

我国马铃薯产量和化肥利用率区域特征研究

徐亚新^{1,2}, 何萍^{2*}, 仇少君², 徐新朋², 马进川², 丁文成²,
赵士诚², 高强¹, 周卫²

(1 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 吉林长春 130118;
2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 【目的】本研究汇总马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 田间试验数据, 分析中国马铃薯产区施用氮、磷和钾肥的马铃薯产量 (可获得产量、产量反应和相对产量) 及肥料利用率特征, 以期优化马铃薯养分管理奠定理论基础。【方法】本试验数据来源于: 1) 国际植物营养研究所 (International Plant Nutrition Institute, IPNI) 1992—2012 年间在我国马铃薯主产区开展的 117 个田间试验; 2) 采用字段或字段组合 (马铃薯, 马铃薯+产量, 马铃薯+利用率, 等) 在中国知网数据库 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 检索的 2000—2016 年间 407 篇马铃薯田间试验中文文献。将我国马铃薯种植区分为东北 (NE)、西北 (NW)、华北 (NC)、长江中下游 (MLYR)、东南 (SE) 和西南 (SW) 产区。试验处理包括氮磷钾肥优化处理 (OPT)、不施氮 (OPT-N) 处理、不施磷 (OPT-P) 处理和不施钾 (OPT-K) 处理, 研究我国马铃薯不同种植区优化施肥下马铃薯可获得产量, 氮、磷和钾肥产量反应, 相对产量, 农学效率, 偏生产力和养分回收率特征。【结果】我国马铃薯施用氮、磷和钾产量反应平均分别为 8.6、5.9 和 6.6 t/hm², 氮素是马铃薯产量的首要限制因子, 东北地区产量及施氮产量反应平均值显著高于其他地区 ($P < 0.05$)。马铃薯施氮、磷、钾相对产量平均值分别为 71.0%、79.4%、77.2%, 其中, 华北地区施氮相对产量平均值最高, 东南地区施磷相对产量平均值最高, 西北地区施钾相对产量平均值最高。马铃薯氮、磷和钾肥用量平均分别为 N 164.2 kg/hm²、P₂O₅ 100.3 kg/hm² 和 K₂O 188.0 kg/hm², 东南地区氮和钾肥用量平均值显著高于其他地区 ($P < 0.05$), 东北地区施氮量和施钾量较低, 东北、西南和西北施磷量高于其他地区, 长江中下游施磷量最低。马铃薯氮、磷和钾素农学效率平均值分别为 52.2 kg/kg N、58.5 kg/kg P₂O₅ 和 42.3 kg/kg K₂O, 东北地区氮和钾素农学效率平均值显著高于其他地区 ($P < 0.05$)。马铃薯氮、磷和钾素偏生产力平均值分别为 205.7 kg/kg N、339.0 kg/kg P₂O₅ 和 209.2 kg/kg K₂O, 东北地区氮和钾素偏生产力平均值分别显著 ($P < 0.05$) 高于其他地区。马铃薯氮、磷和钾素养分回收率平均值分别为 36.4%、18.5% 和 27.6%, 东南地区磷素回收率平均值显著高于其它地区 ($P < 0.05$)。【结论】我国马铃薯不同产区产量、施肥量和肥料利用率差异较大, 氮素是马铃薯产量的第一限制因子, 华北地区氮素、东南地区磷素和西北地区钾素土壤基础养分供应能力相对较高, 不同地区马铃薯需要因地制宜, 制定有针对性的马铃薯优化施肥方案。

关键词: 马铃薯; 产量; 养分利用率; 养分管理

Regional variation of yield and fertilizer use efficiency of potato in China

XU Ya-xin^{1,2}, HE Ping^{2*}, QIU Shao-jun², XU Xin-peng², MA Jin-chuan², DING Wen-cheng²,
ZHAO Shi-cheng², GAO Qiang¹, ZHOU Wei²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Changchun 130118, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】Large datasets were collected from field experiments on potato (*Solanum tuberosum* L.) to evaluate attainable yield, yield response, relative yield, and nutrient use efficiency parameters to N, P₂O₅ and K₂O fertilizers added in different potato production regions of China. It aimed to provide a basis for potato

收稿日期: 2018-01-09 接受日期: 2018-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200101) 资助。

联系方式: 徐亚新 E-mail: xuyaxin92@163.com; * 通信作者 何萍 E-mail: heping02@caas.cn

nutrient management strategies. 【 **Methods** 】 The datasets were collected from 117 field experiments conducted by the International Plant Nutrition Institute (IPNI), China Program during 1992–2012 and 407 related journal papers from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database with the key words “potato”, “potato yield” and “potato efficiency” during 2000–2016 in different potato production regions of China. Potato production in China was divided into six geographic regions, i.e., Northeast (NE), Northwest (NW), Northcentral (NC), Middle and Lower Reaches of Yangtze River (MLYR), Southeast (SE), and Southwest (SW). The treatments consisted of an optimal treatment (OPT) and the treatments with omission of N, P₂O₅ or K₂O (OPT-N, OPT-P, OPT-K). Attainable potato yields, yield responses (YRs), relative yields (RYs), agronomic efficiencies (AEs), partial factor productivities (PFPs), and recovery efficiencies (REs) were analyzed and discussed. 【 **Results** 】 The average YRs of N, P₂O₅ and K₂O fertilizers were 8.6, 5.9 and 6.6 t/hm², showing N was the most limited nutrient for potato yield in China. Among different regions, the average attainable yield and YR of N ranked first in NE region ($P < 0.05$). The average RYs of N, P₂O₅ and K₂O were 71.0%, 79.4% and 77.2% respectively; the average RYs of N in NC, those of P₂O₅ in SE, those of K₂O in NW were the highest across different regions. The N, P₂O₅ or K₂O rates averaged by 164, 100 and 188 kg/hm² across different regions, and the average N and K₂O rates in SE region were shown to be the highest ($P < 0.05$), the average N and K₂O rates in NE region were lower, the P₂O₅ rates in NE, SW and NW were higher across different regions with the lowest P₂O₅ rates in MLYR. The average AEs of N, P₂O₅ and K₂O were 52.5, 58.5 and 42.3 kg/kg respectively, and AEs of N or K₂O in NE were the highest ($P < 0.05$). The averaged PFPs of N, P₂O₅ and K₂O were 205, 339 and 209 kg/kg respectively, and those of N or K₂O in NE was the highest ($P < 0.05$). The REs of N, P₂O₅ or K₂O averaged by 36.4%, 18.5% and 27.6%, and REs of P₂O₅ in SE were observed to be with the highest values ($P < 0.05$).

【 **Conclusions** 】 There are great differences in tuber yields, fertilizer application rates, and fertilizer use efficiencies across different potato production areas in China. N is the most yield-limiting factor for potato in China, while NC, SE and NW showed high soil indigenous nutrient supply of N, P and K, respectively. The optimal fertilization management of potato should be directed according to local conditions in different potato production areas.

Key words: potato; yield; nutrient use efficiency; nutrient management

我国是世界上最大的马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 生产国^[1], 种植面积和总产量长期处于世界首位, 但我国马铃薯单位面积产量和西方发达国家还有一定差距^[2-3], 改良马铃薯品种^[4-5]和提高养分管理水平是增加马铃薯单位面积产量的有效途径^[6-7]。当前我国马铃薯种植区氮、磷化肥过量和不平衡施用问题严重, 钾肥普遍存在投入不足问题, 有的地方甚至不施钾肥^[8-9]。调查表明, 内蒙古马铃薯氮肥过量较为普遍, 尤其是灌区氮素过量严重, 有 43.5% 的农户施氮量大于 N 300 kg/hm², 磷、钾肥普遍存在施用不足问题^[8]; 云南马铃薯合理施用氮、磷和钾的农户只占调查农户的 21.6%、30.7% 和 10.8%, 氮肥过量施用严重, 有 52.9% 的农户氮肥用量超过 N 250 kg/hm²^[10]。肥料不合理施用不仅影响马铃薯产量的进一步提高, 还导致肥料利用率低下和环境污染等问题^[11]。因此, 合理的养分管理对于进一步提高马铃薯产量和肥料利用率至关重要^[12]。

研究作物产量和养分利用率特征是开展养分管理和推荐施肥的关键^[13]。可获得产量、产量反应和相对产量是建立养分管理与推荐施肥方法的重要参数。可获得产量通常为某一地块田间试验中应用已知的技术和先进的养分管理措施降低产量限制因素(如养分胁迫、病虫害等)所获得的最高产量^[13-14]; 某种养分的产量反应为养分供应充足小区与不施用该养分小区产量的差值, 反映氮、磷和钾肥施用增产情况^[15-16], 以及氮、磷和钾养分对产量的限制作用^[17-18], 不同地区作物产量反应的差异主要与气候、土壤等自然因素和施肥、种植等人为因素有关^[19-20]。相对产量和产量反应呈负相关关系, 相对产量越高, 产量反应则越低, 因此相对产量常用来表征土壤养分供应能力^[21-22], 相对产量较高的地区有着较高的土壤养分供给能力, 可适当降低肥料投入以减少肥料过量施用对环境的污染^[23-24], 不同地区自然气候^[25]、土壤养分状况^[26-27]以及施肥量^[28-29]等因素影响其相对产

量。目前对以上参数研究主要集中在玉米、小麦、水稻,而对马铃薯有关产量和养分状况参数研究极少。养分利用率不仅是评价养分吸收的重要指标也是预测养分需求的重要参考^[28],与产量、肥料用量^[30]、土壤养分供应^[26]和养分管理水平^[31]等密切相关,衡量肥料利用率的常用指标有养分回收率、养分农学效率和养分偏生产力^[32]。明确我国当前肥料养分利用率现状能够为进一步指导施肥,优化马铃薯肥料用量提供参考。

当前,我国马铃薯主产区已开展了许多马铃薯产量^[18,33]和肥料利用率特征^[34]田间试验,缺乏对不同马铃薯种植区域产量和肥料利用率特征参数的综合研究^[33,35]。因此,本研究汇总分析国际植物营养研究所(International Plant Nutrition Institute, IPNI)1992—2012年间在我国马铃薯主产区开展的117个田间试验和中国知网数据库(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)检索的2000—2016年期间公开发表的407篇中文文献,研究揭示我国马铃薯种植区施肥的产量和肥料利用率特征,以期优化马铃薯养分管理和到2020年我国化肥零增长目标奠定理论基础。

1 材料与方法

参考马铃薯种植特点^[36],以及我国行政区划^[37],将我国马铃薯种植区划分为:1)东北地区(黑龙江、吉林和辽宁);2)西北地区(甘肃、内蒙古、宁夏、青海、陕西和新疆);3)华北地区(河北、山东、山西和河南);4)长江中下游地区(安徽、浙江、湖北、湖南、江西和江苏);5)东南地区(福建、广东和广西);6)西南地区(云南、贵州、四川、重庆和西藏)。

我国各地区马铃薯种植时间分别是:东北和西北地区马铃薯生育期主要为3月底至10月初,为一年一季种植类型;华北和长江中下游马铃薯生育期主要为2月下旬到6月中旬,和8月到11月初两个时段,为一年两季种植类型;东南地区马铃薯生长期主要为10月到1月初和1月到4月上中旬,为一年两季种植类型;西南地区受海拔差异影响,高海拔地区马铃薯种植多呈一年一季种植类型,而低海拔地区为一年两季种植类型^[36]。各地区气候和土壤养分等特征及主要参考文献情况见表1。

1.1 数据来源与分析方法

本文试验数据来源于国际植物营养研究所(IPNI)1992—2012年间在我国马铃薯种植区开展的117个田间试验,以及采用字段或字段组合(马铃薯,

马铃薯+产量,马铃薯+利用率,等)在中国知网数据库(CNKI)检索的2000—2016年间的407篇中文文献,所有数据均来源于田间试验,且有明确的施肥量和对应的产量结果。IPNI和CNKI来源试验数据样本情况见表2,试验数据点分布如图1所示。

试验处理包括优化施肥处理(OPT)以及在OPT处理基础上的不施氮、不施磷和不施钾处理,分别以OPT-N、OPT-P和OPT-K处理表示。OPT处理是基于土壤测试和目标产量(IPNI来源数据)或采用其他优化施肥措施处理(文献来源数据)下获得最高产量的施肥处理^[18],该处理不受任何土壤养分缺乏的限制。

产量反应为OPT处理产量与缺素处理产量之差,表明施肥的增产效应。施氮、施磷、施钾的产量反应为OPT处理产量分别减去OPT-N、OPT-P和OPT-K处理产量。

相对产量由OPT-N、OPT-P和OPT-K处理产量与OPT处理产量比值求得,表明土壤养分供给能力。

本文肥料利用率分别以养分农学效率、养分回收率和养分偏生产力来表示。养分农学效率是指施入单位养分的作物增产量,由施入某种养分小区与不施入该养分小区的产量差与养分施入量的比值计算所得;养分偏生产力是肥料利用率最简单的表达方法,指施用单位养分的作物产量,主要由施肥区的作物产量与养分施入量的比值求得;养分回收率主要指施入土壤中的肥料养分被当季作物吸收利用的比例,一般定义为施用某种养分与不施用该养分作物养分吸收量之差与养分施用量的比值。

1.2 统计分析

采用Excel进行数据计算和图表绘制,箱形图采用SigmaPlot 10.0软件绘制,试验点分布图采用ArcGIS 10.1绘制,用SPSS 19.0进行方差分析,LSD法检验,处理间不同字母的差异显著性为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 马铃薯产量特征

汇总OPT处理可获得产量情况(图2),我国马铃薯平均产量为29.4 t/hm²(5.1~70.6 t/hm²),但是变化范围比较大。进一步分析马铃薯不同产区产量结果表明,东北、西北、华北、长江中下游、东南、西南地区马铃薯平均产量分别为37.7 t/hm²(19.9~52.8 t/hm²)、30.0 t/hm²(5.1~70.6 t/hm²)、29.8 t/hm²(6.4~54.9 t/hm²)、22.3 t/hm²(9.7~27.7 t/hm²)、30.5 t/hm²(16.3~56.8 t/hm²)和25.9 t/hm²(7.2~58.4 t/hm²),东

表 1 马铃薯产区试验点气候和土壤特征
Table 1 Climate characters and soil properties of experimental sites in different potato-producing regions of China

区域 Region	省份 Province	气候 Climate	土壤类型 Main soil type	pH	有机质 (%) Organic matter	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydr. N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
东北 Northeast	黑龙江、吉林、辽宁 Heilongjiang, Jilin, Liaoning	寒温带 Cool temperate	黑土、草甸土 Black soil, meadow soil	4.9~8.3	0.2~7.6	60.9~314.0	9.8~123.0	58.0~287.0
西北 Northwest	甘肃、内蒙、宁夏、青海、陕西、新疆 Gansu, Inner Mongolia, Ningxia, Qinghai, Shaanxi, Xinjiang	温带 Temperate	黄绵土、潮土、黑垆土、灰钙土、栗钙土、灌淤土、褐土 Loessal soil, fluvo aquic soil, dark loessial soil, gray calcareous soil, chestnut soil, irrigation silting soil, cinnamon soil	6.0~8.9	0.2~5.1	19.2~211.0	4.3~168.0	14.0~338.2
华北 Northcentral	河北、山东、山西、河南 Hebei, Shandong, Shanxi, Henan	温带 Temperate	潮土、草甸土、褐土、黄绵土、栗钙土 Fluvo aquic soil, meadow soil, cinnamon soil, loessal soil, chestnut soil	4.8~8.6	0.8~3.9	21.0~145.0	4.5~172.0	33.1~171.4
长江中下游 MLYR	安徽、浙江、湖北、湖南、江西、江苏 Anhui, Zhejiang, Hubei, Hunan, Jiangxi, Jiangsu	亚热带 Temperate sub-tropical	黄棕壤、黄壤 Yellow brown soil, yellow soil	4.5~7.8	1.0~3.0	103.0~300.0	5.3~84.5	33.1~196.0
东南 Southeast	福建、广东、广西 Fujian, Guangdong, Guangxi	热带 Tropical	潮土、水稻土 Fluvo aquic soil, paddy soil	4.7~7.1	0.3~3.9	40.0~166.3	6.2~188.0	18.0~248.4
西南 Southwest	云南、贵州、四川、重庆、西藏 Yunnan, Guizhou, Sichuan, Chongqing, Tibet	亚热带 Temperate sub-tropical	红壤、黄棕壤、紫色土、水稻土 Red soil, yellow brown soil, purple soil, paddy soil	4.5~8.2	0.4~6.1	47.5~330.0	3.8~112.1	25.0~950.0

注 (Note): MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River. 各地区主要参考文献, 东北^[38-39]、西北^[11, 40]、华北^[41-42]、长江中下游^[43-44]、东南^[45-46]、西南^[47-48] Main references of potato-producing regions used here were, Northeast^[38-39], Northwest^[11, 40], Northcentral^[41-42], MLYR^[43-44], Southeast^[45-46] and Southwest^[47-48].

表 2 试验数据来源及样本分布
Table 2 The experimental data source and sample distribution

数据来源 Data source	样本分布 Sample distribution						样本数 (n) No. of samples
	东北 Northeast	西北 Northwest	华北 Northcentral	长江中下游 MLYR	东南 Southeast	西南 Southwest	
CNKI 文献 Literature	黑龙江 Heilongjiang (24)、 吉林 Jilin (8)、 辽宁 Liaoning (9)	甘肃 Gansu (42)、 内蒙古 Inner Mongolia (33)、 宁夏 Ningxia (31)、 青海 Qinghai (21)、 陕西 Shaanxi (18)、 新疆 Xinjiang (13)	河北 Hebei (11)、 山东 Shandong (11)、 山西 Shanxi (10)、 河南 Henan (4)	安徽 Anhui (3)、 浙江 Zhejiang (11)、 湖北 Hubei (9)、 湖南 Hunan (4)、 江西 Jiangxi (1)、 江苏 Jiangsu (4)	福建 Fujian (21)、 广东 Guangdong (10)、 广西 Guangxi (12)	云南 Yunnan (14)、 贵州 Guizhou (69)、 四川 Sichuan (10)、 重庆 Chongqing (1)、 西藏 Tibet (3)	407
IPNI 试验 Experiment	黑龙江 Heilongjiang (2)	甘肃 Gansu (12)、 内蒙古 Inner Mongolia (25)、 宁夏 Ningxia (14)、 青海 Qinghai (26)、 陕西 Shaanxi (1)	山西 Shanxi (7)	湖北 Hubei (2)	福建 Fujian (5)	云南 Yunnan (7)、 贵州 Guizhou (3)、 四川 Sichuan (5)、 重庆 Chongqing (4)	113
样本数 (n) No. of samples	43	236	43	34	48	116	520

注 (Note) : MLYR—长江中下游 top and lower reaches of Yangtze River; CNKI—中国知网数据库 China National Knowledge Infrastructure; IPNI—国际植物营养研究所 International Plant Nutrition Institute; 括号中数字为试验样本数 Figures in parenthesis are the total number of samples.

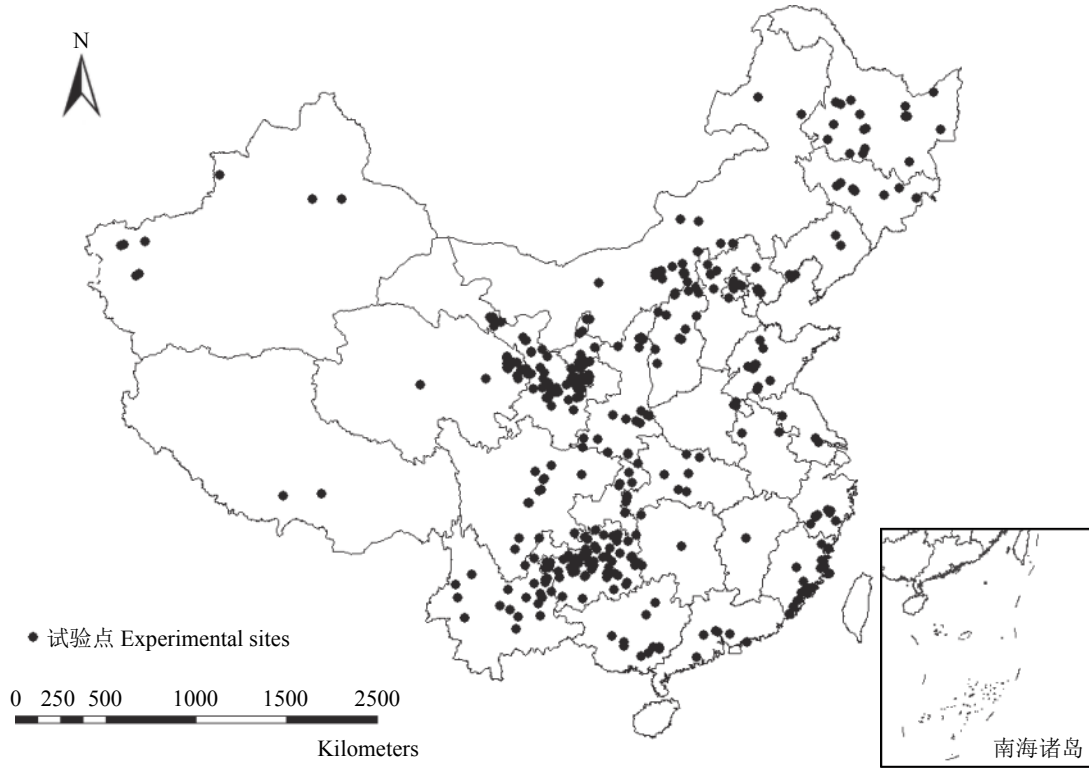


图 1 马铃薯试验点分布示意图

Fig. 1 Distribution of experiment sites in different potato-producing regions of China

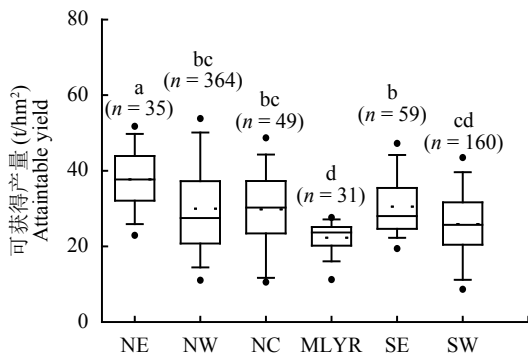


图 2 马铃薯产区优化施肥处理 (OPT) 可获得产量比较

Fig. 2 Comparison of attainable yield in the optimal treatment (OPT) in different potato-producing regions of China

[注 (Note) : NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest. 中间实线和虚线分别代表中值和均值, 方框上下边缘分别代表上下 25%, 上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值, 实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数, 括号中数字为样本数, 不同字母表示差异达 5% 显著水平 The solid and dashed lines indicate median and mean, respectively; the box boundaries indicate the upper and lower quartiles; the whisker caps indicate 90th and 10th percentiles; and the circles indicate the 95th and 5th percentiles. Figures in parenthesis are the total number of observations. Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

北马铃薯产量最高, 长江中下游马铃薯产量最低。

产量反应结果显示, 马铃薯施用氮、磷和钾肥的产量反应分别为 8.6 t/hm² (0.1~31.3 t/hm²)、5.9 t/hm² (0.1~29.6 t/hm²) 和 6.6 t/hm² (0~34.6 t/hm²) (图 3)。进一步分析马铃薯不同产区施肥效应, 东北、西北、华北、长江中下游、东南和西南地区氮肥产量反应 (图 3 a) 分别为 14.7 t/hm² (4.1~31.1 t/hm²)、6.8 t/hm² (0.3~31.3 t/hm²)、6.1 t/hm² (2.1~15.4 t/hm²)、6.0 t/hm² (2.0~8.8 t/hm²)、9.1 t/hm² (1.8~17.6 t/hm²) 和 8.9 t/hm² (0.1~29.6 t/hm²), 相应的磷肥产量反应 (图 3 b) 分别为 9.0 t/hm² (3.3~18.8 t/hm²)、4.8 t/hm² (0.1~27.0 t/hm²)、6.3 t/hm² (2.0~13.9 t/hm²)、4.0 t/hm² (1.5~7.1 t/hm²)、4.3 t/hm² (0.1~14.4 t/hm²) 和 7.3 t/hm² (0.4~29.6 t/hm²), 钾肥产量反应分别为 (图 3 c) 8.6 t/hm² (4.1~17.7 t/hm²)、5.6 t/hm² (0~34.6 t/hm²)、7.6 t/hm² (0.6~18.4 t/hm²)、5.2 t/hm² (1.0~8.1 t/hm²)、6.1 t/hm² (0.2~15.1 t/hm²) 和 6.7 t/hm² (0.1~29.6 t/hm²)。以上结果表明, 东北施用氮、磷、钾的产量效应最大, 华北的施氮产量反应、长江中下游和东南的施磷产量反应和西北的施钾产量反应较低。

表 3 表明, 我国马铃薯产区施氮、磷和钾的相对产量分别为 71.0% (15.4%~99.1%)、79.4%

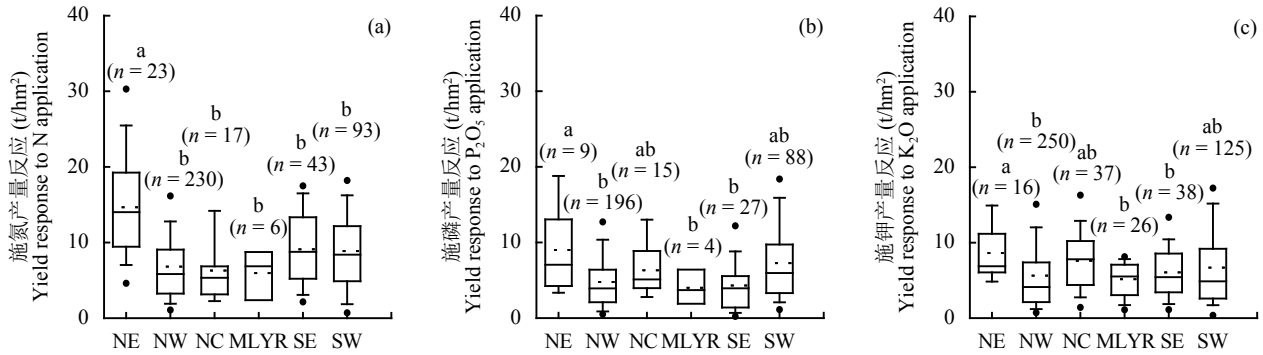


图3 马铃薯产区 OPT 处理施氮、磷、钾产量反应

Fig. 3 Yield response to applied N, P₂O₅ and K₂O in the OPT in different potato-producing regions of China

[注 (Note) : NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest. 中间实线和虚线分别代表中值和均值, 方框上下边缘分别代表上下 25%, 上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值, 实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数, 括号中数字为样本数, 不同字母表示差异达 5% 显著水平 The solid and dashed lines indicate median and mean, respectively, the box boundaries indicate the upper and lower quartiles, the whisker caps indicate 90th and 10th percentiles, and the circles indicate the 95th and 5th percentiles, figures in parenthesis are the total number of observations, different letters above the bars mean significant at 5% level.]

表3 马铃薯产区施氮, 磷, 钾相对产量 (%) 描述统计

Table 3 Descriptive statistics of the relative yield (%) to N, P₂O₅ and K₂O application in different potato-producing regions of China

相对产量 Relative yield	地区 Region	样本数 No. of samples	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	25% 数 25Q	50% 数 50Q	75% 数 75Q
施氮相对产量 Relative yield to N application	NE	23	35.6	84.3	64.3 b	14.1	56.2	67.3	73.4
	NW	230	15.4	99.1	76.4 a	12.7	68.1	78.4	85.4
	NC	17	43.4	93.2	77.6 a	14.7	75.1	81.7	85.1
	MLYR	6	43.2	90.8	72.4 ab	17.8	65.9	73.2	86.4
	SE	43	32.7	94.2	68.0 ab	15.6	61.0	68.3	79.3
	SW	93	33.1	98.7	67.4 ab	17.3	55.8	68.9	78.5
施磷相对产量 Relative yield to P application	NE	9	59.7	91.9	80.8 ab	10.4	77.4	84.3	89.2
	NW	196	36.7	99.4	82.1 ab	12.0	75.0	85.0	91.2
	NC	15	41.0	95.4	78.2 ab	14.1	76.7	82.8	86.0
	MLYR	4	54.2	93.0	79.0 ab	17.0	76.5	84.5	86.9
	SE	27	55.0	99.6	84.8 a	11.3	75.4	87.4	93.1
	SW	88	33.1	97.7	71.4 b	17.2	61.7	77.3	85.0
施钾相对产量 Relative yield to K application	NE	16	50.8	86.4	77.1 ab	8.8	73.4	79.7	82.4
	NW	250	29.9	99.9	82.3 a	12.5	75.3	85.1	91.6
	NC	37	47.8	96.4	73.5 b	12.3	65.6	74.0	83.1
	MLYR	26	55.2	94.5	76.6 ab	10.1	71.1	73.9	86.5
	SE	38	52.9	99.2	80.0 ab	10.7	69.9	82.7	88.9
	SW	125	33.1	99.5	73.9 b	17.8	63.6	78.5	87.5

注 (Note) : NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest. 数值后不同字母表示同一施肥相对产量不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same relative yield to application mean significant at 5% level among treatments.

(33.1%~99.6%) 和 77.2% (29.9%~99.9%)。进一步分析各区域相对产量结果表明, 施氮相对产量平均值以华北最高 (77.6%), 其第 25% 和第 75% 的相对产量分别为 75.1% 和 85.1%, 东北最低 (64.3%), 其第 25% 和第 75% 的相对产量分别为 56.2% 和 73.4%, 西北、长江中下游、东南和西南介于二者之间; 施磷相对产量平均值以东南最高 (84.8%), 其第 25% 和第 75% 的相对产量分别为 75.4% 和 93.1%, 西南最低 (71.4%), 其第 25% 和第 75% 的相对产量分别为 61.7% 和 85.0%, 东北、西北、长江中下游和华北介于二者之间; 施钾相对产量平均值以西北最高 (82.3%), 其第 25% 和第 75% 的相对产量分别为 75.3% 和 91.6%, 其次为东南、东北、长江中下游, 西南, 华北最低。以上结果再次证实, 相对产量越高, 产量反应越低。

2.2 马铃薯施肥量特征

汇总得出马铃薯各产区 OPT 处理氮、磷和钾肥

用量分布情况 (图 4~图 6)。总体来讲, 我国马铃薯氮、磷和钾肥用量分别为 N 164.2 kg/hm² (27.0~427.5 kg/hm²)、P₂O₅ 100.3 kg/hm² (18.0~335.8 kg/hm²) 和 K₂O 188.0 kg/hm² (22.5~405.0 kg/hm²)。分区结果表明, 氮肥用量 (图 4) 平均值以东南地区显著高于其他地区 ($P < 0.05$), 其次为华北、西北、西南、东北, 长江中下游最低; 磷肥用量以东北地区最高 (图 5), 其次为西南和西北, 然后是华北和东南, 长江中下游最低; 钾肥用量平均值以东南地区显著 ($P < 0.05$) 高于其他地区 (图 6), 其次为西南、华北, 然后为长江中下游、东北, 西北最低。

2.3 马铃薯肥料利用率特征

分析 OPT 处理的农学效率情况 (图 7), 得出我国马铃薯氮 (N)、磷 (P₂O₅) 和钾素 (K₂O) 农学效率分别为 52.2 kg/kg (1.2~207.5 kg/kg)、58.5 kg/kg (0.7~205.3 kg/kg) 和 42.3 kg/kg (0.2~232.5 kg/kg)。氮素农学效率以东北最高 (101.6 kg/kg), 华北地区最

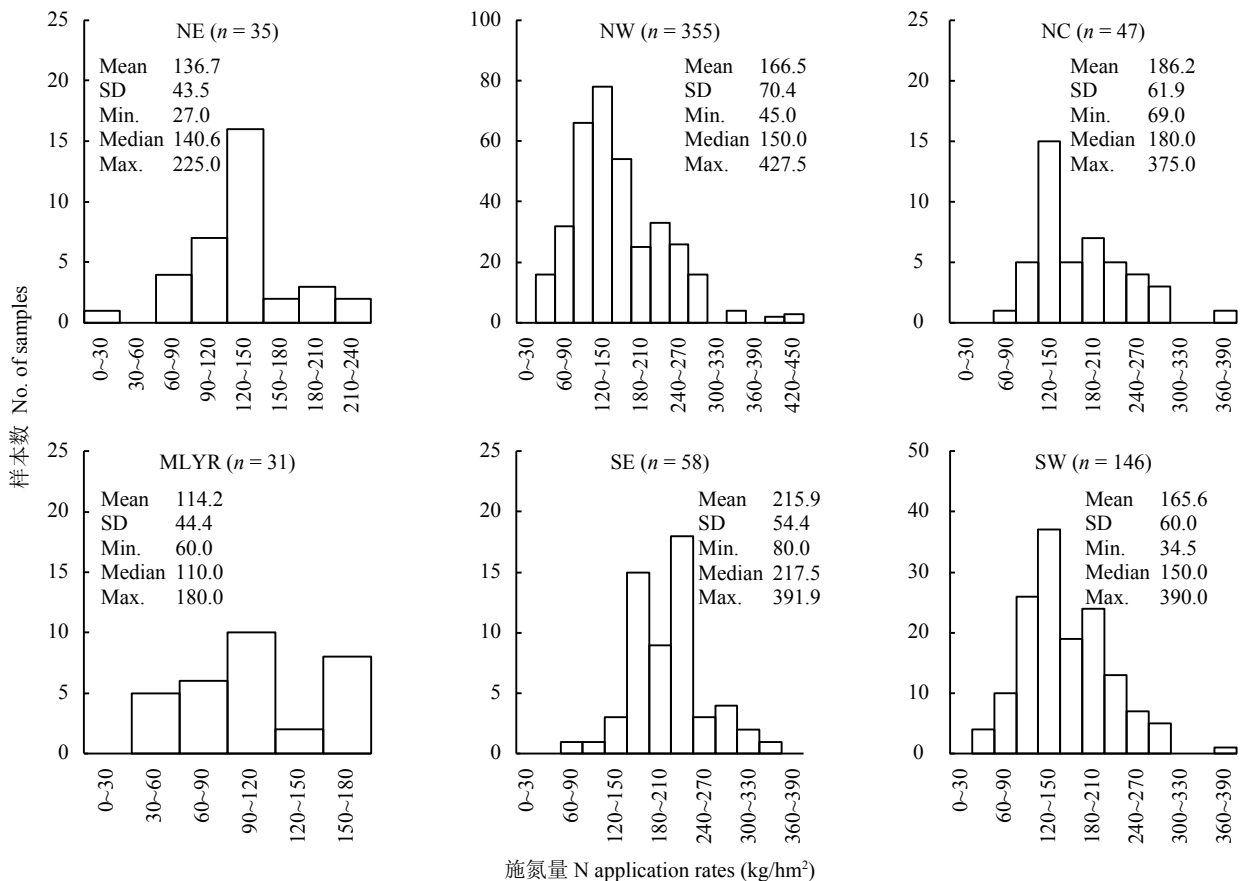


图 4 马铃薯产区 OPT 处理氮肥施用量分布

Fig. 4 Frequency distribution of N application rates in the OPT for potato in different potato-producing regions of China

[注 (Note): NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest; Mean—平均值 Arithmetical Mean; SD—标准差 Standard deviation; Min.—最小值 Minimum; Median—中位数; Max.—最大值 Maximum.]

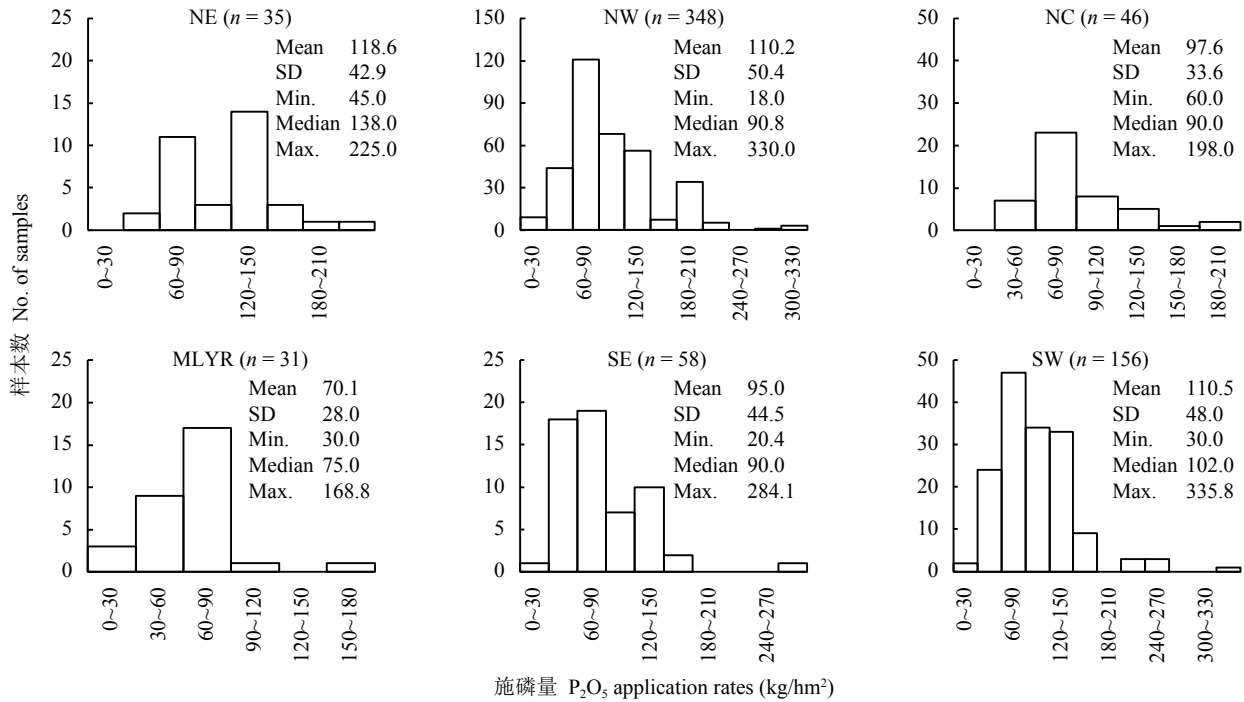


图 5 马铃薯产区 OPT 处理磷肥施用量分布

Fig. 5 Frequency distribution of P₂O₅ application rates in the OPT for potato in different potato-producing regions of China

[注 (Note) : NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest; Mean—平均值 Arithmetical Mean; SD—标准差 Standard deviation; Min. —最小值 Minimum; Median—中位数; Max. —最大值 Maximum.]

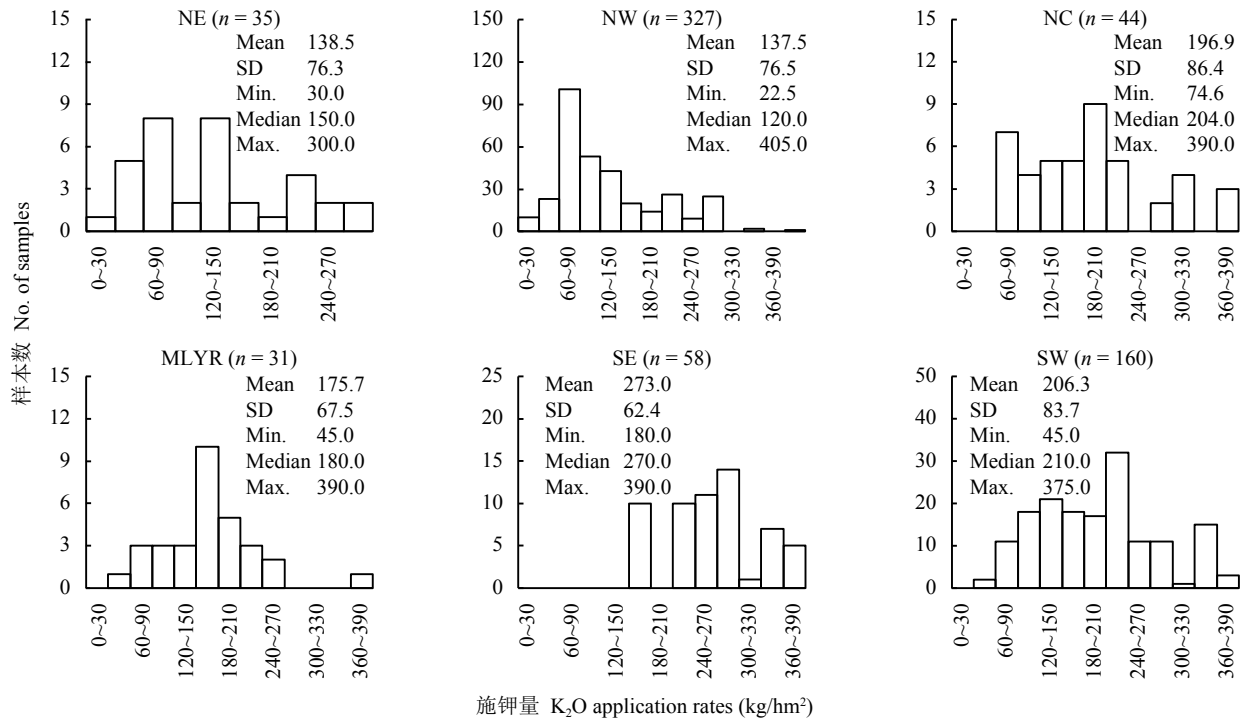


图 6 马铃薯产区 OPT 处理钾肥施用量分布

Fig. 6 Frequency distribution of K₂O application rates in the OPT for potato in different potato-producing regions of China

[注 (Note) : NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest; Mean—平均值 Arithmetical Mean; SD—标准差 Standard deviation; Min. —最小值 Minimum; Median—中位数; Max. —最大值 Maximum.]

低 (29.2 kg/kg), 其他区域处于二者之间 (图 7a)。磷素农学效率平均值西南最高 (68.5 kg/kg), 其次为东北 (65.9 kg/kg)、华北 (63.1 kg/kg), 再者为长江中下游 (53.6 kg/kg)、西北 (53.4 kg/kg)、东南 (46.7 kg/kg) (图 7b)。钾素农学效率东北最高 (75.8 kg/kg), 其次为西北 (48.3 kg/kg), 然后是华北 (43.3 kg/kg)、西南 (37.4 kg/kg)、长江中下游 (27.5 kg/kg), 东南最低 (21.3 kg/kg) (图 7c)。

OPT 处理养分偏生产力结果表明 (图 8), 我国马铃薯产区氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾素 (K_2O) 偏生产力分别为 205.7 kg/kg (25.5~876.7 kg/kg)、339.0 kg/kg (45.7~

1360.3 kg/kg) 和 209.2 kg/kg (27.2~1038.7 kg/kg)。氮素偏生产力以东北最高 (304.0 kg/kg), 然后是长江中下游 (224.7 kg/kg)、西北 (204.9 kg/kg)、西南 (182.4 kg/kg)、华北 (170.8 kg/kg), 东南最低 (147.3 kg/kg) (图 8a); 磷素偏生产力东南最高 (386.6 kg/kg), 其次为长江中下游 (370.5 kg/kg), 然后是东北 (359.1 kg/kg)、华北 (325.6 kg/kg)、西北 (314.5 kg/kg), 最后是西南 (277.8 kg/kg) (图 8b); 钾素偏生产力其大小顺序分别为东北、西北、华北、西南、长江中下游和东南, 其对应的值分别为 361.5、281.6、185.8、159.1、149.4 和 118.0 kg/kg (图 8c)。

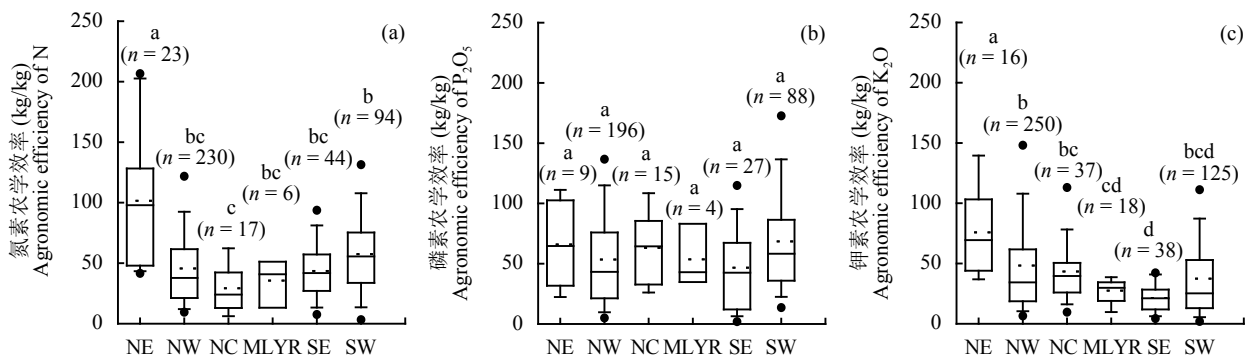


图 7 马铃薯产区 OPT 处理氮、磷、钾素农学效率

Fig. 7 Agronomic efficiency of applied N, P_2O_5 and K_2O in the OPT in different potato-producing regions of China

[注 (Note): NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest. 中间实线和虚线分别代表中值和均值, 方框上下边缘分别代表上下 25%, 上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值, 实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数, 括号中数字为样本数, 不同字母表示差异达 5% 显著水平 The solid and dashed lines indicate median and mean, respectively, the box boundaries indicate the upper and lower quartiles, the whisker caps indicate 90th and 10th percentiles, and the circles indicate the 95th and 5th percentiles. Figures in parenthesis are the total number of samples. Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

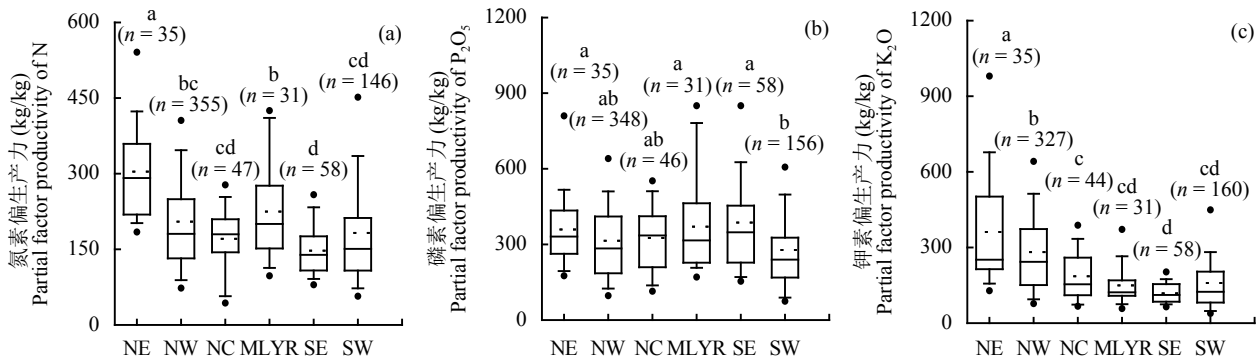


图 8 马铃薯产区 OPT 处理氮、磷、钾素偏生产力

Fig. 8 Partial factor productivity of applied N, P_2O_5 and K_2O in the OPT in different potato-producing regions of China

[注 (Note): NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest. 中间实线和虚线分别代表中值和均值, 方框上下边缘分别代表上下 25%, 上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值, 实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数, 括号中数字为样本数, 不同字母表示差异达 5% 显著水平 The solid and dashed lines indicate median and mean, respectively, the box boundaries indicate the upper and lower quartiles, the whisker caps indicate 90th and 10th percentiles, and the circles indicate the 95th and 5th percentiles. Figures in parenthesis are the total number of samples. Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

OPT 处理养分回收率结果显示 (图 9), 我国马铃薯产区氮、磷和钾养分回收率分别为 36.4% (6.1%~85.6%)、18.5% (0.7%~56.9%) 和 27.4% (2.8%~71.1%), 氮素养分回收率大小顺序分别为华北、东北、西北、西南、长江中下游和东南, 其对应的氮素回收率分别为 46.2%、44.6%、35.7%、33.4%、29.4% 和 29.2% (图 9a); 磷素养分回收率大小顺序为东南、长江中下游、西南、华北、西北和东北, 其对应的磷素养分回收率平均值分别为 33.8%、18.9%、15.8%、15.8%、14.6% 和 10.1% (图 9b), 华北因缺少数据, 无法进行统计分析; 钾素养分回收率大小顺序为西北、东南、西南、华北、长江中下游和东北, 其对应的钾素养分回收率分别为 38.5%、37.9%、34.5%、28.7%、20.2% 和 4.8% (图 9c), 东北地区因缺少数据, 也没有进行显著性分析。

3 讨论

3.1 马铃薯产量与产量反应

作物产量潜力主要受不同水热条件影响, 不同区域土壤类型、作物品种和不同养分管理措施也影响产量潜力的发挥^[7, 49-50]。本研究表明, 我国马铃薯 OPT 处理可获得产量平均为 29.4 t/hm², 高于 FAO(2000—2014) 统计的我国马铃薯平均单产 15.2 t/hm²^[51], 主要原因在于本研究产量数据均来自于田间试验优化施肥处理。可见, 通过采用优化的养分管理措施能够在农民习惯措施基础上进一步提高马

铃薯产量^[31, 52]。我国不同马铃薯种植区可获得产量也存在一定差异, 如东北马铃薯平均产量显著高于其他地区, 长江中下游地区产量最低, 这与前人研究结果一致^[53]。东北马铃薯产量高的原因主要在于较高的昼夜温差和较长的生育期有利于马铃薯干物质形成, 还有较高的机械化生产水平有利于新技术的采用^[1-2, 54], 而长江中下游则可能与昼夜温差小、生长周期短有关, 此外不同栽培品种和采用的种植技术和轮作体系也影响马铃薯产量潜力的发挥^[7, 55-56]。

产量反应的高低反映施肥增产效应和养分对产量的限制作用^[17-18], 不同地区作物施肥增产的差异与气候条件、土壤类型、土壤质地、施肥水平和栽培管理措施等因素有关^[19-20, 57-58]。我国马铃薯产量反应平均值大小顺序为氮>磷>钾, 表明氮素是马铃薯产量的首要限制因子, 这与已有的研究结果一致^[18, 59]。研究表明, 产量反应与相对产量呈现负线性相关关系^[21-22]。本研究东北地区施用氮、磷、钾的产量反应最大, 华北的施氮产量反应、东南的施磷产量反应和西北的施钾产量反应较低, 这与较低的东北氮素相对产量、较高的华北氮素相对产量、较高的东南磷素相对产量和西北钾素相对产量是一致的。产量反应或者相对产量也与施肥量、土壤母质和养分状况关系密切, 如东北的氮素产量反应大于东南, 与东北的施氮量低于东南地区有关, 而西北较低的施钾产量反应和较高的钾素相对产量与土壤含有较高的含钾矿物有关^[26]。地区的经济水平^[60-61]和

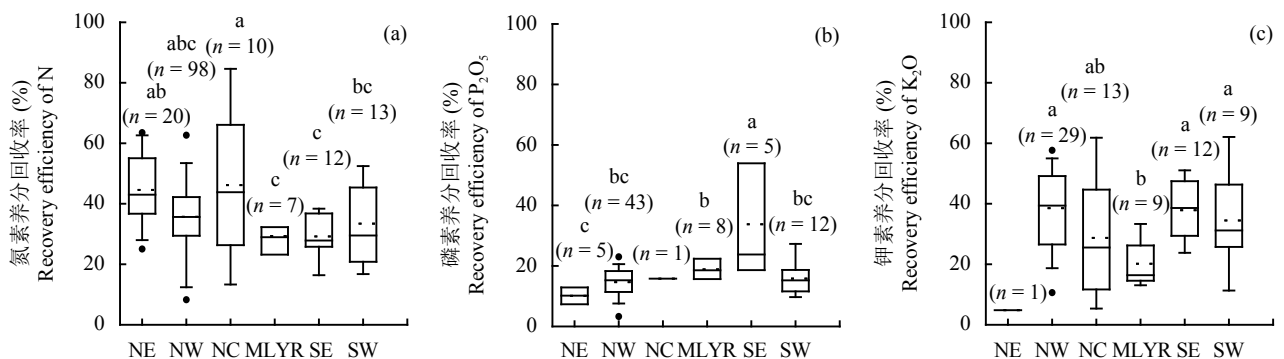


图 9 马铃薯产区 OPT 处理氮、磷、钾素养分回收率

Fig. 9 Recovery efficiency of applied N, P₂O₅ and K₂O in the OPT in different potato-producing regions of China

[注 (Note): NE—东北 Northeast; NW—西北 Northwest; NC—华北 Northcentral; MLYR—长江中下游 Middle and lower reaches of Yangtze River; SE—东南 Southeast; SW—西南 Southwest. 中间实线和虚线分别代表中值和均值, 方框上下边缘分别代表上下 25%, 上下帽子分别代表 90% 和 10% 的数值, 实心圆圈分别代表 95% 和 5% 的数, 括号中数字为样本数, 不同字母表示差异达 5% 显著水平; 华北地区磷素养分回收率样本数为 1, 东北地区钾素养分回收率样本数为 1, 未进行显著性分析。The solid and dashed lines indicate median and mean, respectively, the box boundaries indicate the upper and lower quartiles, the whisker caps indicate 90th and 10th percentiles, and the circles indicate the 95th and 5th percentiles. Figures in parenthesis are the total number of samples. Different letters above the bars mean significant at 5% level. The number of observations of recovery efficiency of P in NC is only one, the same for the number of observations of recovery efficiency of K in NE, and without significant analysis.]

马铃薯种植模式^[57, 62]也影响马铃薯施肥量和施肥产量反应, 如东南地区马铃薯经济效益较高^[58], 为追求马铃薯更大的经济效益, 农户通常增加施肥量, 因此该区施氮、磷、钾的产量反应总体较低。

3.2 马铃薯肥料利用率

农学效率、偏生产力和养分回收率是表达肥料利用率的常用指标, 其与产量、施肥量和土壤肥力水平关系最为密切^[32, 63]。本文研究结果表明, 较高的东北地区氮素农学效率、偏生产力和养分回收率与东北较低的施氮量和较低的相对产量(代表较低的土壤肥力)有关, 而东南地区较低的氮素农学效率、偏生产力和养分回收率与其较高的施氮量和较高的相对产量有关。此外, 肥料利用率还与该地区土壤条件、水分条件、轮作体系和栽培措施等影响产量潜力和养分吸收的因素有关^[3, 7, 64-65]。

4 结论

我国马铃薯氮、磷和钾产量反应平均分别为 8.6、5.9 和 6.6 t/hm², 氮素是我国马铃薯产量的首要限制因子, 东北地区产量和施氮产量反应显著高于其它地区。马铃薯施氮相对产量以华北地区最高, 施磷相对产量以东南地区最高, 施钾相对产量以西北地区最高。OPT 处理下马铃薯氮、磷和钾施用量平均分别为 N 164.2 kg/hm²、P₂O₅ 100.3 kg/hm² 和 K₂O 188.0 kg/hm², 东南地区氮和钾施肥量显著高于其他地区, 东北地区施氮量和施钾量较低, 东北、西南和西北施磷量高于其他地区, 长江中下游施磷量最低。马铃薯氮、磷、钾素养分利用率与产量和施肥量关系密切, 东北地区因其较低的氮、钾施肥量和较高的产量以及较高的产量反应获得了较高的氮、钾农学效率和偏生产力。东南地区因其较高的氮、钾用量而导致其较低的氮素农学效率和偏生产力以及较低的钾素农学效率和偏生产力。钾素养分回收率规律不明显, 可能与养分吸收数据量较小有关。基于马铃薯种植区的产量、施肥量和肥料利用率特征参数, 可以有针对性地开展马铃薯分区养分管理。

参考文献:

[1] 刘洋, 高明杰, 何威明, 等. 世界马铃薯生产发展基本态势及特点[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(20): 78-86.
Liu Y, Gao M J, He W M, *et al.* Analysis on the basic trend and characteristics of world potatoes production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(20): 78-86.

[2] 杨帅, 闵凡祥, 高云飞, 等. 新世纪中国马铃薯产业发展现状及存在问题[J]. *中国马铃薯*, 2014, 28(5): 311-316.

Yang S, Min F X, Gao Y F, *et al.* Status quo and challenges of China potato industry of the 21st century[J]. *Chinese Potato Journal*, 2014, 28(5): 311-316.

[3] Alva A, Fan M S, Qing C, *et al.* Improving nutrient-use efficiency in Chinese potato production experiences from the United States[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2011, 25(1): 46-85.

[4] Sandaña P, Kalazich J. Ecophysiological determinants of tuber yield as affected by potato genotype and phosphorus availability[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 21-28.

[5] Ciampitti I A, Vyn T J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review[J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 48-67.

[6] Geary B, Clark J, Hopkins B G, *et al.* Deficient, adequate and excess nitrogen levels established in hydroponics for biotic and abiotic stress-interaction studies in potato[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 38(1): 41-50.

[7] Haverkort A J, Struik P C. Yield levels of potato crops: recent achievements and future prospects[J]. *Field Crops Research*, 2015, 182: 76-85.

[8] 陈杨, 樊明寿, 康文钦, 等. 内蒙古阴山丘陵地区马铃薯施肥现状与评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, (2): 104-108.
Chen Y, Fan M S, Kang W Q, *et al.* Evaluation and present situation of fertilization for potato in hilly country of Yinshan in Inner Mongolia[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (2): 104-108.

[9] 张朝春, 江荣风, 张福锁, 等. 氮磷钾肥对马铃薯营养状况及块茎产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(9): 279-283.
Zhang C C, Jiang R F, Zhang F S, *et al.* Effect of different N, P₂O₅, K₂O fertilization rate and ratio on nutrient status and tuber yield of potato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(9): 279-283.

[10] 刘润梅, 范茂攀, 付云章, 等. 云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 753-760.
Liu R M, Fan M P, Fu Y Z, *et al.* Relationship between fertilization rate and fertilizer partial factor productivity in potato production in Yunnan province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 753-760.

[11] 井涛, 樊明寿, 周登博, 等. 滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 654-661.
Jing T, Fan M S, Zhou D B, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on potato tuber yield, N uptake and soil NO₃⁻-N accumulation under plastic mulching with drip irrigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 654-661.

[12] 王小英, 同延安, 刘芬, 等. 陕西省马铃薯施肥现状评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 471-479.
Wang X Y, Tong Y A, Liu F, *et al.* Comments on the situation of fertilization on potato in Shaanxi province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 471-479.

[13] Xu X P, Liu X Y, He P, *et al.* Yield gap, indigenous nutrient supply and nutrient use efficiency for maize in China[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(10): e0140767.

[14] 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.

[15] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, *et al.* Regional distribution of nitrogen fertilizer use and N-saving potential for improvement of

- food production and nitrogen use efficiency in China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(11): 2013–2023.
- [16] Fernandes A M, Soratto R P. Response of potato cultivars to phosphate fertilization in tropical soils with different phosphorus availabilities[J]. *Potato Research*, 2016, 59(3): 259–278.
- [17] Xu X P, He P, Zhao S C, *et al.* Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 186: 58–65.
- [18] 李书田, 段玉, 陈占全, 等. 西北地区马铃薯施肥效应和经济效益分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (4): 42–47.
Li S T, Duan Y, Chen Z Q, *et al.* Yield response and economic benefit of fertilizer application on potato in northwest China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (4): 42–47.
- [19] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3997–4007.
Wang W N, Lu J W, Li Y S, *et al.* Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3997–4007.
- [20] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 802–817.
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, *et al.* Basic NPK fertilizer recommendation and fertilization formula for maize production regions in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 802–817.
- [21] Xu X P, He P, Pampolino M F, *et al.* Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 27–34.
- [22] Chuan L M, He P, Pampolino M F, *et al.* Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 140: 1–8.
- [23] Zhang R F, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Fertilization and nitrogen balance in a wheat–maize rotation system in North China[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 938–945.
- [24] He P, Yang L P, Xu X P, *et al.* Temporal and spatial variation of soil available potassium in China(1990–2012)[J]. *Field Crops Research*, 2015, 173: 49–56.
- [25] Xie J C, Zhou J M. History and prospects of potash application in China[J]. IPI 60 Anniversary Issue, 2012, 32: 19–27.
- [26] Li S T, Duan Y, Guo T W, *et al.* Potassium management in potato production in Northwest region of China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 174: 48–54.
- [27] Tan D S, Jin J Y, Jiang L H, *et al.* Potassium assessment of grain producing soils in North China[J]. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 2012, 148: 65–71.
- [28] Liu X Y, He P, Jin J Y, *et al.* Yield gaps, indigenous nutrient supply, and nutrient use efficiency of wheat in China[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(5): 1452.
- [29] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(3): 336–342.
Gong W, Yan X Y, Wang J Y. Effect of long-term fertilization on soil fertility[J]. *Soils*, 2011, 43(3): 336–342.
- [30] Li S T, He P, Jin J Y. Nitrogen use efficiency in grain production and the estimated nitrogen input/output balance in China agriculture[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(5): 1191–1197.
- [31] Zhang W F, Cao G X, Li X L, *et al.* Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 671.
- [32] Qiu S J, He P, Zhao S C, *et al.* Impact of nitrogen rate on maize yield and nitrogen use efficiencies in Northeast China[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 305.
- [33] 段玉, 张君, 李焕春, 等. 马铃薯氮磷钾养分吸收规律及施肥肥效的研究[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 212–217.
Duan Y, Zhang J, Li H C, *et al.* Fertilization effect and nutrition use efficiency of potato in Inner Mongolia[J]. *Soils*, 2014, 46(2): 212–217.
- [34] 邢海峰, 石晓华, 杨海鹰, 等. 磷肥分次滴灌施用提高马铃薯群体磷素吸收及磷利用率的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 987–992.
Xing H F, Shi X H, Yang H Y, *et al.* Increase effect of phosphorus absorption of potato population and utilization efficiency by multiple application of phosphate fertilizer with drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 987–992.
- [35] Chuan L M, He P, Zhao T K, *et al.* Agronomic characteristics related to grain yield and nutrient use efficiency for wheat production in China[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(9): e0162802.
- [36] 滕宗瑶, 张畅, 王永智. 我国马铃薯适宜种植地区的分析[J]. *中国农业科学*, 1989, 22(2): 35–44.
Teng Z F, Zhang C, Wang Y Z. Study on China's potato-cultivation divisions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(2): 35–44.
- [37] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [38] 谷浏涟, 孙磊, 石瑛, 等. 氮肥施用时期对马铃薯干物质积累转运及产量的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 610–615.
Gu L L, Sun L, Shi Y, *et al.* Effects of nitrogen application time on dry matter accumulation and translocation and tuber yield of potato[J]. *Soils*, 2013, 45(4): 610–615.
- [39] 周芳, 张振洲, 贾景丽, 等. 不同钾肥品种及用量对马铃薯产量和品质的影响[J]. *中国马铃薯*, 2013, 27(3): 158–161.
Zhou F, Zhang Z Z, Jia J L, *et al.* Effects of different sources and rates of potassium fertilizer on potato yield and quality[J]. *Chinese Potato Journal*, 2013, 27(3): 158–161.
- [40] 王涛, 何进智, 何文寿. 不同施肥处理对马铃薯产量和营养品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(10): 2416–2421.
Wang T, He J Z, He W S, *et al.* Effects of different fertilization treatments on yield and nutritional quality of potato[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(10): 2416–2421.
- [41] 高翔. 控释型氮肥和钾肥对马铃薯生长和土壤肥力影响[D]. 济南: 山东农业大学硕士学位论文, 2014.
Gao X. Effects of controlled release urea and potassium fertilizers on growth of potato and soil fertility [D]. Jinan: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2014.
- [42] 霍晓兰, 姬青云, 滑小赞, 孟全业. 氮、磷、钾肥不同用量对马铃薯产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2011, 39(10): 1064–1066.
Huo X L, Jin Q Y, Hua X Z, Meng Q Y. Effects of different amount of N, P and K applications on yield of potato[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(10): 1064–1066.
- [43] 张炜, 杨德桦, 黄小箐, 等. 氮肥用量对襄阳地区马铃薯产量、品质和经济效益的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (1): 72–76.
Zhang W, Yang D H, Huang X Q, *et al.* Effect of nitrogen rate on the yield, quality and economic benefit of potato in Xiangyang city[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (1): 72–76.

- [44] 陈功楷, 权伟, 朱建军. 不同钾肥量与密度对马铃薯产量及商品率的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 166–169.
Chen G K, Quan W, Zhu J J. Effects of potassium rates and planting density on potato yield and commodity rate[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(6): 166–169.
- [45] 黄承彪, 钟灼仔, 谢立华. 福建霞浦县马铃薯“3414”肥效试验初报[J]. *亚热带农业研究*, 2012, 8(1): 13–16.
Huang C B, Zhong Z Z, Xie L H. Preliminary report on the fertilizer efficiency experiment “3414” of potato in Xiapu county, Fujian province[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2012, 8(1): 13–16.
- [46] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 不同钾肥用量对冬种马铃薯产量、品质和钾肥利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(19): 167–171.
Huang J C, Peng Z P, Yu J H, *et al.* Effects of potassium application rate on yield, quality and potassium efficiency of winter potato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(19): 167–171.
- [47] 丁丽, 胡庆文, 余世洪. 菜用脱毒马铃薯肥料效应试验[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(8): 1548–1552.
Ding L, Hu Q W, Yu S H. Fertilizer effect on virus-free vegetable potato[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(8): 1548–1552.
- [48] 赵欢, 苟久兰, 肖厚军, 等. 不同钾肥及其施用对贵州一熟区马铃薯生产性状与肥料利用率的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(7): 1644–1648.
Zhao H, Gou J L, Xiao H J, *et al.* Effects of different potassium fertilizer and application pattern on production traits of potato and utilization rate of fertilizer in single cropping region of Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(7): 1644–1648.
- [49] Fernandes A M, Soratto R P, Pilon C. Soil phosphorus increases dry matter and nutrient accumulation and allocation in potato cultivars[J]. *American Journal of Potato Research*, 2015, 92(1): 117–127.
- [50] Rens L R, Zotarelli L, Rowland D L, *et al.* Optimizing nitrogen fertilizer rates and time of application for potatoes under seepage irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 49–58.
- [51] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT [DB/OL]. <http://faostat3.fao.org/home/E>, 2015–5.
- [52] Yang F Q, Xu X P, Wang W, *et al.* Estimating nutrient uptake requirements for soybean using QUEFTS model in China[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(5): e0177509.
- [53] 钟鑫, 蒋和平, 张忠明. 我国马铃薯主产区比较优势及发展趋势研究[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(2): 1–8.
Zhong X, Jiang H P, Zhang Z M. Studies on comparative advantage and developing tendency of major potato producing areas in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(2): 1–8.
- [54] 杨雅伦, 郭燕枝, 孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(1): 29–36.
Yang Y L, Guo Y Z, Sun J M. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 29–36.
- [55] 秦鱼生, 涂仕华, 冯文强, 等. 氮、钾营养对不同品种马铃薯产量和品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(2): 571–576.
Qin Y S, Tu S H, Feng W Q, *et al.* Effect of nitrogen and potassium combinations on potato yield and quality of different varieties[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(2): 571–576.
- [56] Tein B, Kauer K, Eremeev V, *et al.* Farming systems affect potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber and soil quality[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156(2): 1–11.
- [57] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(7): 1274–1285.
Liu X, Zhang S L, Liu G F. Effects of continuous cropping on dry matter accumulation and distribution of potato plants in the Yellow River irrigation areas of middle Gansu Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1274–1285.
- [58] 杨亚东, 胡韵菲, 栗欣如, 等. 中国马铃薯种植空间格局演变及其驱动因素分析[J]. *农业技术经济*, 2017, (8): 39–47.
Yang Y D, Hun Y F, Su X R, *et al.* Study on spatial evolution and contributing factors of regional potato production structure in China[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017, (8): 39–47.
- [59] 陈庆瑞, 赵秉强, 等. 四川省作物专用复混肥料农艺配方[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
Chen Q R, Zhao B Q, *et al.* Agronomic formula for crop-specialized compound and mixed fertilizer in Sichuan province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [60] 汪翔, 张锋. 中国农业化肥投入现状与地区差异性分析[J]. *江西农业学报*, 2011, 23(12): 169–173.
Wang X, Zhang F. Analysis on present situation and regional disparity of agricultural chemical fertilizer input in China[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23(12): 169–173.
- [61] 蔡承智. 我国农作制特征及县域实证分析[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2005.
Cai C Z. Characteristic analyses of Chinese farming systems and case study at county level [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2005.
- [62] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 杨光立. 不同种植模式对南方丘陵旱地土壤水分利用与作物周年生产力的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(18): 3606–3617.
Tang W G, Xiao X P, Tang H M, Yang G L. Effects of different planting patterns on water use of soil and crops annual productivity in southern hilly dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3606–3617.
- [63] 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.
- [64] 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3177–3188.
Yang X G, Li Y, Dai S W, *et al.* Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change IX: Spatiotemporal change characteristics of China agricultural climate resources[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3177–3188.
- [65] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 154–157.
Zhang F S, Ma W Q. The relationship between fertilizer input level and nutrient use efficiency[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2): 154–157.