

王姣琳, 黄晓萌, 王博博, 等. 长江流域中稻施肥增产效应及其影响因素[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(2): 105-114.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.013

长江流域中稻施肥增产效应及其影响因素

王姣琳^{1,2}, 黄晓萌^{1,2}, 王博博^{1,3}, 徐新朋¹, 丁文成¹,
杨兰芳², 仇少君¹, 赵士诚¹, 何萍¹

1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062;
3. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430064

摘要 分析长江流域施用氮、磷和钾肥对水稻的增产效应及其影响因素的贡献率, 为该水稻种植区域的养分管理提供依据。数据来源于国际植物营养研究所在中国长江流域开展的水稻田田间试验以及通过在中国知网检索关键词为“水稻”“水稻+产量”的文献, 符合Meta分析标准的氮磷钾数据分别有1 107、745和785组。以不施肥处理作为对照, 以反应比作为增产效应值, 利用Meta分析方法探究施肥对长江流域中稻的增产效应及其影响因素。与不施氮、磷或钾肥处理相比, 长江流域中稻施用氮、磷和钾肥均具有显著的增产效应, 施用氮、磷和钾肥的产量分别平均增加了35.1%、10.9%和11.9%, 其中以氮肥的增产效应最高。不同基础地力水平对水稻增产效应具有显著影响, 施用氮、磷和钾肥的增产效应均以低地力土壤(产量 $<5.0\text{ t/hm}^2$)的增产效应最高, 增产率分别为45.9%、15.1%和17.0%。长江流域各省市种植区域中稻施用氮、磷和钾肥的增产效应具有显著差异, 以上海市的施氮增产效应最高, 为43.9%, 以重庆市的施磷和施钾增产效应最高, 分别为16.4%和16.1%。施用氮肥在碱性土壤条件下增产效应最好, 施用磷和钾肥均在弱酸性(pH 6.0~7.0)土壤条件下最好, 增产率分别为39.0%、14.1%和15.7%。不同土壤有机质含量间施用氮和钾肥增产效应具有显著差异, 而施用磷肥的增产效应影响不显著。当土壤全氮 $\leq 1.0\text{ g/kg}$ 、全磷 $> 0.9\text{ g/kg}$ 、全钾 $< 13.0\text{ g/kg}$ 、碱解氮 $\leq 100\text{ mg/kg}$ 、速效磷 $< 9.0\text{ mg/kg}$ 、速效钾 $\leq 70.0\text{ mg/kg}$ 时, 施氮的增产效应最好; 当土壤全磷 $< 0.3\text{ g/kg}$ 、全钾 $> 20.0\text{ g/kg}$ 、碱解氮 $> 150.0\text{ mg/kg}$ 、速效磷 $\leq 9.0\text{ mg/kg}$ 、速效钾 $\leq 70.0\text{ mg/kg}$ 时, 施磷和钾肥均获得最好的增产效应。低肥力土壤有助于增加施肥的增产效应, 然而土壤pH和不同土壤理化性质影响着施肥增产效应, 导致长江流域不同省市之间的施肥增产效应存在差异。施用氮肥的增产效应分别在土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量较低的土壤上最高, 施用磷钾肥的增产效应在土壤碱解氮含量较高和速效磷、速效钾含量较低时最高。施用氮肥在碱性土壤、施用磷肥和钾肥在弱酸性土壤的增产效果最好。因此, 各种植区域水稻养分管理应结合土壤pH、有机质及土壤理化性质等方面进行综合考虑, 作为肥料投入的依据。

关键词 长江流域; 中稻; 施肥; 肥料利用率; 养分管理; Meta分析; 增产效应

中图分类号 S511.106 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0105-10

水稻是我国主要粮食作物之一^[1], 截至2020年, 我国的年水稻种植面积达3 000万 hm^2 , 占粮食总种植面积的25.9%^[2]。长江流域由于其得天独厚的自然条件, 是我国重要的粮食生产基地, 其水稻播种面积达到了1 204.1万 hm^2 ^[3]。施肥是保证作物产量和提高质量的有效方式之一^[4], 其对粮食增产的贡献率超过50%^[5]。然而, 在生产中农民为了追求高产普遍存在着过量施肥的现象, 不仅浪费肥料, 降低肥料利用率, 还造成环境污染, 从而进一步影响粮食产量

的提高^[6]。施肥量过高是我国肥料利用率低的主要原因之一。有研究表明, 2002—2015年我国水稻的过量施肥程度达43.5%, 而长江中下游地区已成为我国仅次于华南地区的第二大水稻过量施肥程度地区^[7-8]。因此, 研究长江流域中稻的施肥增产效应及其影响因素对保持水稻高产和提高水稻品质至关重要, 可对减少肥料损失和提高肥料利用率等提供科学依据。

土壤基础肥力水平是影响肥料利用率高低的基

收稿日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200101); 国家自然科学基金项目(31801938)

王姣琳, E-mail: wjl406221334@163.com

通信作者: 徐新朋, E-mail: xuxinpeng@caas.cn

本因子^[9],通常基础地力水平较高的土壤其作物产量也较高^[10-11]。然而,随着施肥量的不断增加,养分在土壤中不断累积到一定程度后施肥增产效应便不再增加且不断降低。梁涛等^[12]研究表明,在相同的氮、磷和钾肥施用水平下,随着基础地力水平的提高,水稻的肥料利用率分别下降了6.9%、4.5%和3.1%。以往的研究多基于某个地区,且多关注施肥对水稻产量和肥料利用率的影响,而不同地区的施肥增产效应存在较大差异,缺乏大尺度上的系统分析。因此,需根据已有的大量田间试验数据对肥料的增产效应及其影响因素进行定量的综合分析。Meta分析作为一种定量综合分析方法,可以对独立的同一研究主题的多个研究结果的综合效应及影响因素等进行系统地定量分析^[13-14]。因此,本研究通过Meta分析方法定量研究长江流域中稻产量的增产效应及其影响因素,以期优化长江流域水稻的施肥量、提高水稻产量、提高肥料利用率从而减轻环境污染提供数据支撑和科学参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于我国长江流域水稻主产区在2000—2017年间水稻田间试验,包括国际植物营养研究所开展的水稻田间试验,以及在此时间段内发表在中国知网文献数据库以“水稻”“水稻+产量”及“水稻+肥料利用率”等为主要关键词检索所得到的文献。根据研究目的,基于以下标准对检索文献进行筛选:(1)研究区域为长江流域中稻种植区;(2)同一研究中需具有不同施肥处理包括优化施肥、减素处理以及不施肥处理等;(3)具有各处理产量的平均值及其相应的标准差;(4)试验具有土壤基础养分指标。通过筛选共获得2 637组数据(样本量)。

1.2 数据处理

以优化施肥即获得最高产量时的施肥量为基准对各试验的施肥量进行划分,氮、磷和钾肥分别分成5个水平,即在优化施肥量基础上各增减100%、减50%、增50%和增100%,本研究中氮、磷和钾肥的平均施肥量分别为(191.2±53.3)、(82.4±30.8)和(114.8±47.7) kg/hm²。氮肥、磷肥和钾肥水平从低到高分别用N0、N1、N2、N3、N4, P0、P1、P2、P3、P4和K0、K1、K2、K3、K4表示。

在分析土壤地力水平下不同施肥水平增产效应

时,采用空白处理即不施肥处理的水稻产量表征,其平均产量为5.7 t/hm²,且分布范围在2.7~9.8 t/hm²,总体变异系数为21.1%。依据产量数据分布情况,将土壤基础地力产量划分为4个等级,分别为<5.0 t/hm², 5.1~6.0 t/hm², 6.1~7.0 t/hm²和>7.0 t/hm²。4个基础地力水平的样本量分别占总样本量的32.9%(n=548)、29.2%(n=486)、30.5%(n=355)和23.6%(n=275)。

1.3 效应值计算

分别建立水稻施肥量、产量、土壤理化性质等指标的数据库,根据研究目的,选取反应比^[15-16](response ratio, R)作为效应值,反应比计算公式:

$$R = \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}$$

其中, \bar{X}_1 和 \bar{X}_2 为分别为施用和不施用氮、磷或钾肥处理下的水稻产量平均值。其自然对数比为:

$$\ln R = \ln \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2} = \ln \bar{X}_1 - \ln \bar{X}_2$$

方差计算公式:

$$v_{\ln R} = \frac{S_{d1}^2}{n_1 \bar{X}_1} + \frac{S_{d2}^2}{n_2 \bar{X}_2}$$

其中,数字1和2分别表示施用和不施用某种养分处理, S_d 为标准偏差, n 为样本数量。采用openMEE软件分析各组数据的效应值,并将效应值转化为增长率以加深对结果的理解:

$$E = (R - 1) \times 100\%$$

1.4 模型选择

由于不同试验研究间管理措施、土壤状况、气候条件、肥料品种等存在差异,选取随机效应模型计算综合效应值。其样本综合效应值描述性统计分析如表1所示。

1.5 数据分析

依据总体效应值的95%置信区间判别不同条件下施肥产量效应是否显著,95%置信区间均大于0为显著正效应,包括0为无显著影响,小于0为显著负效应。

Meta分析的发表偏倚检验采用Rosenthal's 失安全系数(fail-safe number, N_{fs})检验整个数据的发表性偏倚,若 $N_{fs} > 5n + 10$ (n 为样本量),则认为结果可信^[17],其检验结果见表1。

本研究综合考虑了长江流域的施肥水平、基础地力水平、土壤理化性质和种植区域的差异。氮肥施肥水平按照N1、N2、N3和N4处理与N0处理进行

对比和分析,磷肥和钾肥的分析同氮。根据试验地的数据情况,将土壤pH划分为 ≤ 6.0 、 $6.0\sim 7.0$ 和 > 7.0 ,土壤有机质划分为 ≤ 20.0 、 $20.0\sim 30.0$ 和 > 30.0 g/kg,全氮划分为 ≤ 1.0 、 $1.0\sim 2.0$ 和 > 2.0 g/kg,全磷划分为 ≤ 0.3 、 $0.3\sim 0.9$ 和 > 0.9 g/kg,全

钾划分为 ≤ 13.0 、 $13.0\sim 20.0$ 和 > 20.0 g/kg,碱解氮划分为 ≤ 100.0 、 $100.0\sim 150.0$ 和 > 150.0 mg/kg,速效磷划分为 ≤ 9.0 、 $9.0\sim 20.0$ 和 > 20.0 mg/kg,速效钾划分为 ≤ 70.0 、 $70.0\sim 120.0$ 和 > 120.0 mg/kg等水平。

表1 样本量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of sample size

养分 Nitrite	样本量 Number	平均值 Mean	标准差 S_d	最小值 Minimum	最大值 Maximum	Q_i	d_i	P_{QM}
N	1 107	0.301	0.004	0.006	1.157	86 833.43	1 106	<0.001
P	745	0.103	0.003	0.000	0.589	21 035.44	744	<0.001
K	785	0.112	0.004	0.000	0.684	24 611.83	784	<0.001

注 Note: Q_i :异质性检验统计量 Statistic of heterogeneity; d_i :自由度 Degree of freedom; P_{QM} :显著性检验 Significance test.

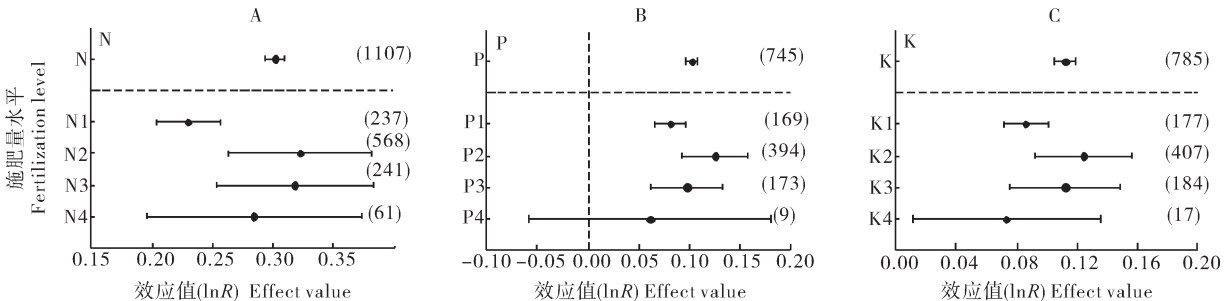
2 结果与分析

2.1 不同施肥量水平下水稻施肥的增产效应

图1显示在长江流域施用氮、磷和钾肥对中稻生产具有显著增产效应,尤其是氮肥和钾肥,其各施肥水平下均具有显著的增产效应。氮肥在水稻的增产中占主导作用($Q_i=86\ 833.43$, $d_i=1\ 106$, $P<0.001$),综合效应值 $\ln R$ 为0.301,增产率为35.1%;其次为钾肥的增产效应($Q_i=24\ 611.83$, $d_i=784$, $P<0.001$),其 $\ln R$ 为0.112,增产率为11.9%;磷肥的增产效应最小($Q_i=21\ 035.44$, $d_i=744$, $P<0.001$),综合效应值 $\ln R$ 为0.103,增产率为10.9%。对其氮、磷和钾肥增产效应进行发表性偏倚检验,结果显示,其失安全系数(N_{fs})分别为68 247 007、3 219 682和5055 579, $5n+10$ 分别为5 545、3 735和3 935,均远大于 $5n+10$ (n 取值见表1),说明具有可靠的综合效应值。

然而,各施肥水平下的增产效应存在一定差异(图1)。(1)施氮增产效应。随着氮肥用量的增加,其增产效应呈先增加后降低的趋势,其中在N2施肥水

平下显示出最高增产效应,其综合效应值为0.322,相应的增产率为38.0%。N1、N3和N4施肥水平的综合效应值分别为0.230、0.318和0.284,对应的增产率分别为25.9%、37.4%和32.8%。(2)施磷增产效应。随着施磷量的增加,施肥增产效应呈现先增加后下降的趋势,在P2水平表现出最大的增产效应,其综合效应值为0.126,对应的增产率为13.4%;而较低的增产效应在P1和P4水平,其综合效应值分别为0.082和0.062,增产率分别为8.6%和6.4%,表明施磷量过低或过高均不利于产量的增加。(3)施钾增产效应。其增产趋势与磷肥一致,最高的增产效应在K2水平,其综合效应值和增产率分别为0.124和13.2%;其次为K3水平,其综合效应值和增产率分别为0.112和11.9%,K2和K3水平的增产效应无显著差异;K4水平的综合效应值最低,为0.073,增产率仅为7.6%;K1水平的综合效应值为0.086,增产率为9.0%。施用氮、磷和钾肥的增产效应结果表明氮肥仍然在长江流域中稻增产中发挥主导作用。



圆点表示反应比;误差线表示95%的置信区间;括号中数字表示样本量;下同。The dots represent the response ratio The error lines represent the 95% confidence interval; The numbers in parentheses represent the sample size; The same as follows.

图1 不同施肥处理下水稻施用氮(A)、磷(B)和钾(C)肥的增产效应

Fig.1 Effects of rice yield increase to nitrogen(A), phosphorus(B) and potassium(C) fertilizer application under different treatments

2.2 不同基础地力水平下水稻氮、磷和钾肥的增产效应

不同基础地力水平下中稻施用氮 ($Q_M=151.563, d_f=3, P<0.001$)、磷 ($Q_M=50.967, d_f=3, P<0.001$)和钾肥 ($Q_M=83.516, d_f=3, P<0.001$)具有显著的增产效应。然而不同基础地力水平之间的增产效应存在差异(图2)。(1)施氮增产效应。随着地力水平升高,水稻施氮的增产效应降低,其4个基础地力水平由低到高的综合效应值分别为0.378、0.295、0.241和0.193,对应的增产率分别为45.9%、34.3%、27.3%和21.3%。(2)施磷增产效应。增产趋势与施用氮肥一致,基础地力水平由低到高的综合

效应值分别为0.141、0.104、0.08和0.077,对应的增产率分别为15.1%、11.0%、8.3%和8.0%。(3)施钾增产效应。4个基础地力水平由低到高的综合效应值分别为0.157、0.108、0.069和0.073,对应的增产率为17.0%、11.4%、7.1%和7.6%。分析2000—2006、2007—2011和2012—2017年3个时间段的氮磷钾肥增产效应得出,施用氮肥增产效应分别为34.9%、35.1%和35.1%,施用磷肥增产效应分别为11.1%、11.1%和10.6%,施用钾肥增产效应分别为14.5%、10.7%和12.2%,其中氮肥增产效应无显著差异,但磷肥和钾肥增产效应呈降低趋势。

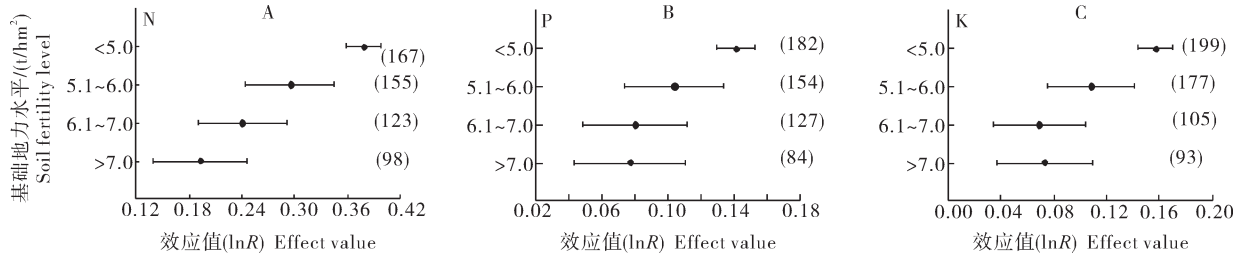


图2 不同基础地力水平下水稻施用氮(A)、磷(B)和钾(C)肥的增产效应

Fig.2 Effects of rice yield increase to nitrogen(A),phosphorus(B) and potassium(C)

fertilizer application under different soil fertility level

2.3 不同种植区域水稻氮、磷和钾肥的增产效应

流域内的9个省市中稻施用氮 ($Q_M=213.605, d_f=8, P<0.001$)、磷 ($Q_M=67.202, d_f=8, P<0.001$,上海市除外)和钾肥 ($Q_M=68.180, d_f=8, P<0.001$)均具有显著增产效应。但不同省市之间增产效应具有较大差异(图3)。(1)施氮增产效应。9个省市中上海市的综合效应值最高,为0.364,其增产率为43.9%;重庆市的综合效应值最低,为0.184,其增产率为20.2%;其余各省的效应值和增产率范围分别为0.209~0.363和23.2%~43.8%。长江流域不同省市之间上海市的施氮增产变异系数最大,为87%;江苏省最小,为35%;其余省市施用氮肥增产的变异系数在40%~50%。(2)施磷增产效应。9个省市中

上海市的施磷增产效应不显著,其增产率仅为0.6%。其余各省施磷具有显著增产效应,其中重庆市增产效应最高,其综合效应值为0.152,增产率为16.4%;增产效应第二高的为湖北省,综合效应值和增产率为0.131和14.0%,另外安徽省和贵州省的增产效应值分别0.122和0.117,增产率分别为13.0%和12.4%;其余各省的施磷增产效应为0.064~0.089,增产率为6.6%~9.3%。长江流域不同省市之间施磷的增产变异系数以云南省最大,为120%;以上海市增产变异系数最小,为65%;其余省市的增产变异系数在69%~82%。(3)施钾增产效应。9个省市中重庆市的增产效应最高,其综合效应值为0.149,增产率为16.1%;其次为贵州省和安徽省,分别为0.135

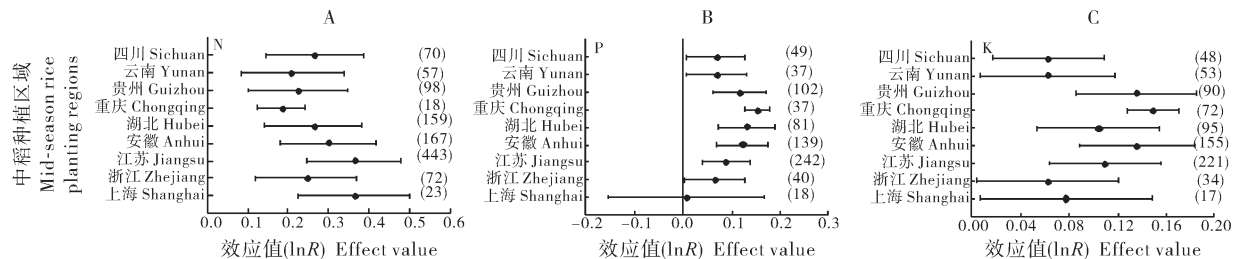


图3 不同种植区域水稻施用氮(A)、磷(B)和钾(C)肥的增产效应

Fig.3 Effects of rice yield increase to nitrogen(A),phosphorus(B) and potassium(C)

fertilizer application under different planting areas

和0.136,对应的增产率分别为14.5%和14.6%;湖北省和江苏省的施钾增产率保持在10%以上;其余省份的施钾增产率范围为6.4%~8.0%。长江流域不同省市之间施钾的增产变异系数以云南省最大,为91%;其余省市变异系数在61%~84%。

2.4 不同土壤pH和有机质含量条件下水稻氮、磷和钾肥的增产效应

不同土壤pH条件下,水稻施用氮($Q_M=31.485$, $d_f=2$, $P<0.001$)、磷($Q_M=17.479$, $d_f=2$, $P<0.001$)和钾肥($Q_M=19.165$, $d_f=2$, $P<0.001$)均具有显著正效应(图4),但不同土壤pH条件下的增产效应具有显著差异。就施氮而言,水稻在pH>7的条件下施氮增产效应最好,其综合效应值和增产率分别为0.329和39.0%,且增产率随着pH升高而升高。施磷和施钾的增产效应趋势均表现为先升高而后降低,在弱酸性(pH 6.0~7.0)条件下施磷和施钾增产效应最好,其综合效应值分别为0.132和0.149,增产率分别为14.1%和15.7%,施磷和施钾的增产效应均在

碱性条件下最差,其综合效应值分别为0.071和0.079。增产率分别为7.4%和8.2%。

不同土壤有机质含量条件下,施用氮($Q_M=58.614$, $d_f=2$, $P<0.001$)和钾肥($Q_M=10.165$, $d_f=2$, $P=0.006$)对水稻增产效应具有显著差异,而施用磷肥($Q_M=3.443$, $d_f=2$, $P=0.179$)无显著影响(图4)。就施氮而言,有机质含量在 ≤ 20.0 、 $20.0\sim 30.0$ 和 > 30.0 g/kg时,其综合效应值分别为0.360、0.313和0.258,对应的增产率分别为44.3%、36.8%和29.4%;其增产效应随着土壤有机质的增加呈降低趋势。就施磷而言,有机质含量在 ≤ 20.0 、 $20.0\sim 30.0$ 和 > 30.0 g/kg时,其综合效应值分别为0.088、0.101和0.109,对应的增产率分别为9.2%、10.6%和11.5%;其增产效应随着土壤有机质含量的增加而增加。就施钾而言,其增产效应呈先增加后降低趋势,土壤有机质含量在 $20.0\sim 30.0$ g/kg时,综合效应值最高,为0.131,增产率为14.0%。

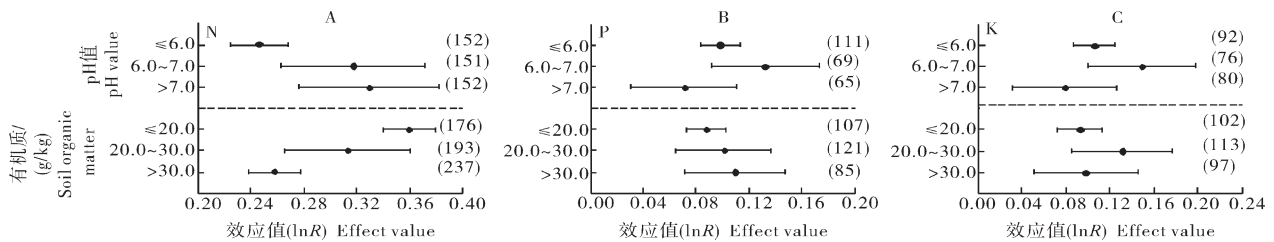


图4 不同土壤pH和有机质含量下水稻氮、磷和钾肥的增产效应

Fig.4 Effects of rice yield increase to nitrogen(A), phosphorus(B) and potassium(C) fertilizer application under different pH and soil organic matter

2.5 不同土壤理化性质条件下水稻氮、磷和钾肥的增产效应

不同土壤理化性质下水稻施用氮、磷和钾肥的增产效应如图5所示。土壤全氮不同水平下水稻的增产呈显著正效应($Q_M=22.329$, $d_f=2$, $P<0.001$),其中以在土壤全氮 ≤ 1.0 g/kg水平下水稻的施氮增产效应最大,其综合效应值为0.328,增产率为38.8%。其施氮增产效应随着全氮含量的增加而降低。土壤全磷($Q_M=5.332$, $d_f=2$, $P=0.070$)和全钾($Q_M=5.324$, $d_f=2$, $P=0.070$)各水平间水稻施氮增产效应均不显著,但全磷含量在 $0.3\sim 0.9$ g/kg、全钾在 $13.0\sim 20.0$ g/kg获得的施氮增产效应最大,其综合效应值分别为0.282和0.276,对应的增产率分别为32.6%和31.8%。水稻施氮增产效应与土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量呈负相关关系,但各土壤碱解氮($Q_M=4.962$, $d_f=2$, $P=0.084$)水平间水稻施氮

增产效应不显著,而土壤速效磷($Q_M=10.635$, $d_f=2$, $P=0.005$)和速效钾($Q_M=7.820$, $d_f=2$, $P=0.020$)各含量水平间水稻的增产效应具有显著差异,其中碱解氮含量 ≤ 100.0 mg/kg,速效磷含量 ≤ 9.0 mg/kg和速效钾含量 ≤ 70.0 mg/kg下施氮的增产效应最高,其效应值分别为0.302、0.332和0.330,对应的增产率分别为35.3%、39.4%和39.1%。

就施磷增产效应而言,不同土壤全氮($Q_M=1.550$, $d_f=2$, $P=0.461$)含量对水稻施磷增产效应影响不显著,且土壤全氮含量在超过 1.0 g/kg后增产效应趋于平缓。不同土壤全磷($Q_M=0.946$, $d_f=2$, $P=0.623$)含量对水稻施磷增产效应无显著差异,但其增产趋势随着土壤全磷含量的增加而下降。而土壤全钾($Q_M=4.808$, $d_f=2$, $P=0.009$)含量对水稻施磷增产效应具有显著影响,增产效应随着土壤全钾含量的增加而增加,在 > 20.0 g/kg时施磷增产效应

最高,为0.176,对应增产率为19.2%;土壤碱解氮($Q_M=5.503, d_f=2, P=0.064$)含量对水稻施磷增产无显著影响,但其增产效应随着碱解氮含量的增加而增加,在碱解氮含量 >150.0 mg/kg时获得最大的增产效应,其综合效应值为0.135,增产率为14.5%。土壤速效磷($Q_M=18.127, d_f=2, P<0.001$)含量对水稻施磷增产具有显著影响,速效磷含量在 <9.0 mg/kg时增产效应最高,其综合效应值为0.129,增产率为13.8%。土壤速效钾($Q_M=0.707, d_f=2, P=0.7012$)含量对水稻施磷增产无显著影响。

就施钾的增产效应而言,土壤全氮($Q_M=1.990, d_f=2, P=0.370$)、全磷($Q_M=0.646, d_f=2, P=0.724$)和全钾($Q_M=0.384, d_f=2, P=0.825$)含量对水稻施钾增产效应无显著影响。但水稻施钾在不同土壤全氮含量水平下均为正效应,全氮含量在 $1.0\sim$

2.0 g/kg时的增产效应最高,综合效应值和增产率分别为0.117和12.4%。另外在全磷 >0.3 g/kg和全钾 >13 g/kg含量水平下,水稻施钾增产效应不显著。不同土壤碱解氮($Q_M=4.848, d_f=2, P=0.089$)、速效磷($Q_M=1.710, d_f=2, P=0.425$)和速效钾($Q_M=1.099, d_f=2, P=0.577$)含量对水稻施钾增产无显著影响,但均具有正效应,土壤碱解氮在 >150.0 mg/kg时施钾的增产效应最高,其效应值和增产率分别为0.133和14.2%,其增产趋势随着土壤碱解氮含量的增加而增加。土壤速效磷在含量 ≤ 9.0 mg/kg时增产效应最好,其综合效应值和增产率分别为0.11和11.6%。水稻施钾效应与土壤速效钾含量呈负相关关系,在土壤速效钾含量 ≤ 70 mg/kg时,获得最大的增产效应,其综合效应值和增产率分别为0.112和11.9%。

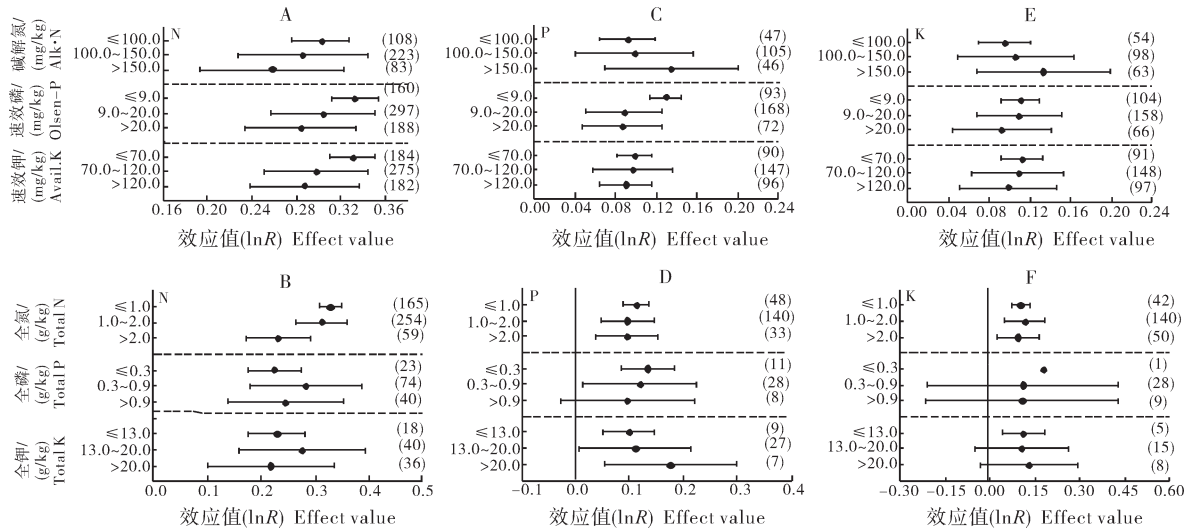


图5 不同土壤理化性质条件下水稻氮(A、B)、磷(C、D)和钾(E、F)肥的增产效应

Fig.5 Effects of rice yield increase to nitrogen(A,B),phosphorus(C,D) and potassium(E,F) fertilizer application under different soil physical and chemical properties

3 讨论

通过施肥为作物提供充足养分,是保持粮食增产和保障粮食安全的重要措施之一^[18-19],截至2020年,我国化肥消费量达5 251.0万t,较2019年减施了2.8%^[3]。本研究结果显示,在长江流域中稻种植区施用氮、磷和钾肥均可显著提高其产量,其增产率分别达到了35.1%、10.9%和11.9%。施用氮肥的增产率远高于磷肥和钾肥,可见,氮素仍是水稻增产的主要养分限制因子。闫湘等^[20]研究结果显示,南方水稻施用氮、磷和钾肥的增产率分别为23.3%、8.8%和11.8%,本研究得到的增产率要高些。本研究中长江

流域水稻平均氮、磷和钾肥的优化用量分别为191.2、82.4和114.8 kg/hm²;而闫湘等^[20]在南方稻区的研究结果为192、86和140 kg/hm²;与之对比,本研究中氮肥和磷肥用量相当,钾肥有所降低。说明随着管理措施的不断加强,优化施肥措施可提高水稻的增产效应。王伟妮等^[21-23]的研究表明,施用氮、磷和钾肥中稻产量可显著提高27.5%、11.3%和9.6%,相比而言,本研究中施氮的增产效应较高,施磷和钾肥的增产效应较为接近。廖育林等^[24]的研究表明施用钾肥可显著提高水稻产量9.1%~17.2%,这与本研究中11.9%的钾肥增产效应接近。

虽然施肥能够显著提高作物产量^[21-24],但长期

高施肥量下会出现土壤养分累积,进而导致施肥增产效应降低。本研究发现在所有样本中,氮、磷和钾肥的增产效应分别有1.1%、29.3%和28.3%,施肥增产效应低于5%。与此同时,施肥增产效应受诸多因素影响,如土壤基础地力影响着作物对肥料养分的吸收^[25-26],进而影响产量。在一定条件下,基础地力水平越高,施肥后的产量也越高,且其产量稳定性越强^[10],而此时在土壤养分含量较低的情况下,其施肥增产效应就越高。随着秸秆还田、有机替代和测土配方施肥等农业措施的不断实施,土壤肥力得到提升,使得磷肥和钾肥的增产效应呈降低趋势。在本研究中,长江流域中稻在不同土壤基础地力水平下施用氮、磷和钾肥均具有显著差异。施肥增产效应与基础地力水平呈负相关关系,这与曾祥明等^[27]的研究结果基本一致,高地力稻田土壤施肥增产潜力小,反之亦然。而即使在同一地力水平下,由于土壤养分含量的差异也会导致不同养分的增产效应存在差异,因此,应通过土壤基础地力的合理培育和提升来提高作物的产量。

长江流域各省市水稻施肥均具有显著的增产效应(上海市磷肥增产效应除外),但存在一定差异。施氮的增产效应以上海市最高,重庆市施磷和施钾的增产效应均为最高。整个长江流域的水稻种植范围大,而流域内的各省市间气候条件、水文状况、土壤类型及其性质不同以及各地农民种植习惯的差异等因素均会导致施肥增产效应差异较大。如云贵高原地区的云南省、贵州省、四川省以及重庆市部分地区,其水土流失和土壤侵蚀相对严重,土壤肥力相对较低^[28]。但需要注意的是施用某种养分的增产效应高并不代表整个地区的地力水平低,因为影响作物增产的因素有很多,如气候水文、土壤类型及其性质以及当地种植习惯等。本研究中的上海市水稻施氮增产效应较高,重庆市施磷和施钾的增产效应高,则是因为其不施用某种养分的产量最低且土壤养分含量较低,如本研究所分析数据中重庆市的土壤速效磷和速效钾含量要低于其他省市,分别为(15.6±6.1)和(74.8±32.2) mg/kg。因此,应结合不同种植区域和种植制度,合理制定施肥方案,如前人研究提出的“大配方、小调整”的区域施肥方案^[29]。

然而,在养分管理过程中,需要考虑土壤的理化性质以达到肥料的最大化利用,因为不同土壤理化性质对水稻的肥料增产效应具有显著影响。如不同土壤pH范围间长江流域水稻施用氮、磷和钾肥的增

产效应均具有显著差异($P<0.001$)。土壤pH是调节土壤中微生物群落结构和物质间化学转化过程的重要因素,能改变硝化作用反应基质(氨)的平衡浓度,直接影响硝化作用的效率、作物对养分的吸收,进而影响作物产量^[30-32]。本研究中水稻施用氮肥在碱性(pH 7.0~8.3)土壤条件下增产效应最好,施用磷和钾肥在弱酸性(pH 6.0~7.0)土壤条件下获得最大增产效应。除施肥以外,土壤养分来源的另一重要途径来自土壤有机质^[33-35]。本研究中,不同土壤有机质含量对水稻施氮的增产效应具有显著影响,且增产效应与有机质含量呈负相关关系,表明土壤肥力越高,施肥的增产效应相对越低。而不同有机质含量对水稻施磷的增产效应无显著影响。不同土壤有机质含量对水稻施钾的增产具有显著影响,其增产效应随着有机质含量增加呈先升高后降低趋势,这与土壤速效钾含量有关,速效钾含量越低其施钾增产效应越高,如有机质水平从低到高的土壤速效钾含量分别为(99.6±48.6)、(93.3±31.6)和(115.7±57.89) mg/kg,而有机质含量20.0~30.0 g/kg时施用钾肥的增产效应最高。此外,本研究中水稻施氮增产效应与土壤全氮、碱解氮、速效磷和速效钾等的含量均呈负相关关系,表明这些土壤基础养分含量越高,其施氮增产效应越低^[36]。而本研究中土壤全钾含量对水稻施磷增产效应具有显著影响,则是由于数据量偏少且个别数值变异较大,应加大次方面数据的收集。在等量养分投入下,合理调控肥料用量对产量提高至关重要。长江流域中稻种植需要结合施肥对产量的影响因素,综合考虑其种植区域土壤理化性状进行优化施肥,减少肥料损失,从而有效提高水稻产量。

参考文献 References

- [1] PATEL D P, DAS A, MUNDA G C, et al. Evaluation of yield and physiological attributes of high-yielding rice varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem [J]. *Agricultural water management*, 2010, 97 (9): 1269-1276.
- [2] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业统计资料2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 29-30. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China agriculture statistical report 2017[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 29-30 (in Chinese with English abstract).
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. [2021-10-25]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html. National Bureau of Statistics. The Statistical Communiqué of the People's

- Republic of China on the 2020 National Economic and Social Development [R/OL]. [2021-10-25]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html.
- [4] HAIDER I K. Appraisal of biofertilizers in rice: to supplement inorganic chemical fertilizer [J]. *Rice science*, 2018, 25 (6) : 357-362.
- [5] 金继运,李家康,李书田. 化肥与粮食安全[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 601-609. JIN J Y, LI J K, LI S T. Chemical fertilizer and food security [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2006, 12(5) : 601-609 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张国荣,李菊梅,徐明岗,等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2) : 543-551. ZHANG G R, LI J M, XU M G, et al. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2009, 42(2) : 543-551 (in Chinese with English abstract).
- [7] 孔凡斌,郭巧苓,潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. *经济地理*, 2018, 38(10) : 201-210. KONG F B, GUO Q L, PAN D. Evaluation on overfertilization and its spatial-temporal difference about major grain crops in China [J]. *Economic geography*, 2018, 38 (10) : 201-210 (in Chinese with English abstract).
- [8] 郭巧苓. 中国主要粮食作物过量施肥程度及其影响因素分析 [D]. 南昌:江西财经大学, 2019. GUO Q L. Evaluation on over fertilization and its influencing factors about major grain crops in China [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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) : 915-924. 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) : 915-924 (in Chinese with English abstract).
- [10] 黄兴成,石孝均,李渝,等. 基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(8) : 1476-1485. HUANG X C, SHI X J, LI Y, et al. Effect of the inherent soil productivity on high, stable and sustainable yield of grain and oil crops in yellow soil region [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2017, 50 (8) : 1476-1485 (in Chinese with English abstract).
- [11] 宇万太,姜子绍,马强,等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5) : 1057-1064. YU W T, JIANG Z S, MA Q, et al. Effects of application of manure on soil fertility [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2009, 15 (5) : 1057-1064 (in Chinese with English abstract).
- [12] 梁涛,廖敦秀,陈新平,等. 重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(16) : 3106-3116. LIANG T, LIU D X, CHEN X P, et al. Effect of paddy inherent soil productivity on nutrient utilization efficiency of rice in Chongqing [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2018, 51(16) : 3106-3116 (in Chinese with English abstract).
- [13] BENDER D J, CONTRERAS T A, FAHRIG L. Habitat loss and population decline: a Meta-analysis of the path size effect [J]. *Ecology*, 1998, 79(2) : 517-533.
- [14] ELLENBERG S S. Meta-analysis: the quantitative approach to research review [J]. *Seminars in oncology*, 1988, 15(5) : 472.
- [15] BORENSEIN M, HEDGES L V, HIGGINS J P T, et al. *Meta分析导论* [M]. 李国春, 吴勉华, 余小金, 译. 北京: 科学出版社, 2013. BORENSEIN M, HEDGES L V, HIGGINS J P T, et al. *Introduction to meta-analysis* [M]. Translated by LI G C, WU M H, YU X J. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [16] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The Meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, 80(4) : 1150-1156.
- [17] KORICHEVA J, GUREVITCH J, MENGENSEN K. *Handbook of Meta-analysis in ecology and evolution* [M]. London: Princeton University Press, 2013.
- [18] LARSON B A. Fertilizers to support agricultural development in sub-Saharan Africa: what is needed and why [J]. *Food policy*, 1996, 21(6) : 509-525.
- [19] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management [J]. *Nature*, 2012, 490(7419) : 254-257.
- [20] 闫湘,金继运,梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. *土壤*, 2017, 49(6) : 1067-1077. YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield increasing rates of grain crops in China [J]. *Soil*, 2017, 49(6) : 1067-1077 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3) : 545-553. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of nitrogen fertilizer application and nitrogen use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2011, 17(3) : 545-553 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4) : 795-802. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of phosphorus application and phosphorus use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2011, 17(4) : 795-802 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5) : 1058-1065. WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early, middle and late rice in Hubei Province [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2011, 17(5) : 1058-1065 (in Chinese with English abstract).
- [24] 廖育林,郑圣先,鲁艳红,等. 长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6) : 1372-1379. LIAO Y L, ZHENG S X, LU Y H, et al. Effects of long-term K fertilization on rice yield and soil K status in reddish paddy soil [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2009, 15(6) : 1372-1379 (in Chinese with English abstract).
- [25] 鲁艳红,廖育林,聂军,等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(21) : 4169-4178. LU Y H, LIAO Y L, NIE J, et al. Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity

- and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2016, 49 (21) : 4169-4178 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李建军, 徐明岗, 辛景树, 等. 中国稻田土壤基础地力的时空演变特征 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(8) : 1510-1519. LI J J, XU M G, XIN J S, et al. Spatial and temporal characteristics of basic soil productivity in China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2016, 49(8) : 1510-1519 (in Chinese with English abstract).
- [27] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (14) : 2886-2894. ZENG X M, HAN B J, XU F S, et al. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2012, 45 (14) : 2886-2894 (in Chinese with English abstract).
- [28] 任意, 张淑香, 穆兰, 等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势 [J]. *中国土壤与肥料*, 2009 (6) : 13-17. REN Y, ZHANG S X, MU L, et al. Change and difference of soil nutrients for various regions in China [J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2009 (6) : 13-17 (in Chinese with English abstract).
- [29] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 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, et al. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9) : 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [30] 黄晓萌, 徐新朋, 何萍, 等. 长江流域冬小麦氮磷钾肥增产效应及其影响因素 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6) : 1059-1068. HUANG X M, XU X P, HE P, et al. Yield response to NPK fertilizer and the main impacts in production of winter wheat in Yangtze River catchments of China [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2020, 26(6) : 1059-1068 (in Chinese with English abstract).
- [31] LAEGREID M, BOCKMAN O C, KAARSTAD O. *Agriculture, fertilizers and the environment* [M]. New York: CABI Publishing in Association with Norsk Hydro ASA, 1999.
- [32] AI C, LIANG G, SUN J, et al. Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil [J]. *Soil biology biochemistry*, 2013, 57(3) : 30-42.
- [33] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8) : 2809-2819. LIN Z A, ZHAO B Q, YUAN L, et al. Effects of organic manure and fertilizer long-term located application on soil fertility and crop yield [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2009, 42(8) : 2809-2819 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐志强, 代继光, 于向华, 等. 长期定位施肥对作物产量及土壤养分的影响 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(4) : 766-769. XU Z Q, DAI J G, YU X H, et al. Effects of long-time fertilization on crop yield and soil nutrients [J]. *Chinese journal of soil science*, 2008, 39(4) : 766-769 (in Chinese with English abstract).
- [35] 程艳丽, 邹德乙. 长期定位施肥残留养分对作物产量及土壤化学性质的影响 [J]. *土壤通报*, 2007, 38(1) : 64-67. CHEN Y L, ZOU D Y. Effects of fertilizer-residue on soil characteristics and crop production [J]. *Chinese journal of soil science*, 2007, 38(1) : 64-67 (in Chinese with English abstract).
- [36] 廖育林, 鲁艳红, 聂军, 等. 长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (5) : 1249-1258. LIAO Y L, LU Y H, NIE J, et al. Effects of long-term fertilization on basic soil productivity and nutrient use efficiency in paddy soils [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2016, 22(5) : 1249-1258 (in Chinese with English abstract).

Effects of fertilization on the yield of mid-season rice in the Yangtze River Basin and its influencing factors

WANG Jiaolin^{1,2}, HUANG Xiaomeng^{1,2}, WANG Bobo^{1,3}, XU Xinpeng¹, DING Wencheng¹,
YANG Lanfang², QIU Shaojun¹, ZHAO Shicheng¹, HE Ping¹

1. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China;*

3. *College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China*

Abstract The effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application on the yield of mid-season rice in Yangtze River Basin and its influencing factors were analyzed to provide a scientific basis for nutrient management in this rice planting areas. The data were collected from the rice field experiments conducted by the international plant nutrition institute (IPNI) and the literature searched on CNKI database with keywords “rice” and “rice + yield” in the Yangtze River Basin of China. There were 1 107, 745 and

785 groups of NPK data that met the criteria for meta-analysis, respectively. Using no fertilization treatment as the control and the response ratio as the value of yield-increasing effect, the Meta-analysis method was used to study the yield-increasing effect of fertilization on rice in the Yangtze River Basin and its influencing factors including soil basic fertility, planting area, soil organic matter, pH and soil physical and chemical properties. Compared with no application of nitrogen, phosphorus or potassium fertilizers, the application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers to the mid-season rice in the Yangtze River Basin had a significant effect of increasing yield. The average yield of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers increased by 35.1%, 10.9% and 11.9%, respectively, and nitrogen fertilizer had the highest effect of yield increase. Different levels of basic soil fertility had significant effects on the increase of rice yield. The effects of yield-increasing of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers were the highest in the low soil fertility (yield < 5.0 t/hm²), with yield increase rates of 45.9%, 15.1% and 17.0%, respectively. The effects of yield-increasing of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers were significantly different in the planting areas of the Yangtze River Basin. The effect of yield-increasing of nitrogen application in Shanghai was the highest, which was 43.9%, and the effects of yield-increasing of phosphorus application and potassium application in Chongqing was the highest, which were 16.4% and 16.1%. The application of nitrogen fertilizer had the best effect of yield increasing under alkaline soil conditions, and the application of phosphorus and potassium fertilizers was the best under weakly acidic soil conditions (pH 6.0-7.0), with yield increase rates of 39.0%, 14.1% and 15.7%, respectively. The effects of yield-increasing of nitrogen and potassium fertilizers were significantly different among different contents of soil organic matter, while the effects of yield-increasing of phosphorus fertilizers were not significant. The effect of yield-increasing of nitrogen application was the best when soil total nitrogen ≤ 1.0 g/kg, total phosphorus > 0.9 g/kg, total potassium < 13.0 g/kg, alkali-hydrolyzed nitrogen ≤ 100 mg/kg, available phosphorus ≤ 9.0 mg/kg, available potassium ≤ 70.0 mg. Both phosphorus and potassium fertilizers obtained the best effect of yield-increasing when soil total phosphorus < 0.3 g/kg, total potassium > 20.0 g/kg, alkali-hydrolyzed nitrogen > 150.0 mg/kg, available phosphorus ≤ 9.0 mg/kg, and available potassium ≤ 70.0 mg/kg. Low-fertility soils help to increase the effect of yield-increasing of fertilization. However, soil pH and different soil physicochemical properties affect the effect of yield-increasing of fertilization, resulting in differences in the effect of yield-increasing of fertilization among different provinces and cities in the Yangtze River Basin. The effect of yield-increasing of applying nitrogen fertilizer was the highest in soils with low contents of alkaline-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium respectively, and the effect of yield-increasing of applying phosphorus and potassium fertilizers was higher when the contents of soil alkaline-hydrolyzed nitrogen were high and the contents of available phosphorus and available potassium were low. The application of nitrogen fertilizer in alkaline soil, the application of phosphorus fertilizer and potassium fertilizer in weakly acidic soil had the best effect of increasing yield. Therefore, the nutrient management of rice in each planting area should comprehensively take the soil pH, organic matter and soil physicochemical properties as the basis for fertilizer input into consideration.

Keywords Yangtze River Basin; mid-season rice; fertilization; fertilizer efficiency; nutrient management; Meta-analysis; effect of increasing yield

(责任编辑:张志钰)