



我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

引用本文:

任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143–150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩上, 武际, 张祥明, 胡鹏, 杨友兵, 李敏, 王慧, 唐杉

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 334–341 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0319>

不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响

李顺江, 李鹏, 李新荣, 赵丽平, 马茂亭, 赵同科

农业资源与环境学报. 2015(3): 235–241 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0291>

赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响

方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 陈楠, 杨登, 魏祥东

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 466–476 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0080>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹磴, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143-150.
REN Ke-yu, XU Ming-gang, ZHANG Lu, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 143-150.



开放科学 OSID

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇¹, 徐明岗¹, 张露^{1,2}, 段英华^{1*}, 王伯仁^{1,3*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 3. 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182)

摘要: 探明全国不同气候、土壤和作物类型条件下, 化肥配施有机肥对产量的影响及其增产效果的主控因素, 可为粮食增产和有机肥的合理施用提供重要的理论依据。本研究通过收集 109 篇已公开发表的文献, 建立了包含不施肥(CK)、单施化肥(NPK)和化肥配施有机肥(NPKM)处理的 402 组作物产量的数据库。采用整合分析(Meta-analysis)方法分析了不同施肥处理对小麦、玉米和水稻产量的影响, 以及不同土壤性质和气候条件下有机肥的增产差异; 采用随机森林(Random forest)方法量化土壤和气候因素对有机肥增产效果影响的重要度。全国来看, 与 NPK 相比, NPKM 处理下作物的产量平均增幅 4.7%, 其中小麦、玉米和水稻的增产率分别为 5.6%、7.6% 和 4.5%; 作物的平均增产率在西北地区最高, 东北和华北地区次之, 南方和华东地区较低。配施有机肥对产量的提升作用在我国温带大陆性气候区和温带季风性气候区显著高于亚热带季风性气候区, 其中年降雨量是影响小麦和水稻产量对有机肥响应的主要因素, 年均温和无霜期是影响玉米产量对有机肥响应的主要因素。有机质和全氮含量是土壤性状中影响有机肥增产效果的主要因素, 其中土壤有机质和全氮含量越低, 配施有机肥后产量的增幅越高。总的来说, 化肥配施有机肥可显著提高作物的产量, 尤其在低温少雨、土壤养分含量较低的地区, 可通过化肥配施有机肥来进行增产促产。

关键词: 粮食作物; 产量; 有机肥; 化肥; 土壤养分

中图分类号: S141

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)01-0143-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0150

Response of grain crop yield to manure application in different regions of China

REN Ke-yu¹, XU Ming-gang¹, ZHANG Lu^{1,2}, DUAN Ying-hua^{1*}, WANG Bo-ren^{1,3*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 3. National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, China)

Abstract: Manure application is an important approach for improving soil fertility and grain production. The effectiveness of the nutrients in manure is affected by many factors, such as climatic conditions and soil properties, which may lead to different contributions of manure to crop yield. This study was carried out to explore the increment in grain yield with manure application in different climatic regions and soil types for understanding the effect of manure application on crop yield at national and regional levels in China. The results can be helpful for developing manure management strategies. This study was conducted using 402 grain yield datasets collected from 109 published articles regarding three major food crops, namely wheat, maize, and rice. The treatments tested were no fertilization (CK);

收稿日期: 2020-03-26 录用日期: 2020-05-08

作者简介: 任科宇(1993—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 从事氮素高效利用研究。E-mail: 1173557108@qq.com

*通信作者: 段英华 E-mail: duanyinghua@caas.cn; 王伯仁 E-mail: wangboren1@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200301); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(1610132019051)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0200301); Basal Research Fund of Central Public Welfare Scientific Institution(1610132019051)

chemical N, P, and K fertilization (NPK); and NPK fertilization combined with manure application (NPKM). Differences in yield among the application of CK, NPK, and NPKM in the three crops across four regions of China were studied using meta-analysis. The importance of climatic parameters and soil properties on positive manure effects was quantified using random forest analysis. Compared with NPK, NPKM treatment resulted in increments of 5.6%, 7.6%, and 4.5% in grain yield for wheat, maize, and rice, respectively, with an average increase of 4.7% across the three crops. The yield increment by manure application varied across regions as follows: northwestern China > northeast and north China > southern China > eastern China. The highest yield enhancement by manure application was observed in the temperate continental climate zone, followed by the temperate monsoon and subtropical monsoon climate zones. Average annual rainfall was the main factor that affected the yield response to manure for wheat and rice, while the main factors affecting the yield response of maize were the mean annual temperature and frost-free period. The yield increment by manure application was higher in soils with lower soil organic matter (SOM) and total nitrogen (TN) content than those with higher SOM and TN content, suggesting that SOM and TN are essential factors that influence the ability of manure to improve grain production among the analyzed soil properties. Nationally, manure application can significantly increase crop yields, especially in areas with insufficient soil nutrients, low temperature, and low rainfall.

Keywords: grain crops; yield; manure; chemical fertilizer; soil nutrients

保证粮食安全是我国经济和社会可持续发展的重要基础。近几十年,我国的粮食生产取得了举世瞩目的成就,以世界9%的耕地养育了世界22%的人口^[1]。2018年,我国小麦、玉米和水稻的产量分别为5 416、6 104 kg·hm⁻²和7 027 kg·hm⁻²,较1961年增产近5倍,与此同时,我国农田的肥料投入量也在持续增加,尤其是化学氮肥,达到2 065万t^[2]。大量的化肥投入虽然提高了我国作物的产量,但同时也造成了土壤退化、大气污染、水体富营养化等一系列环境问题^[3-4]。施用有机肥是一项常见的培肥措施,通常来说,化肥配施有机肥不仅可以改善土壤的理化性质,而且能够提高作物的产量^[5-7]。但是,Dawe等^[8]对亚洲25个稻田长期定位试验研究发现,相对于单施化肥,配施有机肥并没有显著提高水稻的产量。可见,有机肥的增产作用在不同区域和不同田块上均有差异,会受到土壤和气候因素的影响。因此,明确化肥配施有机肥的增产效果及其适宜的区域,对于我国粮食的进一步增产和有机肥的合理施用具有重要意义。

在我国湖南红壤地区18年的长期定位试验研究表明,相对于单施化肥,化肥配施有机肥后玉米的籽粒产量、秸秆生物量和植株生物量分别显著增加了61.5%、76.1%和68.2%^[9]。在我国西南紫色土地区8年定位试验结果也同样表明,玉米的产量在有机肥50%替代化肥处理下比100%有机替代和单施化肥处理分别显著增加13.5%和12.5%^[10]。孟琳等^[11]对我国江苏省的水稻研究表明,在施氮量240 kg·hm⁻²条件下,相对于单施化肥,有机肥部分替代化肥可显著提高作物产量。然而,Liu等^[12]对我国祁阳、郑州、乌鲁木齐、昌平和杨凌5个长期定位试验的研究表明,除祁阳外,其他4个试验点在配施有机肥处理下小麦和

玉米的产量相对于单施化肥均没有显著增加。刘红江等^[13]通过不同有机替代比例对水稻产量影响的研究发现,各有机肥替代比例下水稻的产量并没有显著提高,甚至低于单施化肥处理。此外,Duan等^[14]还发现有机肥对玉米的增产效果优于小麦。可见,施用有机肥对作物产量的影响在不同土壤、气候和作物上差异较大^[15-17]。但是,不同区域上有机肥增产效果的差异原因,以及气候因素和土壤性质对增产效果的贡献尚不清楚,有待整合全国的数据进行综合分析。

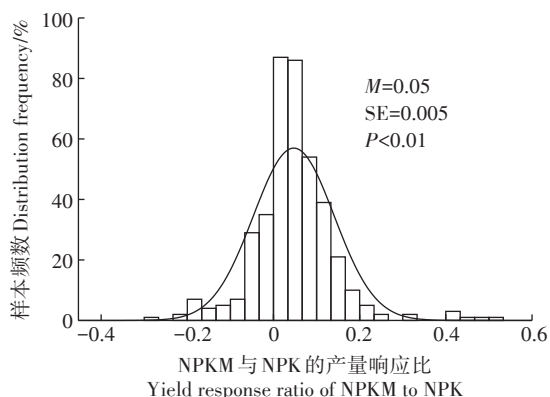
本文搜集了国内外已发表的有关施肥对作物产量影响的文章,整合分析了化肥配施有机肥对我国主要粮食作物产量的影响及其区域差异,明确了不同气候条件和土壤性质对有机肥增产效果的贡献,旨在为因地制宜地合理施用有机肥,进而促进作物高产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究以“氮肥”“有机替代”和“产量”为关键词,利用Web of Science、SpringerLink和中国知网等数据库进行文献检索,筛选条件为:①作物为小麦、玉米和水稻的大田试验(中国);②试验处理包含不施肥(CK)、单施化肥(NPK)以及有机无机配施(NPKM)处理(NPK和NPKM的总氮施用量相等),研究结果有产量的数据;③每个处理的重复数不少于3次;④有0~20 cm土层试验前的基本理化指标。此外,还要能够获得每个试验相关的地理信息(经度和纬度)、气候信息(气候类型、年降雨量、年均温、年日照时长)等。本研究中有机肥的类型主要包括腐熟的畜禽(猪、牛、鸡等)粪便和商品有机肥,均在播种前作为基肥一次性

施用。共获得109篇文献,402组有效数据,对有机无机配施与单施化肥处理产量的响应比进行了正态分布检验,符合整合分析的要求,图1为响应比的频数分布。依据气候特点和地理区划,研究区域分为东北、西北、华北、华东和南方地区,各个区域的数据量及分布省份见表1。其中,12个粮食主产区(缺少辽宁省数据)的数据量为301组,占总数据量的75%,占比与我国粮食产出基本一致(2017年全国13个粮食主产区粮食产量占全国的76.2%^[2])。为了阐明不同气候因子对有机肥增产的贡献,将气候类型分为温带季风气候、温带大陆气候和亚热带季风气候;年均温(MAT)、年均降雨量(AAR)、无霜期(FFP)和年日照时数(ASD)等也均分为高、中、低3个水平^[18-21]。根据第二次土壤普查时土壤养分分级标准^[22],土壤养分指标分为3个水平,例如土壤全氮含量,将原1~2级合为 $>1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,原3级为 $1 \sim 1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,原4~6级合为 $\leq 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。



曲线代表产量响应比的频数分布,其呈极显著的正态分布($P<0.01$);
M代表产量响应比的平均值,SE代表均值的标准误
Curve represents the frequency distribution of yield response ratio, which
shows a high significant normal distribution ($P<0.01$); M represents mean
yield response ratio, SE represents standard error

图1 NPKM与NPK产量响应比的分布

Figure 1 Distribution of yield response ratio of NPKM to NPK

表1 各个地区的数据量分布

Table 1 Data volume distribution in regions

地区(数据量) Region(number of data)	省份(数据量) Provinces(number of data)
东北(23)	内蒙古(1)、吉林(13)、黑龙江(9)
华北(38)	北京(4)、天津(10)、河南(12)、河北(10)、山西(2)
华东(153)	安徽(11)、山东(22)、浙江(13)、江西(22)、江苏(85)
西北(47)	新疆(6)、宁夏(4)、甘肃(9)、陕西(28)
南方(141)	重庆(17)、贵州(3)、四川(4)、广西(5)、湖北(12)、 湖南(100)

1.2 数据计算

在进行文献数据搜集时,文献中图的数据用Get-Data Graph Digitizer 2.24^[23]提取。同组数据包含NPK(对照组)和NPKM(处理组)的产量、重复数(n)以及标准差(SD)。文献中只提供标准误(SE)的通过公式(1)转化为标准差(SD):

$$SD = SE/\sqrt{n} \quad (1)$$

整合分析采用MetaWin 2.1软件进行^[24]。本研究中相对于NPK,NPKM处理下产量增加的百分数(产量增幅)用 $(e^{R_{++}} - 1) \times 100\%$ 计算,其中 R_{++} 为加权响应比,是对每个独立试验响应比(Response ratios, R)的加权,由公式(2)计算^[25]:

$$R_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij} R_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij}} \quad (2)$$

式(2)中: m 是分组数(例如,不同的气候类型或土壤养分水平); k_i 是第 i 分组的总比较对数; j 表示第 i 分组的总比较对数(k_i)中的第 j 对; w_{ij} 表示权重系数,用平均值的变异系数(V)的倒数表示:

$$w_{ij} = \frac{1}{V} \quad (3)$$

$$V = \frac{SD_t^2}{n_t Y_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c Y_c^2} \quad (4)$$

式(4)中: Y_t 、 SD_t 和 n_t 分别代表NPKM处理产量的平均值、标准差和样本数; Y_c 、 SD_c 和 n_c 分别代表NPK处理产量的均值、标准差和样本数。响应比(R)用公式(5)进行计算,并对其进行对数化($\ln R$)处理以反映配施有机肥对产量的影响程度^[26]:

$$R = Y_t / Y_c \quad (5)$$

$$\ln R = \ln Y_t - \ln Y_c \quad (6)$$

R_{++} 的95%置信区间(95% CI)若未包含零点,则表示相比NPK,NPKM处理对产量影响显著,反之则表示没有显著影响^[27],通过式(7)计算:

$$95\%CI = R_{++} \pm 1.96S(R_{++}) \quad (7)$$

$S(R_{++})$ 表示 R_{++} 的标准差:

$$S(R_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij}}} \quad (8)$$

此外,在合并响应比计算加权平均响应比前,需采用卡方检验(Chi-square test)对各试验处理及结果进行异质性检验,若检验结果 $P>0.05$,则表示无异质性,选择固定效应模型,否则选择随机效应模型^[28]。

在本研究中增产率计算方法与产量增幅(产量增加的百分数)不同,计算增产率时,首先利用 $(Y_{NPKM}-Y_{NPK})/Y_{NPK}\times 100\%$ 公式计算每组数据的增产率值,然后再求增产率的均值,用于比较各个地区施用有机肥后作物产量的提升情况。

各因素影响有机肥增产效果的重要度用R语言中的软件包Random Forest进行计算^[29]。

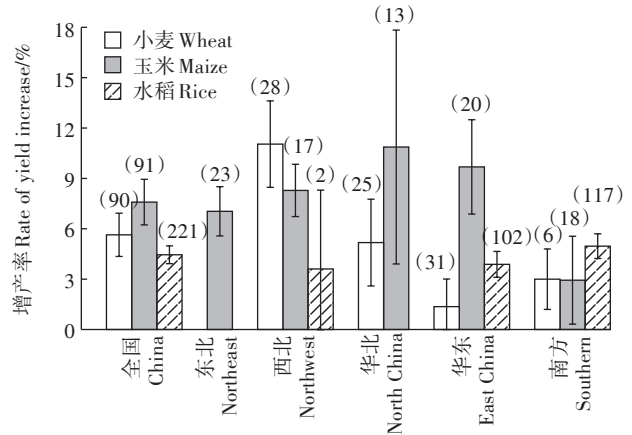
2 结果与分析

2.1 不同施肥处理作物的产量

如图2所示,总体来说,在不施肥(CK)处理下,我国粮食作物的平均产量为 $4\ 719\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施用化肥(NPK)和配施有机肥(NPKM)后作物的产量分别显著增加 $2\ 403$ 、 $2\ 744\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P<0.05$)。在CK、NPK和NPKM处理下,我国小麦的产量分别为 $3\ 263$ 、 $5\ 337\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\ 564\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米的产量分别为 $5\ 853$ 、 $8\ 660\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9\ 226\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻的产量分别为 $4\ 844$ 、 $7\ 215\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $7\ 511\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。对于小麦、玉米和水稻,在NPKM处理下作物的产量较NPK处理分别显著增加了 227 、 $566\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $296\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.2 我国不同区域有机肥的增产率

图3为不同区域的主要粮食作物NPKM较NPK相比的增产率。就全国来说,NPKM处理下我国玉米的增产率最高,为 7.6% ,其次为小麦(5.6%),最低为



误差线代表平均值的标准误差,括号内的数值代表数据量
Error bars represent the standard error of the mean, the value in parentheses represent number of data

图3 不同作物及区域有机肥的增产率

Figure 3 The yield increase rate of different crops and regions under manure application

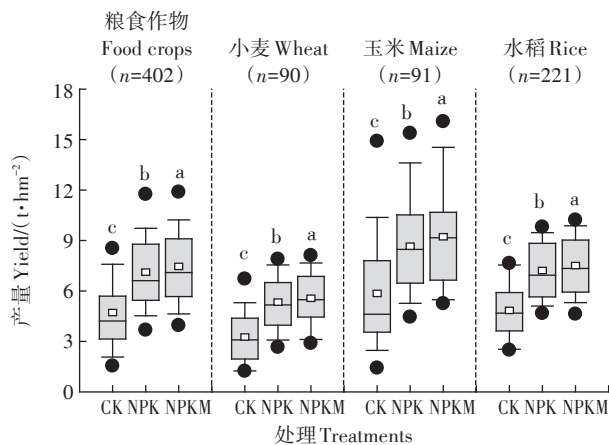
水稻(4.5%)。区域上,玉米的增产率在华北最高,为 10.9% ,较其他区域高 $1.2\sim 8.0$ 个百分点,在南方地区最低,为 2.9% 。小麦的增产率高低依次为西北(11.0%)、华北(5.2%)、南方(3.0%)和华东(1.4%)。水稻的增产率在华东和南方区域分别为 3.9% 和 5.0% 。可见,有机肥的增产效果在区域上存在差异,我国华北和华东地区在玉米季配施有机肥后产量提升效果更佳,西北地区在小麦季配施有机肥效果优于玉米和水稻季,在南方地区,有机肥对产量的提升效果在水稻季优于小麦和玉米季。

2.3 气候因素对有机肥增产效果的影响

总体来说,相对于NPK,NPKM处理在不同气候类型下均能显著提高作物的产量,其中在温带大陆性气候和温带季风性气候下的产量增幅较大,分别比亚热带季风性气候条件下(3.7%)高 4.9 、 2.9 个百分点(图4)。从各气候因素来看,年均降雨量(AAR)、年均温(MAT)和无霜期(FFD)越少(或越低、越短),有机肥配施处理的产量增幅越高,在 $AAR\leq 600\text{ mm}$ 、 $MAT\leq 12\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $FFD\leq 175\text{ d}$ 的地区均超过 7.3% ,是其他水平的2倍左右。有机肥处理的产量增幅在 $ASD> 2\ 600\text{ h}$ 的地区为 6.7% ,在 $ASD\leq 2\ 600\text{ h}$ 的地区不超过 4.4% 。

2.4 土壤性状对有机肥增产效果的影响

综合不同养分的土壤来说,作物产量在NPKM处理下较NPK增加了 4.7% (图5)。有机肥配施处理的产量增幅在土壤有机质含量 $\leq 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时为 6.0% ,有机质含量 $>20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 $4.3\%\sim 4.8\%$,但差异不显著。



箱图的上误差线代表最大值,下误差线代表最小值,中间实线和白色方块分别表示中位数和平均数;不同小写字母表示处理间的产量差异显著($P<0.05$),n表示样本量

The upper error line represents the maximum value, the lower error line represents the minimum value; The solid line and white squares in the box represent the median value and mean value, respectively; The different lowercase letters indicate significant differences in yield among treatments ($P<0.05$), n indicates sample number

图2 不同施肥处理下作物的产量

Figure 2 The yield of crops under different fertilization treatments

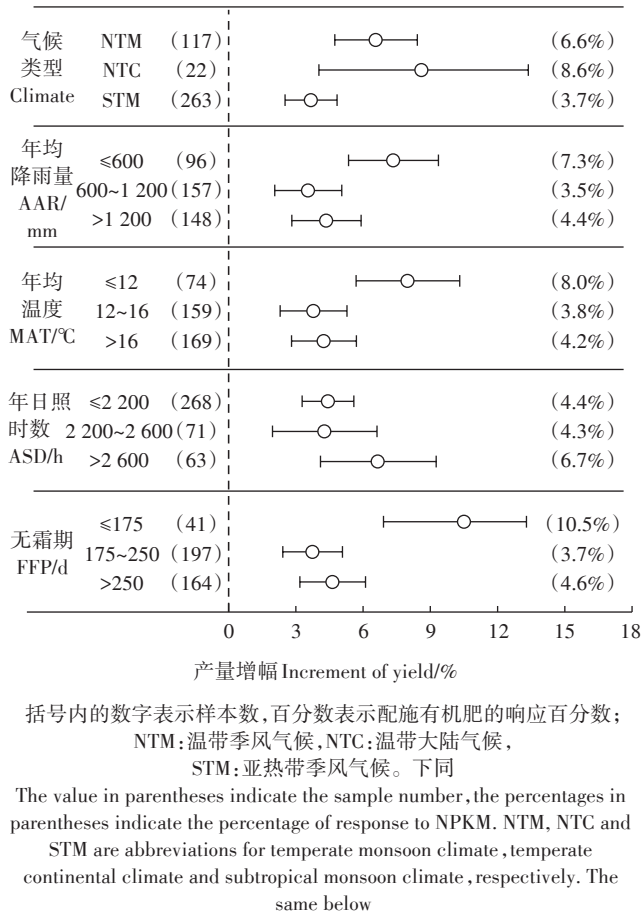


图4 配施有机肥在不同气候条件下对产量的影响

Figure 4 Effect of NPKM on yield under different climatic conditions

NPKM处理作物的产量在全氮含量 $\leq 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 地区的增幅(7.7%)分别是全氮含量 $1\sim 1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 地区的2.2倍和1.6倍。不同土壤碱解氮、有效磷和速效钾水平下,有机肥处理的产量增幅无显著差异。土壤的酸碱度也是影响有机肥增产的主要因素,碱性($\text{pH}>7.5$)土壤产量增幅为6.3%,分别比 $\text{pH}\leq 6.5$ 和 $6.5<\text{pH}\leq 7.5$ 土壤高1.4、2.4个百分点。总体来看,在土壤肥力较低的地区,配施有机肥后作物产量的增幅较高。

2.5 各因素影响有机肥增产效果的重要度

从图6可知,土壤因素影响有机肥对粮食作物增产效果的总重要度为61.0%,气候因素的总重要度为39.0%。其中,土壤因素中SOM、AK、pH和TN的重要度相对较高,均超过10.4%,气候因素中降雨量和无霜期的重要度较高,分别达到11.1%和10.2%。对于三大粮食作物,影响有机肥增产效果的主控因素存在差异。对于小麦和水稻,降雨量是影响有机肥增产作用的首要因素;对于玉米,无霜期和年均温是

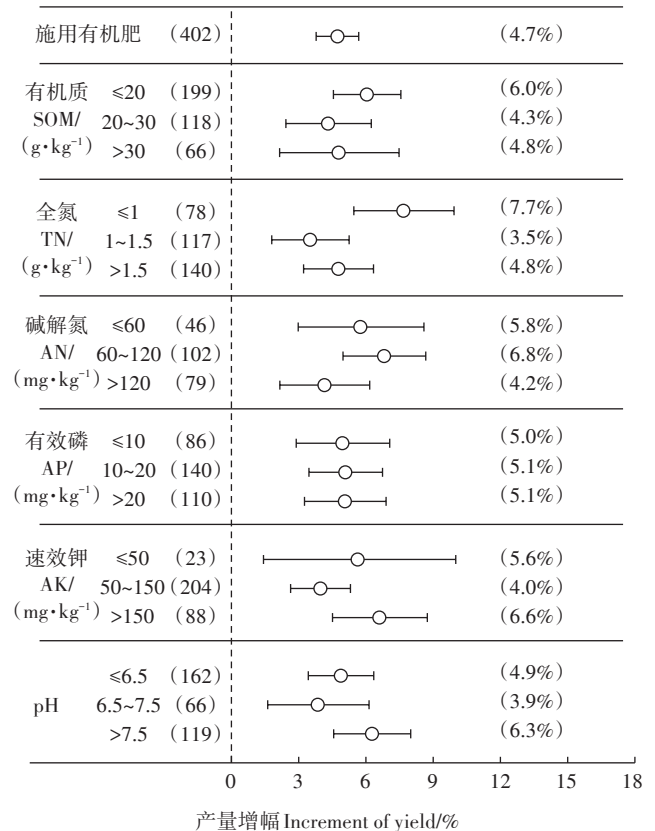


图5 配施有机肥在不同土壤养分水平下对产量的影响

Figure 5 Effect of NPKM on yield under different nutrient levels

影响有机肥增产作用的首要因素。土壤养分含量水平对有机肥增产率的影响较低,对小麦、玉米和水稻来说,AK、AP和pH分别是影响有机肥施用效果的因素之一。

3 讨论

总体而言,配施有机肥能显著提高我国粮食作物的产量(图2),其原因一是有机肥含有丰富的养分,不仅带入氮磷钾等营养物质,还为土壤微生物提供了碳源,提高了微生物活性,加速了养分的循环转化^[30-32];其二,有机肥的配施可以降低土壤容重,增加孔隙度、团聚体含量等,促进养分的运输和作物的吸收。有机肥的保水保肥性还可降低化肥养分的流失,保证作物生长所需的养分^[7]。但是,配施有机肥对作物的增产效果在作物类型和区域上存在一定的差异。

配施有机肥处理下,小麦和玉米的增产效果优于水稻(图3),其原因可能是作物对于不同形态氮源的吸收具有偏向选择性,一般而言,玉米和小麦等旱作植物偏好于硝态氮,水稻则偏好于铵态氮^[33],而有机肥的施用会促进铵态氮向硝态氮的转化。这是因为

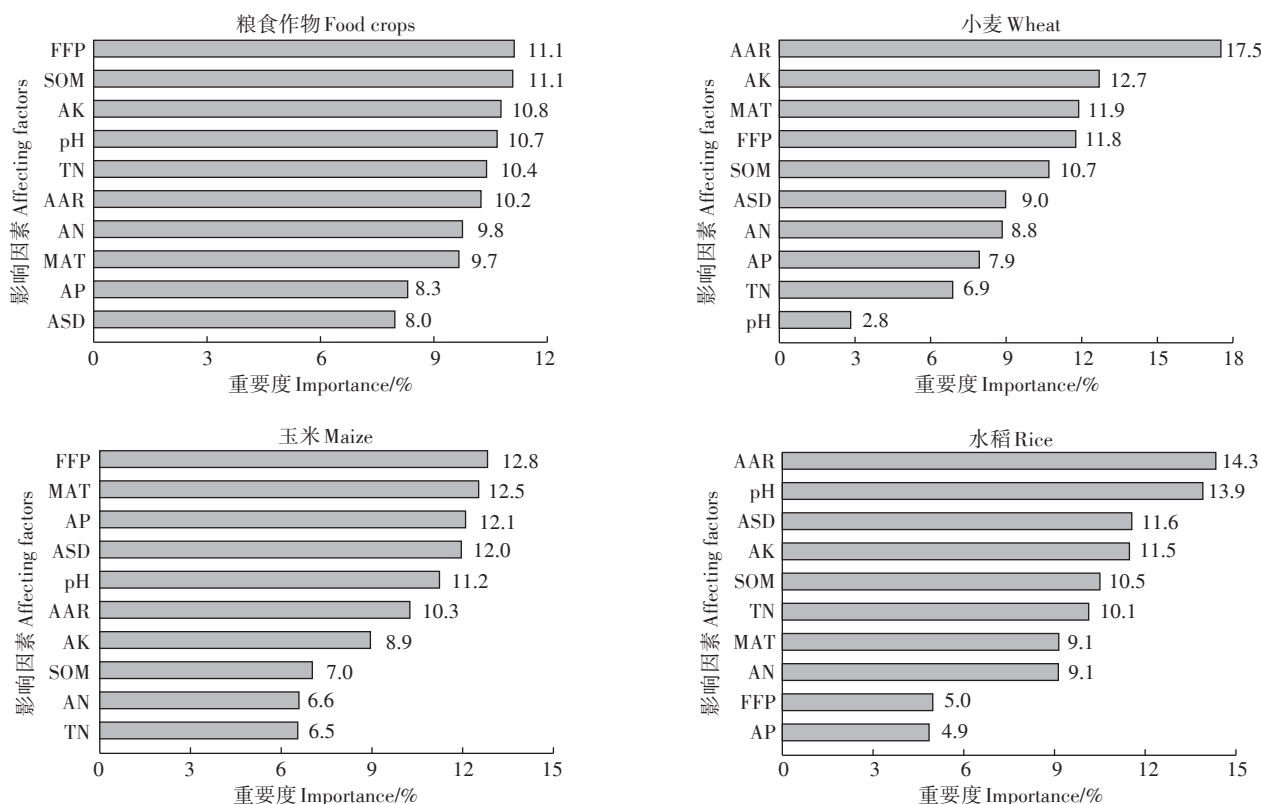


图6 影响有机肥增产的主要因素

Figure 6 The main factors affecting the increase of yield with manure fertilizer

相对于单施化肥,有机肥的配施增加了大量的有效碳源,提高了微生物的生物量和活性,一方面促进微生物同化更多的铵态氮进入土壤活性有机氮库,另一方面还能够提高氮素转化过程中异养硝化的无机过程^[34],因此,配施有机肥能为玉米和小麦提供更多的氮素养分。此外,小麦和玉米的产量对配施有机肥的响应也存在差异,主要是由于小麦早期生长阶段温度较低,不利于有机肥的矿化和土壤本身各种养分的释放,限制小麦对养分的吸收,而玉米则相反,早期生长阶段温度较高,有机肥的矿化能为玉米提供更加充足的养分^[14];而且小麦在苗期对磷素的缺乏较为敏感^[35],玉米对缺磷的敏感期在生长后期^[36],在小麦苗期有机肥矿化缓慢,难以提供充足的磷,导致小麦和玉米对有机肥响应具有差异。区域上有机肥的增产差异与作物类型也存在一定的内在联系,我国东北地区主要以种植玉米和水稻为主,西北和华北地区以种植小麦和玉米为主,而南方和华东则以种植水稻为主^[37],导致我国西北、东北和华北地区有机肥的增产效果优于南方和华东地区。从气候因素来看,配施有机肥后作物产量的增幅在降雨量较少、年均温较低的温带大陆性气候区和温带季风气候区大于高温多雨

的亚热带季风气候区(图4),这是由于有机肥的配施能够很好地防止土壤中水分的损失,提高土壤地表温度,促进作物的生长^[38-39]。气候因素中年均降雨量是影响小麦和水稻有机肥增产作用的主控因素,主要是由于小麦和水稻在各个生育时期对水分的需求量较大,有机肥的施用起到很好的保水作用^[39-40];年均温和无霜期是影响玉米有机肥增产作用的主控因素,因为玉米是喜温性作物,低温会抑制玉米的发芽和发育,霜冻前不能正常成熟,籽粒质量下降^[41],配施有机肥可以起到很好的保温作用。

土壤中有有机质和全氮含量越低,有机肥的增产效果越显著(图5),因为在高肥力土壤上,作物本身的产量较高,有机肥的配施虽然能够提高土壤中有有机质和速效养分的含量,维持土壤肥力,但对于产量的进一步提升空间较小。总体来看,在土壤肥力较低的地区,配施有机肥后作物产量的增幅较高,可能是因为有机肥提供的碳源和养分对低肥力土壤来说更及时有效地起到了培肥地力和供给作物养分吸收的作用。有机肥对产量的提升作用在不同pH土壤上没有显著差异,而陈志科等^[42]发现有机肥的施用可改良土壤酸化,使作物增产11%~39%。这主要是由于本研究收

集的土壤pH多介于5.5~6.5之间,土壤未达到严重酸化,有机肥的增产作用并不明显。因此,配施有机肥在不同pH土壤上的增产作用及机制还需进一步探讨。

4 结论

(1)总体来说,相对于单施化肥,配施有机肥后我国粮食作物产量平均增幅约4.7%,但作物和区域间存在一定的差异。增产率在作物间表现为:玉米>小麦>水稻;在区域间表现为:西北>东北、华北>南方>华东。

(2)对于小麦和水稻,降雨量是影响有机肥增产效果的主要因素;对于玉米,无霜期和年均温是影响有机肥增产效果的主要因素。

(3)在土壤有机质含量低于 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量低于 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区,应考虑通过施用有机肥来提高土壤综合生产能力。

参考文献:

- [1] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2012, 116:1-40.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴2019[M]. 北京:中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [4] Zhu Z L, Ju X T, Cui Z L, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9):3041-3046.
- [5] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1):175-181. NING Chuan-chuan, WANG Jian-wu, CAI Kun-zheng. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1):175-181.
- [6] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 西南黄壤性水稻土长期不同施肥模式下作物产量及氮肥利用率演变特征[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3):20-27. LIU Yan-ling, LI Yu, ZHANG Ya-rong, et al. The dynamic of crop yield and nitrogen use efficiency under different long-term fertilization patterns in paddy soil from yellow earth in southwest China[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017(3):20-27.
- [7] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):947-954. LIU Ru-liang, ZHANG Ai-ping, LI You-hong, et al. Rice yield, nitrogen use efficiency (NUE) and nitrogen leaching losses as affected by long-term combined applications of manure and chemical fertilizers in Yellow River irrigated region of Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):947-954.
- [8] Dawe D, Dobermann A, Ladha J K, et al. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems?[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2):191-213.
- [9] 段英华, 徐明岗, 王伯仁, 等. 红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5):72-77. DUAN Ying-hua, XU Ming-gang, WANG Bo-ren, et al. Effects of long-term different fertilization on nitrogen recovery efficiency of maize in red soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5):72-77.
- [10] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20):3934-3943. XIE Jun, ZHAO Ya-nan, CHEN Xuan-jing, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20):3934-3943.
- [11] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):290-296. MENG Lin, ZHANG Xiao-li, JIANG Xiao-fang, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2):290-296.
- [12] Liu J, Liu H, Huang S M, et al. Nitrogen efficiency in long-term wheat-maize cropping systems under diverse field sites in China[J]. *Field Crops Research*, 2010, 118(2):145-151.
- [13] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5):61-66. LIU Hong-jiang, JIANG Hua-wei, SUN Guo-feng, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017(5):61-66.
- [14] Duan Y H, Xu M G, Gao S D, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157:47-56.
- [15] 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 等. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响[J]. 中国农业气象, 1999(4):21-24. GUO Li-ping, WANG Xing-ren, ZHANG Fu-suo, et al. Effect of fertilizer application in different years of crop yields and fertilizer recovery[J]. *Agricultural Meteorology*, 1999(4):21-24.
- [16] 刘立军, 徐伟, 唐成, 等. 土壤背景氮供应对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2005(4):343-349. LIU Li-jun, XU Wei, TANG Cheng, et al. Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer-N use efficiency in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005(4):343-349.
- [17] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. 土壤学报, 2019, 56(3):1-10. CHENG Yi, ZHANG Jin-bo, CAI Zu-cong. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate conditions in soil N nutrient management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):1-10.
- [18] 尚宗波, 高琼, 杨奠安. 利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律[J]. 生态学报, 2001, 21(5):689-693. SHANG Zong-bo, GAO Qiong, YANG Dian-an. Spatial pattern analysis of annual pre-

- ciptiation with Climate Information System of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(5):689-693.
- [19] 方晓, 蔡冰, 郑石. 我国年平均气温和冬季气温研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2016, 12(5):153-154. FANG Xiao, CAI Bing, ZHENG Shi. Research progress and prospect of annual mean temperature and winter mean temperature in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 12(5):153-154.
- [20] 李慧群, 付遵涛, 闻新宇, 等. 中国地区日照时数近50年来的变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(2):203-209. LI Hui-qun, FU Zun-tao, WEN Xin-yu, et al. Characteristic analysis of sunshine duration change in China during the last 50 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(2):203-209.
- [21] 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 等. 1951年以来中国无霜期的变化趋势[J]. *地理学报*, 2015, 70(11):1811-1822. NING Xiao-ju, ZHANG Li-jun, YANG Qun-tao, et al. Trends in the frost-free period in China from 1951 to 2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11):1811-1822.
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998:356. National Soil Census Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998:356.
- [23] Taova S. Get data digitizing program code: Description, testing, training[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, International Nuclear Data Committee, 2013.
- [24] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. Metawin: Statistical software for meta-analysis with resampling tests[M]. America: Sinauer Associates Inc, 1997.
- [25] Curtis P S, WANG X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology[J]. *Oecologia (Berlin)*, 1998, 113(3):299-313.
- [26] Hedges L V, Curtis G P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4):1150-1156.
- [27] Pallmann P. Applied meta-analysis with R[J]. *Journal of Applied Statistics*, 2015, 42(4):914-915.
- [28] 何寒青, 陈坤. Meta分析中的异质性检验方法[J]. *中国卫生统计*, 2006, 23(6):486-487. HE Han-qing, CHEN Kun. Methods for measuring heterogeneity in a meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2006, 23(6):486-487.
- [29] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45:5-32.
- [30] 霍琳, 王成宝, 逢焕成, 等. 有机无机肥配施对新垦盐碱荒地土壤理化性状和作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015(4):105-111. HUO Lin, WANG Cheng-bao, PANG Huan-cheng, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on physical and chemical properties and crop yields in alkali-saline soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015(4):105-111.
- [31] 杨玉爱, 何念祖, 叶正钱. 有机肥对土壤锌、锰有效性的影响[J]. *土壤学报*, 1990, 27(2):196-201. YANG Yu-ai, HE Nian-zu, YE Zheng-qian. Effects of organic manure on the availability of Zn and Mn in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(2):196-201.
- [32] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(1):119-128. REN Feng-ling, ZHANG Xu-bo, SUN Nan, et al. A meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1):119-128.
- [33] Zhang J B, Cai Z C, Muller C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant-specific N preferences: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3):488-501.
- [34] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2):292-304. WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zu-cong, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2):292-304.
- [35] Romer W, Schilling G. Phosphorus requirements of the wheat plant in various stages of its life cycle[J]. *Plant Soil*, 1986, 91:221-229.
- [36] Girma K, Martin K L, Freema K W, et al. Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38:1137-1154.
- [37] 周立三. 中国综合农业区划[M]. 北京: 农业出版社, 1981. ZHOU Li-san. China comprehensive agricultural regionalization[M]. Beijing: Agriculture Press, 1981.
- [38] Kallenbach C, Grandy A S. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 144(1):241-252.
- [39] 马臣. 黄土高原旱地麦田有机无机肥配施的减氮增产及土壤环境效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. MA Chen. Effects of combined application of inorganic fertilizer and organic manure on nitrogen fertilization rate wheat grain yield and soil environment on the Loess Plateau dryland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [40] 邢素林, 马凡凡, 吴蔚君, 等. 水分管理对水稻产量、品质及氮磷流失的影响研究综述[J]. *中国稻米*, 2018, 24(3):16-20. XING Su-lin, MA Fan-fan, WU Wei-jun, et al. Effects of water management on yield, quality of rice and nitrogen and phosphorus loss in paddy field[J]. *China Rice*, 2018, 24(3):16-20.
- [41] 刘文海, 赵彦平, 王慧. 浅析温度对玉米生长发育及产量的影响[J]. *农业科技通讯*, 2015(10):56-60. LIU Wen-hai, ZHAO Yan-ping, WANG Hui. Effect of temperature on growth and yield of corn[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015(10):56-60.
- [42] 陈志科, 罗宏伟, 邢精华, 等. 施用有机肥对土壤肥力及作物产量的影响[J]. *农业科技通讯*, 2017(2):39-42. CHEN Zhi-ke, LUO Hong-wei, XING Jing-hua, et al. Effects of application of organic fertilizer on soil fertility and crop yield[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2017(2):39-42.