

侯显达, 刘书田, 王铄今, 等. 水稻施肥参数的相关性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 614-619.

HOU Xian-da, LIU Shu-tian, WANG Shuo-jin, et al. Correlation analysis of fertilization parameters in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 614-619.

水稻施肥参数的相关性分析

侯显达^{1,2,3}, 刘书田^{1,2,3}, 王铄今^{1,2,3}, 贾书刚^{1,2,3}, 侯彦林^{1,2,3*}, 陆 伶^{1,2,3}

(1. 广西地标作物大数据工程技术研究中心, 南宁 530001; 2. 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; 3. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(南宁师范大学), 南宁 530001)

摘 要:基于2005—2015年我国18个省、自治区和直辖市测土配方施肥工作143个水稻“3414肥料田间试验”期刊论文数据,对气象条件、最佳产量和最佳施肥量三种施肥参数的关系进行了分析。结果表明:单因素和多因素分析均表明水稻最佳产量、最佳施氮量随着温度和降水量增加而降低,呈现北高南低空间分布格局;水稻最佳施磷量无空间规律性;单因素分析表明水稻最佳施钾量存在北低南高空间分布格局;单因素和多因素分析均表明氮和磷、磷和钾具有交互作用;多因素分析表明磷同时与氮、钾具有交互性。研究表明,不同地区水稻氮、磷和钾平均最佳施肥量为180、90、90 kg·hm⁻²,应根据土壤性质、种植密度和管理措施等进行适当微调,在实际生产过程中,氮和磷需要配施,磷和钾需要配施,在施用磷时需要同时配施氮、钾。

关键词:最佳产量;最佳施肥量;年均温度;年均降水量;肥料利用率

中图分类号:S147.2

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0614-06

doi: 10.13254/j.jare.2019.0239

Correlation analysis of fertilization parameters in rice

HOU Xian-da^{1,2,3}, LIU Shu-tian^{1,2,3}, WANG Shuo-jin^{1,2,3}, JIA Shu-gang^{1,2,3}, HOU Yan-lin^{1,2,3*}, LU Ling^{1,2,3}

(1. Guangxi Geographical Indication Crops Research Center of Big Data Mining and Experimental Engineering Technology, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning 530001, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Nanning Normal University, Nanning 530001, China)

Abstract: In this study, based on the data from the periodicals on "3414 Fertilizer Field Experiments" related to 143 soil tests and fertilizer recommendation projects conducted during 2005—2015 in 18 provinces, autonomous regions, and municipalities, the relationship between meteorological conditions, optimal yield, and optimal fertilizer parameters was analyzed. The single factor and multifactor analyses revealed that both the optimal production and optimal N amount of rice decreased with the increase in temperature and precipitation, thus following the law of north high and south low pattern. Furthermore, a spatial pattern of the optimal P amount in rice did not exist. The single factor analysis revealed that the optimal K amount in rice followed the law of north low and south high pattern; The single factor and multifactor analyses revealed the interactions between N and P, and P and K. In addition, the multifactor analysis showed that P simultaneously interacts with N and K. The main conclusions were as follows: The average optimum fertilization amounts of N, P, and K for rice in different regions were 180, 90 kg hm⁻² and 90 kg hm⁻², respectively, which must be varied on the basis of soil properties, planting density, and management measures. In the actual production process, each N and P, P and K must be combined; simultaneously, N and K must be applied when P is applied.

Keywords: optimal production; optimal fertilizer amount; average annual temperature; average annual precipitation; fertilizer utilization rate

收稿日期:2019-05-07 录用日期:2019-07-26

作者简介:侯显达(1987—),男,北京人,硕士,主要从事农业地理大数据挖掘。E-mail:792733927@qq.com

*通信作者:侯彦林 E-mail:2483977138@qq.com

基金项目:广西科技重大专项(桂科AA17204077);广西科技基地和人才专项(桂科AD18126012);广西一流学科(地理学)建设项目;“广西八桂学者”专项

Project supported: Guangxi Major Science and Technology Projects (AA17204077); Guangxi Science and Technology Base and Specialized Talents (AD18126012); Guangxi Construction Project of First-class Discipline (Geography); Special Funding for “Guangxi Bagui Scholars”

推荐施肥模型是施肥研究的核心内容,一般可以分为三类模型:一是根据土壤养分测定结果的测土推荐施肥方法,该类模型中使用表观肥料利用率和表观土壤养分供应量两个重要参数;二是对大量的田间试验结果进行统计而建立的函数法推荐施肥模型^[1],该类模型中只需要提供试验的肥料用量和产量从而确定回归系数;三是在作物生长期根据对作物某一器官(如叶片)养分的测定结果而进行的推荐施肥,该方法不适合基肥推荐,是辅助方法^[2-3]。

本研究通过对气象条件、最佳产量和最佳施肥量三种施肥参数的关系进行分析,建立施肥参数之间的相关关系,为推荐施肥提供施肥参数。鉴于土壤养分全量和有效养分含量与最佳产量、最佳施肥量之间相关关系不显著,故本研究没有选择土壤养分含量作为影响因素,最终只对最佳产量、最佳施氮量、最佳施磷量、最佳施钾量、年均温度、年均降水量6个变量之间的关系进行了研究。

1 材料与方法

1.1 数据来源

查阅2005—2015年基于全国测土配方施肥工作中的“3414肥料田间试验”而发表的110篇中文期刊,并从中整理出相关数据,使用18个省、自治区和直辖市的包含氮、磷、钾最佳施肥量有效数据共141个样本,其中黑龙江2个、辽宁4个、河南1个、陕西3个、云南2个、贵州9个、四川10个、重庆4个、江苏13个、安徽6个、浙江9个、江西18个、福建17个、湖南1个、湖北16个、广东4个、广西17个、海南5个,其中135个样本有匹配气象数据。

1.2 参数确定

所查文献水稻100 kg籽粒养分带走量为N 2.20~2.40 kg、 P_2O_5 0.90~1.40 kg、 K_2O 2.50~2.90 kg,为了弥补多数文献未提供相关参数的缺项,本研究采用水稻100 kg籽粒养分带走量N 2.10 kg、 P_2O_5 1.25 kg、 K_2O 2.70 kg,此数据为期刊论文数据的平均值并参照文献取值范围得出。如无特殊说明,本研究所指的氮、磷和钾含量均为N、 P_2O_5 、 K_2O 的量。

1.3 指标计算方法

本文规定最佳产量是指“3414肥料田间试验”确定的最佳产量,最佳施肥量是指“3414肥料田间试验”确定的最佳氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)的施用量。

1.4 数据分析

应用SPSS Statistics 22对数据进行统计分析, $P<$

0.05表示相关性显著, $P<0.01$ 表示相关性极显著。

2 结果与讨论

2.1 水稻施肥参数的相关性分析概念模型

“3414肥料田间试验”是使用多元回归方程表达最佳产量与最佳施氮量、最佳施磷量、最佳施钾量之间的关系^[2],也有按土壤肥力高低分别建立回归方程的研究^[4-6],而本研究使用2005—2015年我国主要水稻产区按“3414肥料田间试验”而获得的143个试验数据建立模型,包括气候条件中年均温度和年均降水量因素,期待通过跨时空试验数据揭示最佳产量、最佳施肥量、气象条件之间内在的相互关系,同时弱化局部土壤肥力等立地条件对最佳施肥量和最佳产量的影响,进而从宏观上得出我国水稻最佳产量和最佳施肥量的空间分布格局。

基于文献数据统计结果,提出水稻施肥参数的相关性概念模型:

最佳产量= f (最佳施氮量,最佳施磷量,最佳施钾量,年均温度,年均降水量) (1)

最佳施氮量= f (最佳产量,最佳施磷量,最佳施钾量,年均温度,年均降水量) (2)

最佳施磷量= f (最佳产量,最佳施氮量,最佳施钾量,年均温度,年均降水量) (3)

最佳施钾量= f (最佳产量,最佳施氮量,最佳施磷量,年均温度,年均降水量) (4)

式(1)~(4),可综合反映最佳产量、最佳施肥量、气象因素之间的关系。当数据为区域数据时,模型代表区域,当数据为地类数据时,模型代表地类。具体模型表达式和参数含义根据数据集的空间和时间范围而确定。此处需要说明的是,产量是由施肥量等因素决定的,不能说产量是施肥量的影响因素;但是产量高时需要养分多,产量是求,施肥量是供,二者是供求关系,从供求关系分析,产量也可以看作是施肥量的自变量。

2.2 最佳产量和最佳施肥量影响因素的单因素模型解析

通过对期刊文献中测土配方施肥水稻“3414肥料田间试验”的最佳产量、最佳施氮量、最佳施磷量、最佳施钾量、年均温度、年均降水量进行单因素统计,获得表1。

2.2.1 最佳产量影响因素解析

在所统计的国内18个省143个样本中,最佳施氮量、年均温度、年均降水量与最佳产量之间呈极显著

表1 水稻最佳产量和最佳施肥量单因素模型解析式

Table 1 Single factor models of optimal production and optimal fertilizer amount of rice

项目 Items	单因素回归方程 Univariate regression equation	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>P</i>
最佳产量	Yield=7.44N+6 891.58	0.327	141	<0.001
	Yield=3.22P+8 050.72	0.153	141	0.069
	Yield=-5.24K+8 832.33	0.141	141	0.095
	Yield=-122.48Temp+10 391.23	0.332	135	<0.001
	Yield=-1.60Prec+10 422.19	0.471	135	<0.001
最佳施氮量	N=0.01Yield+70.49	0.327	141	<0.001
	N=0.44P+155.61	0.472	141	<0.001
	N=-0.01K+190.79	0.004	141	0.966
	N=-2.88Temp+239.60	0.141	135	0.101
	N=-0.05Prec+252.98	0.259	135	0.002
最佳施磷量	P=0.01Yield+18.71	0.153	141	0.069
	P=0.51N-17.73	0.472	141	<0.001
	P=0.29K+49.73	0.165	141	0.049
	P=-0.41Temp+85.74	0.019	135	0.830
	P=-0.02Prec+110.21	0.119	135	0.166
最佳施钾量	K=-0.004Yield+131.88	0.141	141	0.095
	K=-0.002N+100.97	0.004	141	0.966
	K=0.09P+93.16	0.165	141	0.049
	K=1.83Temp+68.40	0.151	135	0.079
	K=0.02Prec+73.36	0.184	135	0.032

注:Yield为最佳产量;Temp为年均温度;Prec为年均降水量;N为最佳施氮量(N);P为最佳施磷量(P_2O_5);K为最佳施钾量(K_2O);下同。

Note: Yield is the best yield; Temp is the average annual temperature; Prec is the average annual precipitation; N is the best nitrogen application (N); P is the best phosphorus application (P_2O_5); K is the best potassium application (K_2O); The same below.

相关。由于氮是产量构成的主要营养元素,所以氮为正相关;由于高温多雨不利于水稻高产,所以年均温度和年均降水量均为负相关。说明水稻虽为淹水作物,但气象条件仍然是影响产量的主要因素^[7]。而最佳施磷量和最佳施钾量与最佳产量之间仅在10%显著水平下呈正相关和负相关。

2.2.2 最佳施氮量影响因素及相关因素解析

最佳产量、最佳施磷量、年均降水量与最佳施氮量之间呈极显著相关。由于氮和磷共同构成产量中的有机物质,交互作用强,所以最佳施磷量与最佳施氮量呈正相关;氮是构成产量的主要元素,所以与最佳产量呈正相关;由于多雨地区或多雨季节不适合多施氮肥,所以最佳施氮量与年均降水量呈负相关,这是通过跨区域的数据分析得出的结果。最佳施钾量和年均温度与最佳施氮量之间没有达到显著相关水平。

2.2.3 最佳施磷量影响因素及相关因素解析

最佳施氮量与最佳施磷量之间呈极显著正相关。氮和磷共同构成产量中的有机物质,交互作用强,所以呈正相关。最佳施钾量与最佳施磷量之间呈显著

正相关。钾和磷同为抗逆性元素,有一定的交互作用,所以呈正相关。最佳产量与最佳施磷量呈正相关,因为磷是构成产量的主要成分。年均温度和年均降水量与最佳施磷量未达到显著相关水平。

2.2.4 最佳施钾量影响因素及相关因素解析

最佳施钾量与年均降水量、最佳施磷量呈显著正相关。由于降水量多时钾被淋失的也多,所以要求最佳施钾量高;磷和钾同为抗逆元素,有一定的交互作用。最佳产量和年均温度与最佳施钾量有一定的相关程度(5%~10%显著水平),最佳施氮量与最佳施钾量不相关。

2.3 最佳产量和最佳施肥量影响因素的综合模型解析

通过对期刊文献中测土配方施肥水稻“3414肥料田间试验”的最佳产量、最佳施氮量、最佳施磷量、最佳施钾量、年均温度、年均降水量进行多元统计,获得表2。

2.3.1 最佳产量影响因素模型解析

最佳施氮量和年均降水量共同影响最佳产量,前

表2 水稻最佳产量和最佳施肥量综合模型解析式

Table 2 Comprehensive models of optimal production and optimal fertilizer amount of rice

项目 Items	多因素回归方程 Multivariate regression equation	<i>r</i>	<i>n</i>	<i>P</i>
最佳产量	Yield=6.216N-1.107Prec+9 298.432	0.58	135	<0.001
最佳施氮量	N=0.369P+0.018Yield	0.59	135	<0.001
最佳施磷量	P=0.493N+0.326K	0.50	135	<0.001
最佳施钾量	K=0.121P+83.784	0.28	135	0.051

者为正相关,后者为负相关,回归方程达到极显著水平,其中6.216为单位施氮量增产量,-1.107为单位降水量减产量;与表1单因素相关分析结果对比,年均温度作为影响最佳产量的因素被剔除。

2.3.2 最佳施氮量影响因素及相关因素模型解析

最佳施磷量和最佳产量共同影响最佳施氮量,均呈正相关,回归方程达到极显著水平,其中0.018是100 kg籽粒带走的氮,0.369是与磷平衡的施N比例;与表1单因素相关分析结果对比,年均降水量作为影响最佳施氮量的因素被剔除。

2.3.3 最佳施磷量影响因素及相关因素模型解析

最佳施氮量和最佳施钾量共同影响最佳施磷量,均为正相关,回归方程达到极显著水平,其中0.493是与氮平衡的施磷比例,0.326是与钾平衡的施磷比例;与表1单因素相关分析结果对比,影响因素没有变化。

2.3.4 最佳施钾量影响因素及相关因素模型解析

最佳施磷量影响最佳施钾量,为正相关,回归方程近似达到5%显著水平,其中0.121为与磷交互作用的施钾比例;与表1单因素相关分析结果对比,年均降水量作为影响最佳施钾量的因素被剔除。

表1单因素相关分析结果表明,全国水稻最佳产量平均为10 000 kg·hm⁻²,最佳施氮量平均为180 kg·hm⁻²,与最佳适宜施氮量相吻合^[7],最佳施磷量平均为97.50 kg·hm⁻²,最佳施钾量平均为90 kg·hm⁻²。表2多元分析结果表明,全国水稻最佳产量平均为9000 kg·hm⁻²,最佳施氮量平均为180 kg·hm⁻²,最佳施磷量平均为118.05 kg·hm⁻²,最佳施钾量平均为94.65 kg·hm⁻²。说明单因素相关分析和多元相关分析结果基本吻合,多元分析结果更接近生产实际。

2.4 施肥参数设置和最佳施肥条件选择

本研究将水稻100 kg籽粒养分带走量统一确定为N 2.10 kg、P₂O₅ 1.25 kg、K₂O 2.70 kg,而实际情况下,随着产量的增加,这一参数缓慢增加,并可能产生系统性误差。

本研究将“3414肥料田间试验”中的N₂P₂K₂试验小区产量作为最佳产量,对应的施肥量作为最佳施肥量处理的原因:一是肥料价格经常变动,难以确定经济产量;二是“3414肥料田间试验”中要求N₂P₂K₂试验小区的氮、磷、钾施肥量是本地平均适宜施肥量(通常情况下最佳产量和最佳施肥量需要计算获得);三是根据全国情况分析,在本地平均适宜施肥量情况下,作物产量相对较高,土壤养分变化较小,此时施肥参数符合生产实际;四是期刊论文中基本没有肥料损失量,无法直接获得最佳施肥量。

2.5 水稻施肥参数空间分布特征

本文使用18个省、自治区和直辖市的143个样本,其中135个样本有匹配的气象数据。研究结果表明,全国水稻最佳产量、最佳施肥量空间分布规律的实质是气候条件具有空间差异性。

单因素相关分析结果表明:水稻最佳产量随着温度和降水量的增加而降低^[7-9],由于北方温度和降水量低于南方,因此呈现北高南低总体空间分布格局;水稻最佳施氮量随着温度和降水量的增加而降低^[10],同样呈现北高南低总体空间分布格局;水稻最佳施磷量不随温度和降水量变化而变化^[11],因此没有空间规律性;水稻最佳施钾量随温度和降水量增加而增加,因此呈现北低南高总体空间分布格局^[12]。

多因素分析结果表明:最佳产量随降水量增加而降低,与单因素相关分析结果一致;最佳施氮量与产量有关,而产量呈现北高南低格局,因此最佳施氮量也和产量趋势一致^[13-14];最佳施磷量和最佳施钾量与温度、降水量和最佳产量不相关^[15-16],因此最佳施磷量和最佳施钾量的空间差异性不大。

本研究得出:氮、磷和钾最佳施肥量在全国范围内变化不大,不同地区不同地块的具体施肥量可以依据土壤性质、种植密度和管理措施等进行适当微调。各地区可以氮、磷和钾每季最佳施肥量180、90、90 kg·hm⁻²(全国平均水平)制定当地的平均施肥量,依据不同立地条件和栽培管理措施进行适当调整即可。

2.6 水稻氮、磷、钾养分交互作用

单因素相关分析结果表明:氮与磷具有交互性;磷与钾具有交互性。结论是氮和磷需要配施,磷和钾需要配施。

多元相关分析结果表明:氮与磷具有交互性;磷与钾具有交互性;磷同时与氮、钾具有交互性。结论是氮和磷需要配施,磷和钾需要配施,在施用磷时需要同时配施氮、钾。

氮、磷、钾在施肥时必须平衡^[17-19],因为作物体内营养元素是平衡的,为了达到平衡吸收,土壤养分必须保持平衡^[20-21],当土壤养分不平衡时,就必须通过施肥进行调整。生态平衡施肥就是依据作物吸肥规律,基于土壤养分状况同时考虑环境条件而进行的看天、看地、看作物的平衡施肥。

2.7 施肥模型的完善

在形成具体推荐施肥模型时,可以对模型进行以下三方面的完善:(1)用实验地点就近气象站的季节降水量和季节温度代替年均温度和年均降水量数据;(2)在数据量保证的前提下,若区域(可以按行政区或自然单元)内年或季温度、降水量因素基本一致,建模时可以剔除温度和降水量这两个气象因素,只考虑产量和氮、磷、钾;(3)在按区域建模的基础上,如果数据量充分,还可以再考虑按地类(立地条件如地貌类型,土壤条件如质地等)建模,逐步将下垫面影响因素剔除。

3 结论

(1)各地区可以氮、磷和钾平均最佳施肥量 180、90、90 kg·hm⁻² 为基础,根据当地土壤性质、种植密度和管理措施等进行适当微调。

(2)单因素相关分析和多元相关分析结果表明,在实际生产过程中,氮和磷需要配施,磷和钾需要配施,在施用磷时需要同时配施氮、钾。

参考文献:

- [1] 李娟,章明清,章赞德,等.三元非结构肥效模型提高水稻施肥推荐的可靠性[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):311-320.
LI Juan,ZHANG Ming-qing,ZHANG Zan-de,et al. Increasing precision of fertilizer recommendation using ternary non-structural fertilizer response model[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (2):311-320.
- [2] 侯彦林,陈守伦.施肥模型研究综述[J].土壤通报,2004,35(4):560-564.
HOU Yan-lin, CHEN Shou-lun. Summarization of fertilization model

- research[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 560-564.
- [3] 侯彦林.生态平衡施肥理论、方法及其应用[M].北京:中国农业出版社,2014:38-39,77.
HOU Yan-lin. Theory, method and application of ecological balanced fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 38-39, 77.
- [4] Morala F J, Rebollob F J, Serranoc J M. Estimating and mapping pasture soil fertility in a portuguese montado based on a objective model and geostatistical techniques[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157:500-508.
- [5] Ren Y, Chen J Y, Chen L K, et al. Research and implementation of a universal workflow model to evaluate the soil fertility based on OGC Web Service[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2018, 21 (4): 346-357.
- [6] Rinaldi M, Scalcione E, Perniola M, et al. Soil tillage and residues management in wheat continuous cropping in southern Italy: A model application for agronomic and soil fertility assessment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 140:77-87.
- [7] 王萍,李秀芬,杨晓强,等.生长季降水对黑龙江省水稻生产的影响[J].中国农学通报,2019,35(6):62-69.
WANG Ping, LI Xiu-fen, YANG Xiao-qiang, et al. Growing season precipitation affects rice production in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(6): 62-69.
- [8] 郭建茂,王阳阳,李淑婷,等.台站气温推算稻田温度及其对水稻高温热害的评判[J].自然灾害学报,2018,27(3):162-171.
GUO Jian-mao, WANG Yang-yang, LI Shu-ting, et al. Calculation of rice field temperature based on station temperature and its evaluation on heat injury of rice[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27 (3): 162-171.
- [9] 刘玥.吉首市降水与日照对水稻产量的影响分析[J].农业开发与装备,2017(8):46,72.
LIU Yue. Impact of rainfall and sunshine on rice yield in Jishou City [J]. *Agricultural Development and Equipment*, 2017(8):46,72.
- [10] 黄颖博,汤文光,肖小平,等.稻田不同种植模式对土壤养分表观平衡和氮素生产效率的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1119-1126.
HUANG Ying-bo, TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, et al. Effects of different planting patterns on the apparent balance of soil nutrients and nitrogen production efficiency in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1119-1126.
- [11] 胡雨彤,郝明德,付威,等.不同降水年型和施磷水平对小麦产量的效应[J].中国农业科学,2017,50(2):299-309.
HU Yu-tong, HAO Ming-de, FU Wei, et al. Effect of precipitation patterns and different phosphorus nutrition levels on winter wheat yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2):299-309.
- [12] 孙洪仁,张吉萍,江丽华,等.我国水稻土壤有效磷和速效钾丰缺指标与适宜磷钾施用量研究[J].中国稻米,2018,24(5):1-10.
SUN Hong-ren, ZHANG Ji-ping, GANG Li-hua, et al. Study on the abundance-deficiency index of soil available P and K and appropriate nutrient application rates of P and K for rice in China[J]. *China Rice*, 2018, 24(5): 1-10.
- [13] 吴复学,孙慧敏.不同施氮水平对玉米产量的影响[J].农业与技

- 术,2016,36(18):2,6.
- WU Fu-xue, SUN Hui-min. Effects of different nitrogen application levels on maize yield[J]. *Agriculture and Technology*, 2016, 36(18): 2,6.
- [14] Wang W N, Lu J W, Ren T, et al. Evaluating regional mean optimal nitrogen rates in combination with indigenous nitrogen supply for rice production[J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 37-48.
- [15] 侯云鹏, 杨建, 孔丽丽, 等. 施磷对苏打盐碱土区水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(1): 60-66.
- HOU Yun-peng, YANG Jian, KONG Li-li, et al. Effects of phosphorus fertilizer application on nutrient absorption, translocation and distribution of rice in saline-sodic soil region[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2017, 39(1): 60-66.
- [16] Menge D M, Onyango J C, Yamauchi A, et al. Effect of nitrogen application on the expression of drought-induced root plasticity of upland NERICA rice[J]. *Plant Production Science*, 2019, 22(2): 180-191.
- [17] Zhang D, Wang H Y, Pan J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 8-14.
- [18] 张彬, 魏文武. 不同供氮量对水稻土壤无机氮残留、氮平衡及产量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019(4): 1-5.
- ZHANG Bin, WEI Wen-wu. Effects of different nitrogen supplies on inorganic nitrogen residues, nitrogen balance and yield in rice soil[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019(4): 1-5.
- [19] 李玉影, 刘双全, 姬景红, 等. 黑龙江省水稻平衡施肥与养分循环研究[J]. 黑龙江农业科学, 2018(10): 39-44.
- LI Yu-ying, LIU Shuang-quan, JI Jing-hong, et al. Study on the balanced fertilization and nutrient cycling of rice in Heilongjiang Province[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018(10): 39-44.
- [20] Liu H Y, Won P L P, Banayo N P M, et al. Late-season nitrogen applications improve grain yield and fertilizer-use efficiency of dry direct-seeded rice in the tropics[J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 114-120.
- [21] Jahan M A H S, Hossai A, Timsina J, et al. Productivity, nutrient balance, and economics of monsoon rice under different nutrient management practices in two agro-ecological zones of Bangladesh[J]. *Open Agriculture*, 2019, 4(1): 24-40.