEN X J, ZHAO Y N, HUANG X C, LI H, SHI X J, ZHANG Y Q. Response of rice yield to inherent soil productivity of paddies and fertilization in Sichuan Basin. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4759-4768. (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd ed.* Beijing: China Agricultural Press, 2007. (in Chinese)
- [14] FAN M, LAL R, CAO J, QIAO L, SU Y, JIANG R, ZHAN F. Plant-based assessment of inherent soil productivity and contributions to China's cereal crop yield increase since 1980. *PLoS ONE*, 2013, 8(9): e74617.
- [15] CASSMAN K G, PENG S, OLK D C, LADHA J K, REICHARDT W, DOBERMANN A, SINGH U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*, 1998, 56(1): 7-39.
- [16] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 邹娟, 苏伟, 李小坤, 李云春. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3997-4007.
- WANG W N, LU J W, LI Y S, ZOU J, SU W, LI X K, LI Y C. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3997-4007. (in Chinese)
- [17] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- PENG S B, HUANG J L, ZHONG X H, YANG J C, WANG G H, ZOU Y B, ZHANG F S, ZHU Q S, BURESH R, WITT C. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese)
- [18] 王定勇, 石孝均, 毛知耘. 长期水旱轮作条件下紫色土养分供应能力的研究. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 120-126.
- WANG D Y, SHI X J, MAO Z Y. Study on nutrient supplying capacity of purple soil under long-term rice-wheat rotation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2004, 10(2): 120-126. (in Chinese)
- [19] 刘芬. 陕西省土壤养分与肥料资源利用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- LIU F. Study on soil nutrient and fertilizer resource utilization in Shanxi Province [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [20] 黄绍敏, 宝得俊, 皇甫湘荣, 寇长林, 杨桂梅, 介晓磊. 不同栽培因子对河南潮土上小麦产量的影响. *麦类作物学报*, 2005, 25(5): 69-74.
- HUANG S M, BAO D J, HUANGPU X R, KOU C L, YANG G M, JIE X L. Actors affect the wheat yield in alluvial soil in Henan Province. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5): 69-74. (in Chinese)
- [21] 沈阿林. 河南省黄褐土和潮土供肥性能的静态比较研究. *土壤通报*, 1994(1): 28-30.
- SHEN A L. Static comparative study on fertilizer supply properties of yellow cinnamon soil and fluvo-aquic soil in Henan Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994(1): 28-30. (in Chinese)
- [22] 韩晓宇, 黄芳, 王峥, 张树兰, 杨学云. 陕西关中不同年代小麦品种产量及氮素吸收利用对土壤肥力的响应. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4769-4780.
- HAN X Y, HUANG F, WANG Z, ZHANG S L, YANG X Y. Responses of grain yield and nitrogen use efficiency of wheat cultivars released in different decades to soil fertility in Shaanxi Guanzhong Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4769-4780.

- 4769-4780. (in Chinese)
- [23] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 张文菊, 高静. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2407-2414.
- LI Z F, XU M G, ZHANG H M, ZHANG W J, GAO J. Grain yield trends of different food crops under long-term fertilization in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2407-2414. (in Chinese)
- [24] HEJCMAN M, KUNZOVA E. Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. *Field Crops Research*, 2010, 115(2): 191-199.
- [25] KUNZOVA E, HEJCMAN M. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 226-234.
- [26] KUNZOVA E, HEJCMAN M. Yield development of winter wheat over 50 years of nitrogen, phosphorus and potassium application on greyic phaeozem in the Czech Republic. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(3): 166-174.
- [27] 张莉, 王婧, 逢焕成, 张珺瞳, 郭建军, 董国豪, 丛萍. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1770-1778.
- ZHANG L, WANG J, PANG H C, ZHANG J Z, GUO J J, DONG G H, CONG P. Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1770-1778. (in Chinese)
- [28] 姜慧敏, 郭俊梅, 刘晓, 乔少卿, 张雪凌, 郭康莉, 张建峰, 杨俊诚. 不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 933-941.
- JIANG H M, GUO J M, LIU X, QIAO S Q, ZHANG X L, GUO K L, ZHANG J F, YANG J C. Effects of combined application of nitrogen from different source on nitrogen utilization of spring maize and sustainability of soil fertility in Northeast China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 933-941. (in Chinese)
- [29] 徐春丽, 谢军, 王珂, 李丹萍, 陈轩敬, 张跃强, 陈新平, 石孝均. 中国西南地区玉米产量对基础地力和施肥的响应. *中国农业科学*, 2018, 51(1): 129-138.
- XU C L, XIE J, WANG K, LI D P, CHEN X J, ZHANG Y Q, CHEN X P, SHI X J. The response of maize yield to inherent soil productivity and fertilizer in the Southwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 129-138. (in Chinese)
- [30] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 聂军, 谢坚, 杨曾平. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响. *土壤学报*, 2015, 52(3): 597-606.
- LU Y H, LIAO Y L, ZHOU X, NIE J, XIE J, YANG Z P. Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 597-606. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)