

内蒙古马铃薯施肥效应特征参数与施肥推荐

段玉^{1*}, 张君¹, 张三粉¹, 景宇鹏¹, 王博¹, 莎娜¹, 栗艳芳¹, 李书田^{2,3}

(1. 内蒙古农牧业科学院资源环境与检测技术研究所, 内蒙古 呼和浩特 010031;

2. 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 马铃薯是内蒙古的主要作物之一, 目前生产上由于没有合适的推荐施肥方法, 过量施肥现象严重, 研究明确马铃薯施用氮磷钾肥的产量反应与农学效率等推荐施肥参数, 构建适宜的推荐施肥方法具有重要意义。在内蒙古马铃薯主产区, 采用多年多点田间试验方法结合室内分析, 研究了马铃薯施用氮磷钾肥的产量反应、农学效率、养分利用率, 探索养分吸收与农学效率及产量反应与农学效率的相关关系, 构建基于土壤养分丰缺指标、土壤养分含量和相对产量的最佳施肥推荐。结果表明, 施用N、P、K肥的产量反应(YR_N 、 YR_P 和 YR_K)分别为4.2、3.6和2.7 t/hm², 农学效率(AE_N 、 AE_P 和 AE_K)分别为27.5、46.6和29.3 kg/kg。施用氮磷钾肥的产量反应与缺素区的相对产量、产量反应和农学效率之间均呈显著的相关关系, 可以采用基于马铃薯产量反应和农学效率的推荐施肥方法进行马铃薯的氮磷钾肥推荐。生产1 t马铃薯吸收N、P₂O₅和K₂O分别为5.6、1.5和6.1 kg/t, 由此参数可确定一定马铃薯产量下的养分吸收量。土壤速效磷、钾含量(x)和缺磷、缺钾区相对产量(y)之间有显著的线性相关关系, 依据这一相关关系可以确定内蒙古马铃薯生产的土壤有效磷和土壤交换性钾的养分丰缺指标, 可以采用目标产量养分吸收量与养分丰缺指标指导测土推荐施肥。因此研究明确了内蒙古马铃薯主产区施用氮磷钾肥的产量反应和农学效率等推荐施肥的相关参数, 建立了基于产量反应与农学效率进行马铃薯氮磷钾养分施肥的推荐方法。

关键词: 马铃薯; 氮磷钾肥; 产量反应; 农学效率; 施肥推荐

Characteristic Parameters of Fertilization Effect and Fertilization Recommendation on Potato in Inner Mongolia

DUAN Yu^{1*}, ZHANG Jun¹, ZHANG Sanfen¹, JING Yupeng¹, WANG Bo¹, SHA Na¹, LI Yanfang¹, LI Shutian^{2,3}

(1. Institute of Resources and Environment and Testing Technology, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences,

Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 2. International Plant Nutrition Institute Beijing Office, Beijing 100081, China;

3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Potato is one of the major crops in Inner Mongolia. However, there is no suitable fertilization recommendation method currently for growing better potato. The problem of over and imbalance fertilization is serious. It is of great significance to study yield response and agronomic efficiencies of N, P and K fertilizers in potato, thus to establish an applicable recommended fertilization method. By multi-years and multi-sites field experiments and laboratory analysis in the major potato producing area of Inner Mongolia, the study quantified potato yield responses, agronomic efficiency, and nutrient use efficiencies of N, P and K fertilizers, and explored the relationship between nutrient uptake and agronomic efficiency, and

收稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200100); 国际植物营养研究所(IPNI)资助项目。

作者简介: 段玉(1963-), 男, 研究员, 长期从事植物营养与施肥研究。

*通信作者(Corresponding author): 段玉, E-mail: duanyu63@aliyun.com。

between yield responses and agronomic efficiency. The optimal fertilization was therefore recommended based on soil nutrient abundant deficiency index, soil nutrient content and relative yield. The results showed that the yield response for N (YR_N), P (YR_P) and K (YR_K) was 4.2, 3.6 and 2.7 t/ha, respectively. The agronomy use efficiency of N (AE_N), P (AE_P) and K (AE_K) was 27.5, 46.6 and 29.3 kg/kg, respectively. Yield responses under applying N, P and K fertilizers was significantly correlated with the relative yields without N, P and K. Yield response of NPK fertilization was also positively correlated with agronomic nutrient use efficiency. Recommendation fertilization based on yield response and agronomic nutrient efficiencies therefore could be given. The nutrient uptake requirement for producing unit yield was 5.6 kg/t for N, 1.5 kg/t for P_2O_5 and 6.1 kg/t for K_2O . Both soil available phosphorus and potassium contents were linearly correlated with relative yields under no P or K application treatment. According to these relationships, the nutrient abundance, the deficiency index of soil available phosphorus and soil exchangeable potassium for potato in Inner Mongolia were determined. The target yield nutrient uptake requirement, the nutrient abundance and the deficiency index could be used to optimize potato fertilization. Based on the quantitative results of yield responses and agronomic nutrient use efficiencies for N, P and K fertilizers in the study, a recommended method for N, P and K fertilization was established for the major potato producing areas in Inner Mongolia.

Key Words: potato; NPK fertilizer; yield response; agronomic efficiency; fertilization recommendation

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)营养价值较高, 容易栽培, 产量亦高, 种植广泛, 是世界上仅次于稻、麦、玉米的第四大粮食作物。中国是世界上最大的马铃薯生产国, 2010~2014年马铃薯播种面积平均为547万 hm^2 , 总产达9 081万t, 占世界总产量的25%左右^[1]。内蒙古自治区具有独特的种植马铃薯区位优势和产品优势, 是中国马铃薯主产区之一, 2010~2014年全区马铃薯播种面积平均64.5万 hm^2 , 占全区播种面积的12%, 总产占全国总产量的10%^[2]。中国马铃薯总产量偏低, 其主要原因之一是肥料养分施用与作物需求不匹配, 养分投入不平衡。内蒙古马铃薯主产区氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)投入量分别为150~750, 75~375和0~750 kg/ hm^2 。宁夏南部山区旱地马铃薯氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)投入量分别为249, 95和60 kg/ hm^2 。陕西省马铃薯化肥氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)投入量分别为155, 78和13 kg/ hm^2 ^[3~5]。整体来看, 中国马铃薯氮磷投入量偏高, 钾素投入严重不足, 化肥施用不尽合理, 简单易行的推荐施肥技术与推广势在必行。科学合理施肥是马铃薯增产增收的物质基础, 每生产1 000 kg马铃薯块茎吸收N, P_2O_5 , K_2O 的量变化范围较大, 频率分析发现, 需N多集中在3.0~6.0 kg, P_2O_5 集中在1.0~1.5 kg, K_2O 在

4.0~8.0 kg^[6~10]。马铃薯根系浅, 养分吸收面积小, 多种植在质地较粗的土壤上, 使得马铃薯的养分管理更加困难。国内外学者开展了大量针对氮磷钾合理施肥对马铃薯产量影响的研究, 但由于种植方式、品种、土壤、施肥方式、施肥量等不同, 获得的最高产量的推荐施肥差异较大, 推荐用量N 60~350 kg/ hm^2 、 P_2O_5 30~200 kg/ hm^2 、 K_2O 45~375 kg/ hm^2 ^[11~19]。这些研究主要采用肥料效应函数法, 只能针对一定区域或一定的土壤养分范围, 不宜大面积应用。另一种马铃薯推荐施肥方法是依据土壤供肥能力、养分损失率和栽培品种的生产潜力等来确定施肥量^[20~22], 虽然这一方法可有效地用于指导施肥, 但测试土壤的氮磷钾的临界水平难以确定, 且难以及时测定进行大面积推广应用, 特别是氮肥用量与土测值没有多少相关性。基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法是一种简单易于掌握的作物增产增收、提高肥料利用率和保护环境的新方法, 不需要取土测试, 已在小麦和玉米上进行了大面积应用^[23~28]。但马铃薯施用氮磷钾肥的产量反应和农学效率以及二者之间的相互关系, 基于产量反应与农学效率的马铃薯推荐施肥方法等相关研究未见报道。本研究以内蒙古马铃薯主产区为研究区域, 采用多年多点试验, 研究马铃薯施用氮磷钾养分的产

量反应、农学效率以及产量反应与农学效率的相关关系,建立基于产量反应与农学效率的马铃薯氮磷钾养分推荐方法,确定内蒙古马铃薯生产中氮磷钾肥的适宜推荐用量范围,这对于指导区域作物科学施肥具有重要的理论与实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2002~2014年在内蒙古马铃薯主产区的武川县(62项次)、察右中旗(20项次)和固阳县(34项次)的不同试验地块共进行116项次试验。试验地土壤为栗钙土,砂壤,每个试验播前取0~20 cm耕层土样分析,土壤养分状况和养分施用量见表1。

1.2 试验设计

试验设4个处理:即NPK, PK, NK, NP。
(1)NPK: N、P、K化肥配合施用的最优施肥处

理,由中国农业科学院-加拿大国际植物营养研究所联合实验室推荐^[29,30]。最优施肥处理的推荐用量为N 45~300 kg/hm², P₂O₅ 30~150 kg/hm², K₂O 30~225 kg/hm², 平均N:P₂O₅:K₂O = 172.3:75.2:94.2 kg/hm²(表1)。(2)PK: 不施氮肥处理。(3)NK: 不施磷肥处理。(4)NP: 不施钾肥处理。每个处理3次重复,随机区组设计,小区面积30 m²。在总的116项次试验中,布置全肥区(NPK)、不施氮肥(PK)、不施磷肥(NK)和不施钾肥(NP)的4个处理试验有62项次,设置全肥区(NPK)和不施钾肥(NP)试验有54项次。

供试马铃薯品种为‘克新1号’一级种薯。试验用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 46%),钾肥为氯化钾(K₂O 60%),磷钾肥全部作种肥一次基施,氮肥40%基施,60%在开花期追施。田间管理同一般生产田。

表1 供试土壤养分状况与施肥量

Table 1 Properties of tested soils and nutrients applied in trials

项目 Item	有机质 (g/kg) Organic matter	矿质氮 (mg/kg) Mineral N	有效磷 (mg/kg) Available P	交换性钾 (mg/kg) Exchangeable K	pH (1:2.5)	施氮量(kg/hm ²) N application (kg/ha)	施磷量(kg/hm ²) P ₂ O ₅ application (kg/ha)	施钾量(kg/hm ²) K ₂ O application (kg/ha)
最小值 Min	3.3	23.0	4.6	59.0	7.7	45.0	30.0	30.0
最大值 Max	38.3	152.0	30.9	325.0	8.9	300.0	150.0	225.0
平均值 Mean	15.7	68.5	9.5	117.0	8.2	172.3	75.2	94.2
标准差 SD	7.41	26.72	4.37	50.02	0.24	48.58	22.92	37.63

1.3 测定方法

收获时各小区分别收获记产,每小区随机取样3株,测定茎、叶和块茎的鲜重,切碎后80℃烘干测定茎、叶和块茎干物质重,混匀后粉碎,过2 mm筛备用。植株样品用H₂SO₄-H₂O₂消解后,全氮用凯氏定氮法,全磷用钒钼黄比色法,全钾用火焰光度法测定^[31]。

有关计算公式:

某元素的相对产量(RY)(%) = 缺该元素区产量/全肥区产量 × 100, $RY(\%) = Y_0/Y \times 100$

某养分元素的产量反应(YR)(t/hm²) = 全肥区产量 - 缺该元素区产量, $YR(t/hm^2) = Y - Y_0$

某养分元素的农学效率(AE)(kg/kg) = (全肥区产

量 - 缺该养分区产量)/该养分施入量, $AE(kg/kg) = (Y - Y_0)/F$

某养分元素的利用率(NUE)(%) = (全肥区该元素吸收量 - 缺该元素区养分吸收量)/全肥区该元素养分用量 × 100, $NUE(\%) = (NU - NU_0)/F \times 100$

某养分元素的吸收比率(NR)(kg/t) = 全肥区该元素吸收量/全肥区产量, $NR(kg/t) = NU/Y$

1.4 统计分析

缺素区的相对产量、施肥的产量反应和农学效率、NPK养分的养分利用率和NPK养分的吸收比率的频率分布图和统计表使用SPSS 20软件。

分别用对数曲线模型来描述产量反应与相对产量和产量反应与农艺效率之间的关系。用对数

曲线模型来描述土壤速效养分含量与缺素区相对产量之间的关系。回归方程的系数值和 R^2 测定值由 Microsoft Excel 2010 计算。

2 结果与分析

2.1 缺氮磷钾区的相对产量

2002~2014年进行的116项次马铃薯田间试验结果表明(表2), NPK处理的产量为5.3~60.2 t/hm², 平均22.4 t/hm²; PK处理的产量为4.2~51.2 t/hm², 平均18.9 t/hm²; NK处理的产量为4.4~51.4 t/hm², 平均19.5 t/hm²; NP处理的产量为4.9~55.5 t/hm², 平均19.7 t/hm²。马铃薯缺素区的相对产量(不施

用氮磷钾肥)反映了该元素对马铃薯产量影响的重要程度。不施氮肥的相对产量($n = 62$)为55.7%~97.3%, 平均为81.7%, 其频率分布如图1a, 出现频率较高的是75%~90%, 占72.5%。不施磷肥的相对产量($n = 62$)为61.5%~98.8%, 平均为84.5%, 其频率分布如图1b, 出现频率较高的是75%~90%, 占64.5%。不施钾肥的相对产量($n = 116$)为69.8%~99.1%, 平均为87.8%, 其频率分布如图1c, 出现频率较高的是80%~95%, 占72.4%。因此, 结合N、P、K的产量反应可以看出, 氮肥是影响马铃薯能否获得高产的主要因子, 其次是磷肥, 钾肥对产量的影响相对最小。

表2 施用NPK养分对马铃薯的相对产量的影响
Table 2 Effect of NPK nutrients on potato relative yield

项别 Item	块茎产量(t/hm ²) Tuber yield (t/ha)				相对产量(%) Relative yield (RY)		
	NPK	PK	NK	NP	RY-N	RY-P	RY-K
数量 Number	116	62	62	116	62	62	116
平均 Mean	22.4	18.9	19.5	19.7	81.7	84.5	87.8
标准差 SD	11.3	11.5	11.6	10.2	8.1	7.7	7.1
最小值 Min	5.3	4.2	4.4	4.9	55.7	61.5	69.8
最大值 Max	60.2	51.2	51.4	55.5	97.3	98.8	99.1
百分位数 Percentile	25	13.3	9.8	10.4	76.7	80.0	81.9
	50	20.8	16.9	16.5	81.8	83.5	89.2
	75	29.0	25.6	26.6	88.4	90.1	93.3

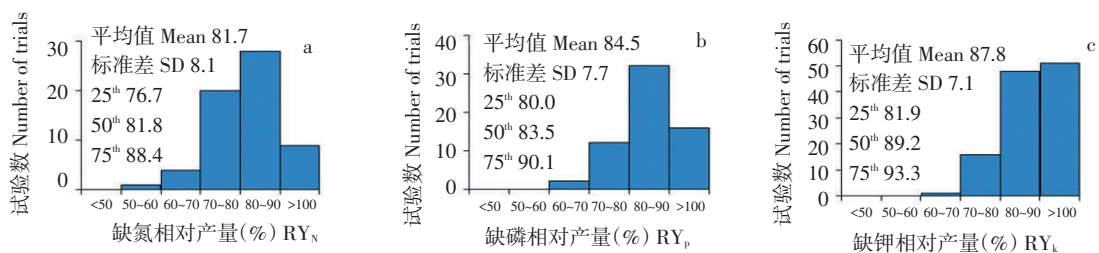


图1 不施氮磷钾肥的相对产量的频率分布

Figure 1 Frequency distribution of relative yield without NPK application compared with treatments with NPK fertilization

2.2 施用氮磷钾肥的马铃薯产量反应

施用氮磷钾肥区(NPK)与缺素区(PK, NK, NP)的产量差称为缺该元素的产量反应(表3)。氮肥的产量反应(YR_N)为0.7~12.6 t/hm², 平均为4.2 t/hm²

($n = 62$), 频率分布表明(图2a), <1 t/hm²占7%, 1~5 t/hm²占61%, >5 t/hm²占32%; 磷肥的产量反应(YR_P)为0.2~16.0 t/hm², 平均为3.6 t/hm² ($n = 62$), 频率分布表明(图2b), <1 t/hm²占9.7%, 1~

表3 施用NPK养分对马铃薯产量反应的影响

Table 3 Effect of NPK nutrients on potato yield response

项别 Item	产量反应(t/hm ²) Yield response (t/ha)		
	YR _N	YR _P	YR _K
数量 Number	62	62	116
平均 Mean	4.2	3.6	2.7
标准差 SD	3.1	3.2	2.3
最小值 Min	0.7	0.2	0.2
最大值 Max	12.6	16.0	13.0
百分位数	25	1.9	1.4
Percentile	50	2.9	2.3
	75	6.2	4.5

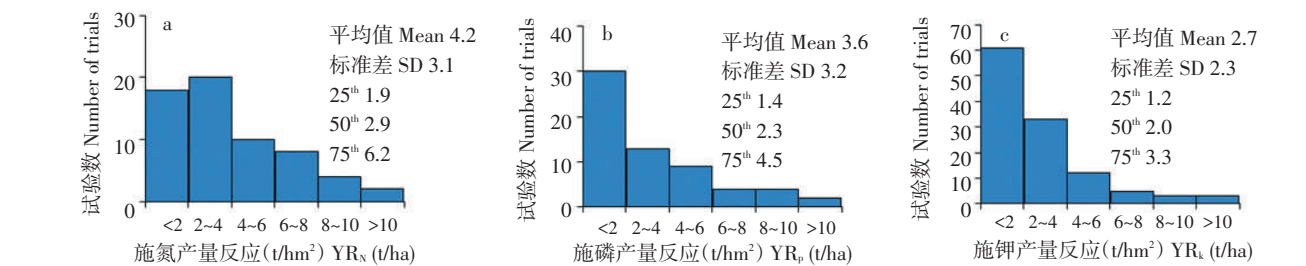


图2 施用氮磷钾肥的产量反应的频率分布

Figure 2 Frequency distribution of yield response with NPK application on potato

5 t/hm²占69.3%，>5 t/hm²占21%；钾肥的产量反应(YR_K)为0.2~13.0 t/hm²，平均为2.7 t/hm² (n = 116)，频率分布表明(图2c)，<1 t/hm²占16.4%，1~5 t/hm²占71.5%，>5 t/hm²占12.1%。由此看出，施肥的增产效果为氮肥>磷肥>钾肥。

2.3 施用氮磷钾肥的农学效率

农学效率是反映施肥肥效的重要指标之一，是推荐施肥中不可或缺的指标(表4)。结果表明施用氮肥的农学效率为每公斤N增产马铃薯块茎4.6~90.3 kg，平均为27.5 kg，频率分布表明(图

表4 施用NPK养分对马铃薯农学效率的影响

Table 4 Effect of NPK nutrients on potato agronomic efficiency (AE)

项别 Item	农学效率[Tuber kg/kg N(or P ₂ O ₅ /K ₂ O)] Agronomic efficiency (AE)		
	AE _N	AE _P	AE _K
数量 Number	62	62	116
平均 Mean	27.5	46.6	29.3
标准差 SD	18.7	32.7	20.7
最小值 Min	4.6	1.8	1.7
最大值 Max	90.3	133.3	95.0
百分位数	25	12.5	20.4
Percentile	50	26.5	38.0
	75	36.9	65.9

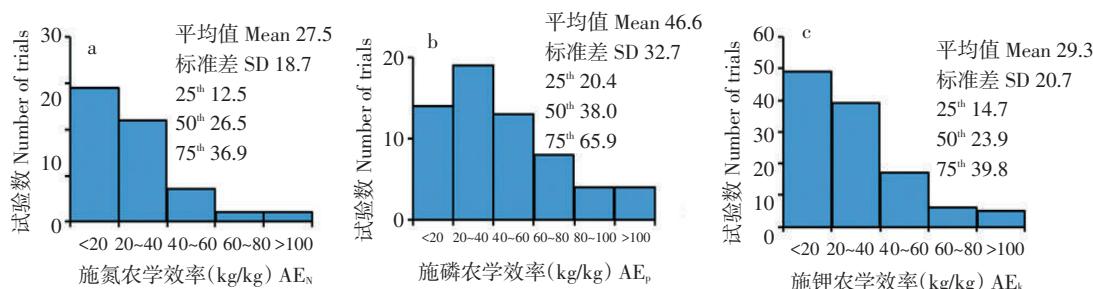


图3 施用氮磷钾肥的农学效率的频率分布

Figure 3 Frequency distributions of agronomic efficiency with NPK fertilization

3a), N的农学效率在10~40 kg占64.5%, >40 kg占16.1%, <10 kg占19.4%; 施用磷肥, 每公斤 P_2O_5 增产马铃薯块茎1.8~133.3 kg, 平均为46.6 kg, 频率分布表明(图3b), P_2O_5 的农学效率在20~70 kg占77%, >70 kg占15%, <20 kg占8%; 施用钾肥, 每公斤 K_2O 增产马铃薯块茎1.7~95.0 kg, 平均为29.3 kg, 频率分布表明(图3c), K_2O 的农学效率在15~40 kg占50%, >40 kg占24%, <15 kg占26%。说明在目前进行的肥料试验的施肥量情况下, 每公斤纯养分增产的马铃薯数量(农学效率)分别为 $P_2O_5 > K_2O > N$ 。施肥的产量反应反映了该肥料的增产潜力, 能够更好地反映产量对养分的依赖性。农学效率尽管也是反映施肥肥效的重要指标, 但受施肥量的影响, 施肥量大, 农学效率相对较小; 反之, 施肥量小, 农学效率就较大, 本文中氮

肥的农学效率较低, 磷钾肥的农学效率较高, 主要是试验中氮肥用量较大, 磷钾肥用量较小。

2.4 施用NPK肥的肥料利用率

由于各试验点的土壤肥力、施肥用量、施肥方式、管理水平等差异, 施用氮磷钾肥的肥料利用率有较大差异。施用氮肥的利用率(NUE_N , N)为15.7%~57.7%, 平均为31.8%, 频率分布表明(表5, 图4a), 20%~40%占86.5%, >40%占10.8%, <20%占2.7%; 施用磷肥的利用率(NUE_P , P_2O_5)为7.5%~20.9%, 平均为15.3%, 频率分布表明(图4b), 13%~20%占64.9%, >20%占8.1%, <13%占27.0%; 施用钾肥的利用率(NUE_K , K_2O)为10.2%~92.6%, 平均37.4%, 频率分布表明(图4c), 20%~55%占81.3%, >55%占8.8%, <20%占9.9%。

表5 施用NPK肥料对马铃薯肥料利用率和吸收量的影响

Table 5 Effect of NPK application on nutrient use efficiency (NUE) and uptake of potato

项别 Item	氮肥利用率(%) NUE_N	磷肥利用率(%) NUE_P	钾肥利用率(%) NUE_K
数量 Number	37	37	91
平均 Mean	31.8	15.3	37.4
标准差 SD	8.3	3.5	14.2
最小值 Min	15.7	7.5	10.2
最大值 Max	57.7	20.9	92.6
百分位数 Percentile	25	12.8	25.8
	50	14.6	39.1
	75	18.4	46.6

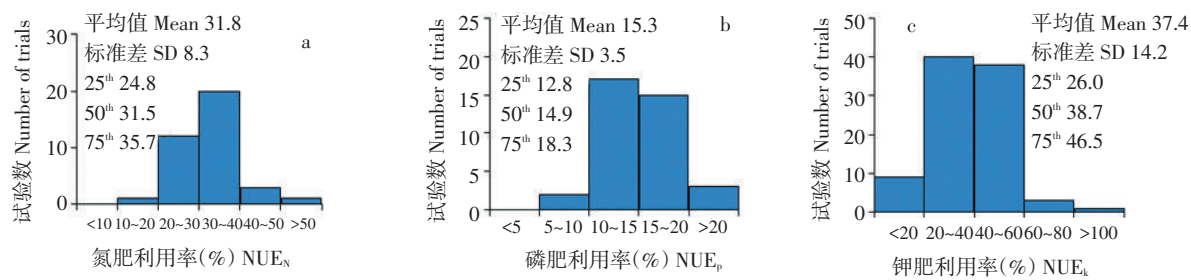


图4 马铃薯施用氮磷钾肥的肥料利用率频率分布

Figure 4 Frequency distributions of nutrient use efficiency (NUE) with NPK application

表6 施用NPK肥料对马铃薯养分吸收量的影响

Table 6 Effect of NPK application on nutrient uptake of potato

项别 Item		单位马铃薯吸收氮磷钾养分量(kg/t) Nutrient response		
		吸氮(N)量 NR _N	吸磷(P ₂ O ₅)量 NR _P	吸钾(K ₂ O)量 NR _K
数量 Number		36	36	90
平均 Mean		5.6	1.5	6.1
标准差 SD		1.4	0.4	1.9
最小值 Min		3.3	0.9	3.2
最大值 Max		8.0	2.5	13.8
百分位数 Percentile	25	4.4	1.2	4.9
	50	5.4	1.5	5.8
	75	6.9	1.7	6.8

2.5 生产1t马铃薯吸收氮磷钾养分量

每生产1 t马铃薯吸收的氮磷钾养分量(表6)由于种植方式、土壤状况、施肥方式、施肥量等不同有较大差异。每生产1 t马铃薯吸收氮素(N)为3.3~8.0 kg, 平均为5.6 kg, 频率分布表明(图5a), <4.0 kg/t 占8%, 4.0~6.0 kg/t 占62%, >6.0 kg/t 占30%; 每生产1 t马铃薯吸收P₂O₅为0.9~2.5 kg, 平均为1.5 kg/t, 频率分布表明(图5b), <1.0 kg/t 占3%, 1.0~2.0 kg/t 占83%, >2.0 kg/t 占14%; 每生产1 t马铃薯吸收K₂O为3.2~13.8 kg, 平均为6.1 kg/t, 频率分布表明(图5c), <4.0 kg/t 占4%, 4.0~8.0 kg/t 占88%, >8.0 kg/t 占8%。

2.6 产量反应与相对产量和农学效率的相互关系

从图6氮、磷、钾的产量反应与相对产量之

间的关系可以看出, 施用氮磷钾肥的产量反应(x)与缺素区的相对产量(y)呈显著或极显著的负相关关系。施用氮肥为: $y_N = -6.107\ln(x) + 88.861$, $R^2 = 0.314\ 5^*$ ($n = 62$); 施用磷肥为: $y_P = -6.058\ln(x) + 90.231$, $R^2 = 0.455\ 1^{**}$ ($n = 62$); 施用钾肥为: $y_K = -6.27\ln(x) + 91.834$, $R^2 = 0.597\ 6^{**}$ ($n = 116$)。

对于单项试验来说, 农学效率=产量反应/施肥量。对于多年多点试验, 施用氮磷钾肥的产量反应(x)和农学效率(y)之间也存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)(图7), 表明施肥的产量反应越小农学效率越低, 产量反应越大农学效率越高。施用氮肥为: $y_N = 17.94\ln(x) + 6.401$, $R^2 = 0.556\ 2^{**}$ ($n = 62$); 施用磷肥为: $y_P = 30.652\ln(x) + 17.599$,

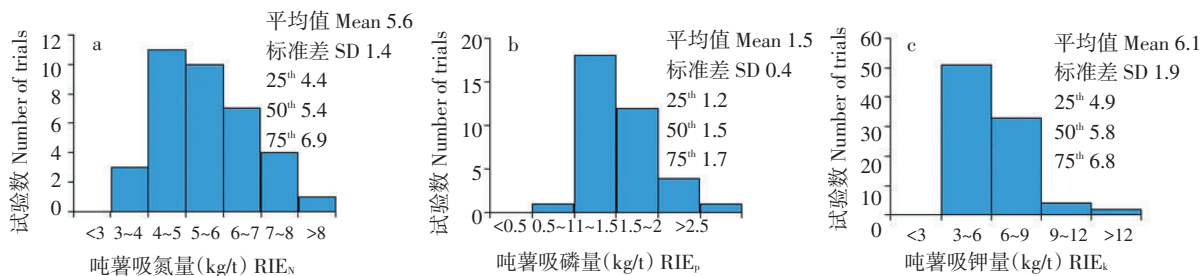


图5 马铃薯施用氮磷钾肥的养分吸收量频率分布

Figure 5 Frequency distributions of nutrient uptake with NPK application

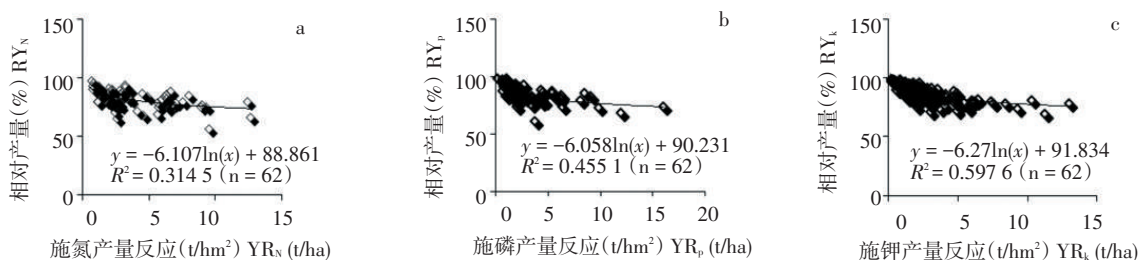


图6 产量反应与相对产量的相关关系

Figure 6 Relationship between yield response and relative yield

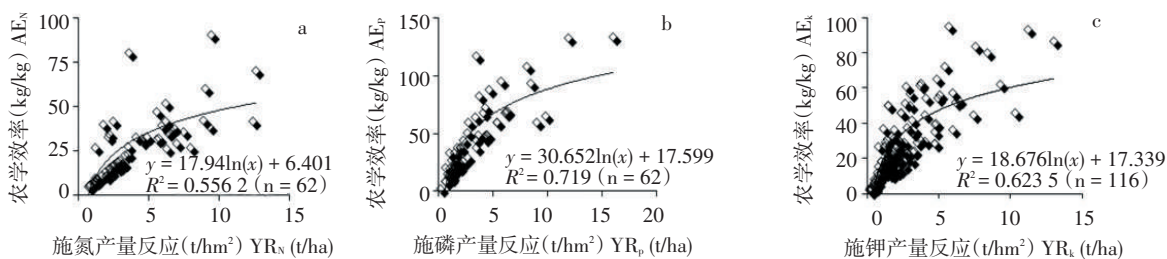


图7 产量反应与农学效率的相关关系

Figure 7 Relationship between yield response and agronomic efficiency

$R^2 = 0.719^{**}$ ($n = 62$); 施用钾肥为: $y_K = 18.676\ln(x) + 17.339$, $R^2 = 0.6235^{**}$ ($n = 116$)。

2.7 土壤磷钾养分丰缺指标

土壤测试值是评价土壤肥力的重要依据, 可以用于指导马铃薯的推荐施肥。土壤碱解氮(x)与缺氮区相对产量(y_N)之间可用对数曲线表达: $y_N = 9.9128\ln(x) + 40.652$, $R^2 = 0.2619^*$ ($n = 62$); 土壤有效磷(x)和缺磷区相对产量(y_P)之间可用对数曲线表达: $y_P = 16.417\ln(x) + 49.152$, $R^2 = 0.6361^{**}$

($n = 62$); 土壤交换性钾(x)和缺钾区相对产量(y_K)之间也可用对数曲线表达: $y_K = 14.59\ln(x) + 19.323$, $R^2 = 0.5126^{**}$ ($n = 116$) (图8)。

如果把缺素区相对产量低于70%设定为土壤养分极缺, 相对产量70%~80%为缺乏, 相对产量80%~90%为中等, 相对产量90%~95%为丰富, 相对产量大于95%为极丰富, 共5个等级, 从而可基于上述2个回归方程确定内蒙古马铃薯生产中的土壤碱解氮、土壤有效磷和土壤交换性钾的养

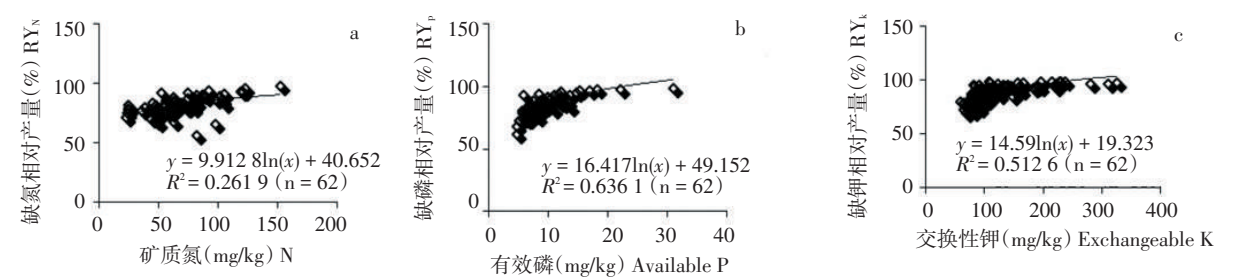


图8 土壤养分状况与相对产量的相关关系
Figure 8 Relationship between soil nutrient and relative yield

表7 土壤养分丰缺指标
Table 7 Soil nutrient abundance and deficiency indicators

丰缺评价 Abundance and deficiency	丰缺值(%) Value	土壤养分丰缺指标 Soil nutrient abundance and deficiency indicator		
		碱解氮(mg/kg) Available N	有效磷(mg/kg) Available P	交换性钾(mg/kg) Exchangeable K
极丰富 Very rich	>95	>240	>16	>179
丰富 Rich	90~95	145~240	12~16	127~179
中等 Medium	80~90	53~145	7~12	64~127
缺乏 Little	70~80	20~53	4~7	32~64
极缺 Very little	<70	<20	<4	<32

分丰缺指标(表7)。

可见土壤碱解氮达到240 mg/kg以上时,说明土壤氮素比较丰富,不需要施氮肥。土壤有效磷达到12 mg/kg以上时,说明土壤磷素比较丰富,不需要施用磷肥。土壤速效钾达到127 mg/kg以上时,说明土壤钾素比较丰富,可以不施钾肥。但本方法需要取土测试,针对每一农户田块进行测试推荐施肥存在困难。

2.8 基于产量反应与农学效率的马铃薯施肥推荐

基于产量反应与农学效率(AE)的推荐施肥量(F)(N或P₂O₅或K₂O)(kg/hm²) = 产量反应(kg/hm²)/农学效率(AE_N或AE_P或AE_K)(kg/kg)即F= YR/AE, YR是施用氮磷钾肥的产量反应(t/hm²), AE是施肥的农学效率(每公斤养分增产的块茎产量, kg/kg)。由YR = (1 - RY) × Ya, 那么F = (1 - RY) × Ya/AE, RY是特定土壤养分测试水平下的相对产量(%) , 如果已知土壤养分测定值, 那么RY可用土壤养分测定值与相对产量之间的回归方程进行估计; Ya是施肥获得的产量(生产实践中的目标产量)(kg/hm²)。

对于氮素养分推荐量, 主要依据产量反应和农学效率, 即F_N = (1 - RY_N) × Ya/AE_N, 如目标产量为30 t/hm², 那么推荐施氮量(N)为: F_N = (1 - 81.7%) × 30 t/hm² × 1 000 kg/t/27.5 kg/kg = 200 kg/hm²。

而对于磷、钾的推荐, 除考虑肥效外, 要考虑土壤养分平衡, 主要基于产量反应和土壤本身供应量给出推荐施肥量, 即F_{P(K)} = [1 - RY_{P(K)}] × Ya/AE_{P(K)} + Ya × RY_{P(K)} × NR_{P(K)}, 如目标产量为30 t/hm², 那么推荐施磷量(P₂O₅)为: F_P = (1 - 84.5%) × 30 t/hm² × 1 000 kg/t/46.6 kg/kg + 30 t/hm² × 0.845 × 1.52 kg/t = 138 kg/hm²; 那么推荐施钾量(K₂O)为: F_K = (1 -

表8 内蒙古马铃薯氮磷钾养分推荐量(无测试值)

Table 8 NPK nutrient recommendation for potato in Inner Mongolia

目标产量(t/hm ²) Target yield (t/ha)	推荐养分量(kg/hm ²) Nutrition recommendation (kg/ha)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
22.5	150	104	215
30.0	200	138	286
37.5	250	173	358
45.0	300	207	430

表9 内蒙古马铃薯磷钾养分推荐量(有测试值时)

Table 9 PK nutrient recommendation for potato in Inner Mongolia

目标产量(t/hm ²) Target yield (t/ha)	有效磷(mg/kg) Available P				交换性钾(mg/kg) Exchangeable K			
	5	10	15	20	50	100	150	200
	推荐P ₂ O ₅ 量(kg/hm ²) Recommendation P ₂ O ₅ rate (kg/ha)	Recommendation P ₂ O ₅ rate (kg/ha)	Recommendation P ₂ O ₅ rate (kg/ha)	Recommendation P ₂ O ₅ rate (kg/ha)	推荐K ₂ O量(mg/hm ²) Recommendation K ₂ O rate (mg/ha)	Recommendation K ₂ O rate (mg/ha)	Recommendation K ₂ O rate (mg/ha)	Recommendation K ₂ O rate (mg/ha)
22.5	152	97	65	42	319	241	196	164
30.0	203	130	87	56	426	322	261	218
37.5	254	162	108	70	532	402	327	273
45.0	304	194	130	84	638	483	392	328

87.8%) $\times 30 \text{ t/hm}^2 \times 1\,000 \text{ kg/t} / 29.3 \text{ kg/kg} + 30 \text{ t/hm}^2 \times 0.878 \times 6.13 \text{ kg/t} = 309 \text{ kg/hm}^2$ 。如果不知道土壤养分含量, 可以采用表8确定不同目标产量的施肥推荐。

如果已知该地块的土壤测试值, 对于氮素的推荐仍然采用基于产量反应与农学效率的推荐方法(表8); 对于磷肥推荐, 相对产量(RY_P)可以用 $RY_P = y_P = 16.417 \ln(x) + 49.152$ (图8b, x 表示土壤有效磷值)估算, 推荐施磷(P₂O₅)量为: $F_P = (1 - RY_P) \times Y_a / AE_P + Y_a \times NR_P = [1 - (16.417 \ln(x) + 49.152) / 100] \times Y_a / AE_P + Y_a \times NR_P$, 如目标产量为30 t/hm², 土壤有效磷10 mg/kg, 那么 $F_P = [1 - (16.417 \ln(10) + 49.152) / 100] \times 30 \times 1\,000 / 46.6 + 30 \times 1.52 = 130 \text{ kg/hm}^2$ 。对于钾肥推荐, 相对产量(RY_K)可以用 $RY_K = y_K = 14.59 \ln(x) + 19.323$ (图8c, x 表示土壤速效钾值)估算, 推荐施钾(K₂O)量为: $F_K = (1 - RY_K) \times Y_a / AE_K + Y_a \times NR_K = [1 - (14.59 \ln(x) + 19.323) / 100] \times Y_a / AE_K + Y_a \times NR_K$, 如目标产量为30 t/hm², 土壤速效钾为100 mg/kg, 那么 $F_K = [1 - (14.59 \ln(100) + 19.323) / 100] \times 30 \times$

$1\,000 / 29.3 + 30 \times 6.13 = 322 \text{ kg/hm}^2$ (表9)。

3 讨论

作物产量反应可以表征土壤的养分状况, 而农学效率是评价施肥效应最为直接的手段。

马铃薯缺素区的相对产量(不施用氮、磷、钾肥)反映了该元素对马铃薯产量影响的重要程度。缺素区的马铃薯相对产量越高, 表明缺少该养分元素对产量的影响越小, 反之对产量影响越大。本研究表明不施氮肥的相对产量为81.7%, 不施磷肥的相对产量为84.5%, 不施钾肥的相对产量为87.8%。马铃薯施用氮磷钾肥区(NPK)较缺素区(PK, NK, NP)的产量增加值称为缺该元素的产量反应, 氮、磷、钾肥的产量反应因土壤养分供应状况、施肥水平等不同而有较大差异, 产量反应越大表明施肥效果越好。本试验中氮磷钾的产量反应分别为4.2, 3.6和2.7 t/hm²。由相对产量和产量反应看出, 氮肥 > 磷肥 > 钾肥, 说明氮肥仍然是限制产量的最主要元素, 其次是磷钾肥。这与其他人的研究结果基本相似^[9-18]。

施肥的农学效率反映了施肥效果和投入产出状况,施用氮磷钾肥的产量反应与缺素区的相对产量有显著的负相关关系,相对产量较高表明土壤本身供肥能力较强,土壤本身生产能力和可获得的产量差距较小,这样施肥后的产量反应也较小。施用氮肥(N)的农学效率为 27.5 kg/kg,施用磷肥(P_2O_5)的农学效率为 46.6 kg/kg,施用钾肥(K_2O)的农学效率为 29.3 kg/kg。施用氮磷钾肥的产量反应和农学效率之间有显著的正相关关系,通常产量反应越小表明土壤的肥力越高,导致农学效率较低。相反,产量反应越高意味着土壤供肥能力越低,因而施肥的农学效率相对较高。可以采用基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法进行马铃薯的施肥推荐。这种推荐施肥方法已在小麦和玉米上进行了应用^[23-28]。

生产单位产量马铃薯块茎需要吸收的养分量受土壤养分供应状况、栽培管理技术和气候条件等综合因素的影响其数值不是绝对稳定的而是相对的^[6-9],由这一数值可以确定一定马铃薯目标产量的养分需求量。土壤测试值是评价土壤肥力的重要依据,可以用于指导马铃薯生产的推荐施肥,特别是磷钾肥。土壤有效磷和速效钾含量和缺素区相对产量之间有很好的线性相关关系,依据这一相关关系可以确定内蒙古马铃薯生产的土壤有效磷和土壤交换性钾的养分丰缺指标,可以指导测土推荐磷钾肥。可以依据土壤测试值、目标产量的养分吸收量、肥料利用率等参数确定一定马铃薯产量下的养分推荐施用量,郑海春等^[32]、张子义等^[33]、田越和李勇^[34]依据土壤养分丰缺指标对阴山南北麓和陕南的马铃薯提出了施肥建议。

本文提出的采用基于作物产量反应和农学效率的马铃薯推荐施肥方法,可以应用于内蒙古马铃薯的施肥推荐。对于土壤钾素含量较低的区域可以采用本方法进行钾肥推荐,但是对于土壤钾素含量较高的地块,钾肥推荐量可以不考虑土壤植物系统的钾素平衡,只考虑施钾的产量反应进行推荐。本方法解决了目前马铃薯生产上由于没有较适用的推荐施肥方法而盲目施肥问题,具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 中国种植业信息网. 农作物数据库 [EB/OL]. [2016-02-05]. <http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx>.
- [2] 赵辉, 乔光华, 祁晓慧, 等. 内蒙古马铃薯生产的比较优势研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 128-132.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 赵营, 郭鑫年, 赵护兵, 等. 宁夏南部山区马铃薯施肥现状与评价 [J]. 中国马铃薯, 2013, 27(5): 281-287.
- [6] 高媛, 韦艳萍, 樊明寿. 马铃薯的养分需求 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(3): 182-187.
- [7] 白艳姝. 马铃薯养分吸收分配规律及施肥对营养品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [8] 何文寿, 马琨, 代晓华, 等. 宁夏马铃薯氮、磷、钾养分的吸收累积特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1477-1487.
- [9] 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.
- [10] 肖强, 蒙美莲, 陈有君, 等. 肥料配施对阴山北麓旱区马铃薯产量和水分利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 112-118.
- [11] 张静, 蒙美莲, 王颖慧, 等. 氮磷钾施用量对马铃薯产量及品质的影响 [J]. 作物杂志, 2012(4): 124-127.
- [12] 张朝春, 江荣风, 张福锁, 等. 氮磷钾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.
- [13] 苏小娟, 王平, 刘淑英, 等. 施肥对定西地区马铃薯养分吸收动态、产量和品质的影响 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(1): 86-91.
- [14] 弓建国, 穆俊祥, 曹新民. 氮磷钾有机肥配合施用对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 7935-7937.
- [15] 戴树荣. 应用“3414”试验设计建立二次肥料效应函数寻求马铃薯氮磷钾适宜施肥量的研究 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 154-159.
- [16] 王国兴, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 106-111.
- [17] 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.
- [18] 任稳江, 任亮, 刘生学. 半干旱地区地膜覆盖栽培马铃薯平衡施

- 肥研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 157-161.
- [19] Haifa Group. Nutritional recommendations for potato [J/OL]. [2016-05-08]. http://www.haifa-group.com/knowledge_center/crop_guides/potato/.
- [20] Stevens R G, Thornton R E, Victory S, *et al.* Potato nutrient management for Central Washington [M]. Pullman: Washington State University Extension Service, 1999.
- [21] Ashok Alva, Mingshou Fan, Chen Q, *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.
- [22] Mikkelsen R, Hopkins B. Fertilizer management practices for potato production in the Pacific Northwest [J]. International Plant Nutrition Institute, 2008, 40: 330-335.
- [23] Chuan L, 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): 1-8.
- [24] 何萍, 金继运, Mirasol F, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
- [25] Xu X, 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(2): 27-34.
- [26] 串丽敏, 何萍, 赵同科. 作物推荐施肥方法研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 95-102.
- [27] 王宜伦, 苏瑞光, 刘举, 等. 养分专家系统推荐施肥对潮土夏玉米产量及肥料效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 563-569.
- [28] 王宜伦, 白由路, 王磊, 等. 基于养分专家系统的小麦-玉米推荐施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4483-4492.
- [29] Hunter A H. Laboratory and greenhouse techniques for nutrient survey to determine the soil amendments required for optimum plant growth [M]. Florida: Agro Service International, 1980.
- [30] Portch S, Hunter A. 评价与改善土壤肥力的系统研究法[M]. 杨俐苹, 译. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [32] 郑海春, 郜翻身, 张子义, 等. 阴山南麓旱作马铃薯的施肥指标[J]. 中国马铃薯, 2010, 24(3): 169-174.
- [33] 张子义, 郑海春, 郜翻身, 等. 内蒙古阴山北麓旱作马铃薯土壤氮、磷、钾丰缺指标研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(1): 177-180.
- [34] 田越, 李勇. 陕南三县马铃薯“3414”肥料效应及土壤养分丰缺指标研究[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(1): 15-17.

丁香吩®



亚达益农



马铃薯晚疫病首选治疗剂

保定市亚达益农农业科技有限公司（原保定市亚达化工有限公司）成立于1997年，是国家定点农药企业，多年来先后获得过河北省高新技术企业、国家科技成果推广示范企业、重合同守信誉企业、消费者信得过企业等荣誉称号。

我公司独家配方“丁香吩”牌丁子香酚经过多年的推广应用对预防和治疗马铃薯晚疫病效果显著，具有速效治疗、长效保护、低毒绿色、无交互抗性等特点，而且是“减药增效”和替代化学药剂的首选产品。

我公司多年来始终坚持“以质量求生存、以信誉求发展；为客户服务、让农民满意”的方针，坚持贯彻国家“农药减量增效、使用零增长”的发展目标，愿与大家携手共进，共同合作，共谋发展！联系电话：0312-8683157