

中图分类号: S147; S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2023)06-0514-13
DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.06.004

土壤肥料

马铃薯施肥技术参数及推荐施肥量研究

肖欢欢¹, 陈小虎^{1*}, 邓海¹, 王际香², 谷云勇³, 陶新纪¹, 贺武生¹

(1. 耒阳市农业技术服务中心, 湖南 耒阳 421800; 2. 衡阳市农业技术服务中心, 湖南 衡阳 421001;
3. 耒阳市种子服务中心, 湖南 耒阳 421800)

摘要: 科学施肥对提高马铃薯产量和薯农增收意义重大, 科学制定马铃薯施肥方案, 落实马铃薯测土配方施肥技术是助力马铃薯产业提质增效重要举措。统计湖南省及其他地区 53 个“3414”马铃薯肥效试验数据, 综合多人研究结果, 生产 100 kg 马铃薯氮、磷、钾养分吸收量(养分系数)具有较好代表性的取值分别为 0.556、0.205 和 0.989 kg/100 kg。分析表明马铃薯氮、磷、钾肥利用率平均值分别为 30.66%、19.03%、40.55%; 土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量与其对应的有效养分校正系数均表现为极显著负相关; 最佳回归数学模型筛选表明, 氮、磷、钾有效养分校正系数随土壤有效养分含量增加呈双曲线函数趋势递减。将碱解氮、有效磷、速效钾含量分别代入 3 个数学模型即可估算出对应的有效养分校正系数, 计算土壤供肥量; 若马铃薯产量为 26 250 kg/hm², 当土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量在 50~210, 5~62, 30~220 mg/kg 时, 氮、磷、钾肥推荐施用量分别为 114~300, 45~136, 90~364 kg/hm²。研究结果可为马铃薯测土配方施肥提供技术支持。

关键词: 有效养分校正系数; 肥料利用率; 养分系数; 相关分析; 数学模型

Study on Fertilization Technique Parameters and Recommended Fertilization Rates of Potato

XIAO Huanhuan¹, CHEN Xiaohu^{1*}, DENG Hai¹, WANG Jixiang², GU Yunyong³, TAO Xinji¹, HE Wusheng¹

(1. Leiyang Agricultural Technology Service Center, Leiyang, Hunan 421800, China; 2. Hengyang Agricultural Technology Service Center, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Leiyang Seed Service Center, Leiyang, Hunan 421800, China)

Abstract: In potato cultivation, scientific fertilization is of great significance for increasing yield and farmers' income. To facilitate the scientific development of recommended fertilization strategies for potatoes and enhance the practical application of soil testing-based fertilization techniques, this study used data from 53 "3414" potato fertilizer efficiency trials conducted in Hunan Province and other regions across China, and through comprehensive analysis, the nutrient uptake coefficients for nitrogen (N), phosphorus (P₂O₅), and potassium (K₂O) in the production of 100 kg of potatoes were determined as follows: 0.556, 0.205 and 0.989 kg/100 kg, respectively, demonstrating a high level of representation. Analysis showed that average nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer utilization rates for potatoes were 30.66%, 19.03%, and 40.55%, respectively. A significantly negative correlation of soil alkaline nitrogen, available phosphorus, and

收稿日期: 2023-10-03

基金项目: 全国测土配方施肥项目。

作者简介: 肖欢欢(1986-), 女, 农艺师, 主要从事农作物栽培及测土配方施肥技术与推广。

*通信作者(Corresponding author): 陈小虎, 推广研究员, 主要从事农业技术推广、测土配方施肥技术与推广, E-mail: njy2003@sina.com。

available potassium content with their respective nutrient correction coefficients was established. The estimated optimal regression mathematical models revealed a hyperbolic decrease in the correction coefficients for nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients with an increase in soil nutrient content. By substituting alkaline nitrogen, available phosphorus, and available potassium content into three mathematical models, the corresponding nutrient correction coefficients could be estimated, and the soil fertilizer supply was calculated. If the target potato yield is set at 26 250 kg/ha, the recommended application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer were as follows: 114-300, 45-136, and 90-364 kg/ha, respectively, when the soil alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium contents were in the range of 50-210, 5-62 and 30-220 mg/kg. This study would provide technical support for soil testing and formula fertilization of potato.

Key Words: available nutrient correction coefficient; fertilizer utilization rate; nutrient uptake coefficient; correlation analysis; mathematical model

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是中国粮菜兼用的主要农作物, 全国范围种植。马铃薯栽培中科学施肥对提高马铃薯产量和农民增收具有重大意义, 特别是氮、磷、钾合理配施有利于作物优质高产。自2005年全国实施测土配方施肥项目以来, 湖南省及其他地区进行大量马铃薯“3414”肥效试验, 通过试验获得了不同的马铃薯施肥技术参数和最佳施肥量等结果。高媛等^[1]研究表明, 每生产100 kg 马铃薯需吸收N 0.1~1 kg、P₂O₅ 0.05~0.35 kg、K₂O 0.2~1.2 kg。胡辉等^[2]试验结果显示, 100 kg 马铃薯吸收量为N 0.5 kg、P₂O₅ 0.2 kg、K₂O 1.06 kg。段玉等^[3]认为, 马铃薯的氮磷钾肥利用率为N 31.8%、P₂O₅ 15.3%、K₂O 37.4%。戴树荣^[4]采用多个“3414”肥效试验获得马铃薯氮磷钾最佳推荐施肥量分别为N 219.09 kg/hm²、P₂O₅ 56.77 kg/hm²和K₂O 267.08 kg/hm²。洪彩誌和戴树荣^[5]根据土壤有效养

分的高中低不同含量分别制定了氮磷钾推荐施肥量, 马铃薯施肥量随土壤有效养分含量的升高而降低。这些研究促进马铃薯测土配方施肥技术的应用。本研究汇总近年马铃薯“3414”肥效试验数据, 分析马铃薯测土配方施肥的技术参数, 探索土壤有效养分与有效养分校正系数相关性, 根据土壤有效养分含量及技术参数确定合理推荐施肥量, 为马铃薯平衡施肥和化肥减量增效提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

田间试验均采用“3414”肥效试验完全或部分设计方案, 即: 氮、磷、钾3个试验因素, 每个因素设4个施肥水平, 0水平为不施肥, 2水平为当地最佳施肥量, 1水平=2水平×0.5, 3水平=2水平×1.5, 不同的施肥水平组合后共有14个施肥处理(表1)。

表1 “3414”肥效试验各处理施肥水平设计

Table 1 Fertilization level design of "3414" fertilizer efficiency test

处理号 Treatment number	处理 Treatment	氮磷钾施肥水平 Fertilization level			处理号 Treatment number	处理 Treatment	氮磷钾施肥水平 Fertilization level		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	8	N ₂ P ₂ K ₀	2	2	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	2	2	9	N ₂ P ₂ K ₁	2	2	1
3	N ₁ P ₂ K ₂	1	2	2	10	N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3
4	N ₂ P ₀ K ₂	2	0	2	11	N ₃ P ₂ K ₂	3	2	2
5	N ₂ P ₁ K ₂	2	1	2	12	N ₁ P ₁ K ₂	1	1	2
6	N ₂ P ₂ K ₂	2	2	2	13	N ₁ P ₂ K ₁	1	2	1
7	N ₂ P ₃ K ₂	2	3	2	14	N ₂ P ₁ K ₁	2	1	1

试验地选择地块平整、土壤肥力均匀、易于排灌地块, 每个试验小区面积不少于20 m², 小区随机排列, 不设重复; 肥料作基肥一次性施用后整畦播种, 马铃薯于11月中下旬播种, 第2年4月收获。各试验处理除施肥量不同外, 其他田间管理均保持一致, 成熟时按小区单独采挖称量实际产量。参与试验品种为当地主栽马铃薯品种: ‘青薯9号’‘青薯2号’‘青薯168’‘克新1号’‘克新4号’‘克新18号’‘费乌瑞它’‘东农303’‘东农304’‘中薯3号’‘中薯5号’‘紫花851’‘紫花白’‘庄薯3号’‘垦薯1号’‘荷兰15号’‘郑薯3号’‘闽薯1号’‘兴佳2号’‘新大坪’‘鲁引1号’‘吉薯1号’。

1.2 测定项目及方法

在前茬作物收获后采集0~20 cm耕作层土壤混合样1 kg, 土样自然风干粉碎经20目尼龙网过筛后送化验室检测, 碱解氮采用1 mol/L NaOH碱解扩散法检测; 有效磷采用NaHCO₃溶液浸提, 钼锑抗比色法测定; 速效钾用1 mol/L中性醋酸铵(NH₄OAc)浸提, 火焰光度计法测定^[6]。

1.3 数据来源与分析方法

数据来源于近年53个马铃薯“3414”肥效试验, 采用Excel 2007软件整理并汇总试验中土壤养分检测、施肥量、小区产量等基础数据, 逐一计算出各试验的化肥利用率、有效养分校正系数等施肥技术参数并绘图, 采用DPS 7.05软件作相关性分析和筛选最佳数学模型。

1.4 推荐施肥量及施肥技术参数计算方法

推荐施肥量采用斯坦福(Stanford)养分平衡法计算^[6]:

推荐施肥量=(目标产量养分吸收量-土壤供肥量)/肥料利用率;

目标产量养分吸收量=目标产量/100×100 kg经济产量养分吸收量;

土壤养分供应量(kg/hm²)=土壤速效养分含量×2.25×土壤有效养分校正系数;

土壤有效养分校正系数(%)=缺素区作物地上部分吸收该元素量(kg/hm²)/土壤该元素有效养分测试值(mg/kg)×2.25×100;

肥料利用率(%)=[施肥区作物吸收量(kg/hm²)-缺素区作物吸收量(kg/hm²)]/肥料施用纯量(kg/

hm²)×100。

2 结果与分析

2.1 土壤速效养分及试验施肥量分析

汇总53个马铃薯“3414”肥效试验前土壤碱解氮、有效磷、速效钾的平均含量分别为115.5、28.2、101.0 mg/kg(表2), 与第二次全国土壤普查土壤养分分级标准比较(表3), 其中有效磷含量属于高水平, 碱解氮和速效钾均属于中高水平, 可见各地土壤经多年种植后, 土壤速效养分得到较大提高, 这与多年后土壤养分有所提高趋势吻合, 也说明各地试验土壤养分含量具有较好代表性。由土壤养分均衡度可见, 碱解氮变异系数较小为39.8%, 有效磷含量变异系数最大为52.1%, 速效钾变异系数为51.6%, 说明各地种植马铃薯土壤磷钾养分含量差异较大, 土壤供肥能力也有较大差异, 在施肥上应合理搭配磷钾肥施用。由各地试验实际施肥量可见, 2水平的平均施肥量: N为222.2 kg/hm²、P₂O₅为96.8 kg/hm²、K₂O为251.3 kg/hm², 磷钾肥施用量变异系数均高于氮, 说明各地在磷钾肥施用量上存在较大差异, 这与土壤磷钾养分含量变异系数较大的趋势一致。

2.2 不同施肥处理的产量分析

在施肥处理中, 处理6平衡施肥处理的平均产量最高为25 870 kg/hm², 其次是处理7、处理11和处理10的氮磷钾超量施肥, 方差分析表明前4个处理平均产量间没有显著差异(表4), 说明超量施肥不但没有增产效果, 平均产量还有所降低; 不施肥的处理1平均产量最低为11 808 kg/hm², 且变异系数最大(表4), 表明不施肥的产量主要是受土壤养分高低影响, 其变化趋势与土壤养分差异较大相吻合(表2)。

2.3 马铃薯推荐施肥技术参数分析

2.3.1 马铃薯100 kg经济产量养分吸收量(养分系数)

100 kg经济产量养分吸收量是计算作物需肥量和施肥量重要技术参数之一, 各种作物养分系数相对稳定, 但也因作物产量水平、气候条件和肥料种类在一定范围内变化。综合各地研究数据(表5), 本研究采取的养分系数为N 0.556 kg/100 kg、P₂O₅ 0.205 kg/100 kg、K₂O 0.989 kg/100 kg。

表2 马铃薯“3414”肥效试验土壤检测值及实际施肥量

Table 2 Soil test value and fertilization rate in potato "3414" design test

项目 Item	土壤化验结果 Soil test value			实际施肥量(2水平) Fertilization rate (2 Level)		
	碱解氮(mg/kg) Alkali-hydrolyzed nitrogen	有效磷(mg/kg) Available phosphorus	速效钾(mg/kg) Available potassium	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	K ₂ O (kg/ha)
平均值 Mean	115.5	28.2	101.0	222.2	96.8	251.3
最大值 Max	237.2	64.8	241.0	270.0	150.0	300.0
最小值 Min	49.0	7.4	30.0	180.0	75.0	150.0
标准差 SD	46.0	14.7	52.1	21.5	14.9	49.0
变异系数(%) CV	39.8	52.1	51.6	9.7	15.4	19.5
样本数(No.) Sample size	53	53	53	53	53	53

表3 第二次全国土壤普查土壤养分分级标准

Table 3 Standard for soil nutrient classification in the second national soil survey

级别 Level	极高 Very high	高 High	中高 Medium high	中 Medium	低 Low	极低 Very low
碱解氮(mg/kg) Alkali-hydrolyzed nitrogen	>150	120~150	90~120	60~90	30~60	<30
有效磷(mg/kg) Available phosphorus	>40	20~40	10~20	5~10	3~5	<3
速效钾(mg/kg) Available potassium	>200	150~200	100~150	50~100	30~50	<30

表4 不同处理产量的方差分析(53个试验)

Table 4 Analysis of variance for yields of potato under different treatments (53 trials)

处理号 Test number	施肥水平 Fertilization levels	平均产量(kg/hm ²) Average yield (kg/ha)	最大值(kg/hm ²) Max (kg/ha)	最小值(kg/hm ²) Min (kg/ha)	标准差(kg/hm ²) SD (kg/ha)	变异系数(%) CV
6	N ₂ P ₂ K ₂	25 870 aA	42 162	20 190	4 766	18.4
7	N ₂ P ₂ K ₂	25 065 abAB	42 830	17 865	5 253	21.5
11	N ₃ P ₂ K ₂	24 494 abcABC	42 018	17 577	5 297	21.6
10	N ₂ P ₂ K ₃	24 471 abcABC	42 837	18 945	5 156	20.6
5	N ₂ P ₁ K ₂	23 390 bcdABC	38 370	15 945	5 094	21.8
9	N ₂ P ₂ K ₁	23 137 bcdBC	39 497	15 630	5 167	22.3
14	N ₂ P ₁ K ₁	22 478 cdBC	38 330	14 730	5 003	22.3
3	N ₁ P ₂ K ₂	22 277 cdBC	38 829	15 630	4 743	21.3
13	N ₁ P ₂ K ₁	21 775 dC	37 455	14 145	4 831	22.4
12	N ₁ P ₁ K ₂	21 589 dC	39 855	13 575	5 142	23.6
8	N ₂ P ₂ K ₀	16 931 eD	33 998	8 999	4 954	32.0
4	N ₂ P ₀ K ₂	15 502 eFD	30 540	10 235	4 288	25.3
2	N ₀ P ₂ K ₂	13 638 fgDE	28 664	8 030	4 271	31.3
1	N ₀ P ₀ K ₀	11 808 gE	26 165	6 881	3 984	33.7

注: 不同小写字母表示0.05水平差异显著, 不同大写字母表示0.01水平差异显著。采用最小显著差数(LSD)法。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level, and different uppercase letters indicate significant differences at the 0.01 level, as tested using least significant difference (LSD) method.

表5 生产100 kg马铃薯氮磷钾养分吸收量(养分系数)

Table 5 Nutrient absorption of nitrogen, phosphorus and potassium for 100 kg potato production (nutrient coefficient)

引用来源 Reference	N(kg/100 kg)	P ₂ O ₅ (kg/100 kg)	K ₂ O(kg/100 kg)
[1]	0.550	0.200	0.700
[2]	0.500	0.200	1.060
[7]	0.550	0.220	1.020
[8]	0.550	0.200	1.250
[9]	0.500	0.200	0.900
[10]	0.500	0.200	1.100
[11]	0.615	0.136	0.617
[12]	0.620	0.200	1.035
[13]	0.616	0.286	1.216
平均值 Mean	0.556	0.205	0.989
最大值 Max	0.620	0.286	1.250
最小值 Min	0.500	0.136	0.617
氮磷钾比 NPK ratio	1	0.37	1.78

2.3.2 肥料利用率

肥料利用率是确定作物施肥量技术参数之一,指当季作物从所施用肥料中吸收养分占施入肥料养分总量的百分数,常因土壤肥力、作物种类、气候条件和农艺措施不同而变化。计算并汇总53个马铃薯肥效试验的肥料利用率(表6),氮磷钾肥利用率分别为30.66%、19.03%、40.55%,与表7肥料利用率研究的平均值接近。从利用率变异系数上来看(表6),钾肥利用率的变异系数最大为29.19%,其次是磷和氮的变异系数,这与各地试验钾肥用量和土壤速效钾含量差异较大(表2)的趋势一致。

2.3.3 土壤有效养分校正系数

用马铃薯“3414”试验中的缺氮区、缺磷区、

缺钾区分别计算出土壤氮磷钾有效养分校正系数(表6),马铃薯土壤氮磷钾有效养分校正系数平均值为31.63%、69.94%、83.56%。其中有效磷有效养分校正系数的变异系数最大为54.05%,变化范围为23.18%~185.61%;其次是速效钾有效养分校正系数的变异系数为46.70%,变化范围为36.28%~159.00%,氮的有效养分校正系数的变异系数最小为30.02%,变化范围为15.56%~54.25%。速效钾的有效养分校正系数平均值最大,说明马铃薯对土壤速效钾利用率最高,其次是有效磷和碱解氮。可见有效养分校正系数变化范围较大,也为计算土壤供肥量时有效养分校正系数取值增加难度。

表6 53个肥效试验化肥利用率及有效养分校正系数汇总

Table 6 Summary of fertilizer efficiency and correction coefficient of available nutrients in 53 fertilizer efficiency trials

项目 Item		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
化肥利用率 Fertilizer efficiency	平均值(%)	30.66	19.03	40.55
	最大值(%)	50.06	26.77	70.22
	最小值(%)	19.42	8.88	18.08
	标准差(%)	7.09	4.66	11.84
	变异系数(%)	23.11	24.48	29.19
有效养分校正系数 Available nutrient correction coefficient	平均值(%)	31.63	69.94	83.56
	最大值(%)	54.25	185.61	159.00
	最小值(%)	15.56	23.18	36.28
	标准差(%)	9.50	37.80	39.03
	变异系数(%)	30.02	54.05	46.70

表7 马铃薯氮、磷、钾肥利用率研究数据统计
Table 7 Data statistics of potato N, P, K fertilizer utilization

引用来源 Cite source	N 利用率 (%) NUE_N	P_2O_5 利用率 (%) NUE_P	K_2O 利用率 (%) NUE_K
[3]	31.80	15.30	37.40
[10]	33.10	12.20	40.90
[11]	32.90	14.80	49.80
[14]	35.90	15.60	50.40
[15]	38.80	22.40	31.10
[16]	29.40	18.90	20.20
[17]	36.50	31.20	48.70
[18]	36.40	18.50	27.60
平均值 Mean	34.35	18.61	38.26
最大值 Max	38.80	31.20	50.40
最小值 Min	29.40	12.20	20.20

2.4 有效养分校正系数与土壤有效养分含量的相关性和数学模型分析

对 53 个马铃薯肥效试验土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量与对应土壤有效养分校正系数进行相关分析(表 8), 结果表明两者间均呈极显著负相关, 其相关系数分别为: -0.6655 、 -0.7840 、 -0.8135 , 说明土壤有效养分含量越大土壤有效养分校正系数越小, 马铃薯对土壤中有效养分利用率越低。分别以土壤速效氮磷钾养分含量为 X , 其对应的土壤有效养分校正系数为因变量 Y , 回归分析得到最佳数学模型均为双曲线模型, 3 个数学模型的 F 检验值和复相关系数均达到极显著水平(表 8)。由拟合曲线图可见, 有效磷的复相关系数

和数学模型检验 F 值最大, 表明其拟合程度最高(图 1), 从图 1 上也可以看出各数据点集中分布在双曲线两边, 且在有效磷含量较低时, 其有效养分校正系数变幅较大, 当有效磷含量达 20 mg/kg 时, 曲线开始变幅平缓。速效钾的拟合程度较有效磷次之, 数据点也是集中分布在曲线附近(图 2), 速效钾含量低于 70 mg/kg 时有效养分校正系数递减量较大, 高于 70 mg/kg 时曲线开始递减平缓。碱解氮的拟合程度较低, 尽管复相关系数也达到极显著水平, 但数据点分布比较散, 整个曲线较平缓(图 3)。在数学模型中代入 X 值(土壤有效养分测试值)即可计算出对应的土壤有效养分校正系数。

表 8 土壤有效养分与有效养分校正系数的相关系数及估算数学模型
Table 8 Correlation coefficient of soil available nutrient with correction coefficient of available nutrient and estimated mathematical model

土壤养分 Soil nutrient	与土壤有效养分校正系数的相关系数 Correlation coefficient of soil nutrient with correction coefficient	土壤有效养分校正系数的估算数学模型 Mathematical model	数学模型检验 F 值 F test value	复相关系数 (R^2) Multiple correlation coefficient
碱解氮 Available N	-0.6655^{**}	$Y=0.158125+15.6525/X$	38.82^{**}	0.4322^{**}
有效磷 Available P	-0.7840^{**}	$Y=0.134935+11.7638/X$	251.54^{**}	0.8314^{**}
速效钾 Available K	-0.8135^{**}	$Y=0.261933+41.8253/X$	220.76^{**}	0.8123^{**}

注: *为 0.05 水平显著, **为 0.01 水平显著。

Note: * stands for significance at 0.05 level; **stands for significance at 0.01 level.

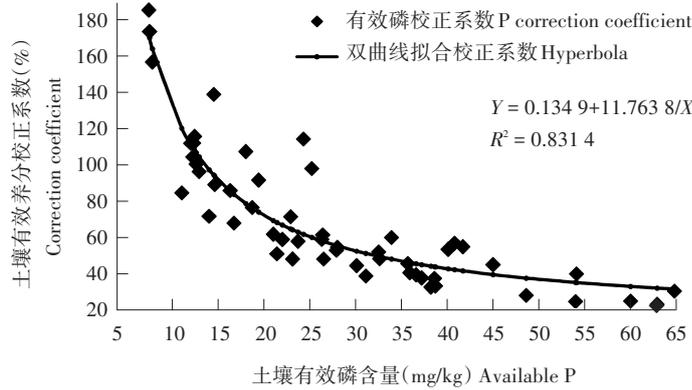


图1 马铃薯土壤有效磷含量与其有效养分校正系数相关模型图

Figure 1 Correlation model diagram of available phosphorus content and correction coefficient of available nutrients in potato planted soil

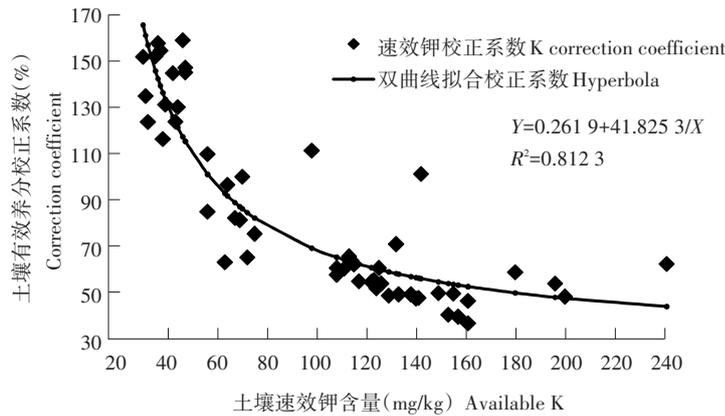


图2 马铃薯土壤速效钾含量与其有效养分校正系数相关模型图

Figure 2 Correlation model diagram of available potassium content and correction coefficient of available nutrients in potato planted soil

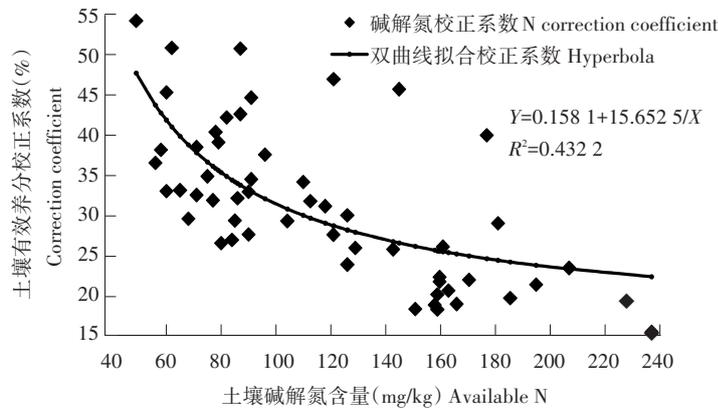


图3 马铃薯土壤碱解氮含量与其有效养分校正系数相关模型图

Figure 3 Correlation model diagram of available nitrogen content and correction coefficient of available nutrient in potato planted soil

2.5 马铃薯推荐施肥量分析

2.5.1 各地马铃薯推荐施肥量及氮磷钾比

各地马铃薯推荐施肥量统计结果见表9。

因各地土壤养分含量不同, 马铃薯最佳施肥量和推荐施肥量存在较大差异。汇总各地研究结

果表明, N的推荐施肥量为114.0~300.0 kg/hm², 平均193.5 kg/hm²; P₂O₅的推荐施肥量为45.0~190.0 kg/hm², 平均87.3 kg/hm²; K₂O的推荐施肥量为90.0~400.0 kg/hm², 平均230.4 kg/hm²。推荐施肥的氮磷钾比为1:0.45:1.19。

表9 各地马铃薯推荐施肥量统计

Table 9 Statistics of recommended fertilization rate for potato in different regions

引用来源 Reference	施肥量推荐方式 Recommended method	N施用量(kg/hm ²) N application (kg/ha)	P ₂ O ₅ 施用量(kg/hm ²) P ₂ O ₅ application (kg/ha)	K ₂ O施用量(kg/hm ²) K ₂ O application (kg/ha)	产量(kg/hm ²) Yield (kg/ha)
[2]	最佳施肥量	204.2	68.0	253.6	31 264
[2]	最高施肥量	219.1	56.8	268.1	31 264
[12]	最低施肥量	190.0	100.0	130.0	25 300
[12]	最高施肥量	300.0	190.0	400.0	25 300
[19]	最佳施肥量	178.4	68.2	265.2	29 102
[19]	最高施肥量	205.1	88.5	302.1	34 238
[20]	平均施肥量	164.2	100.3	188.0	29 400
[21]	最低施肥量	150.0	45.0	90.0	19 862
[21]	最高施肥量	250.0	90.0	120.0	23 370
[22]	平均施肥量	160.0	116.0	165.0	26 251
[23]	平均施肥量	181.9	93.4	113.4	26 100
[24]	最佳施肥量	195.0	58.5	380.3	25 950
[25]	最佳施肥量	241.0	96.0	290.0	26 880
[26]	最低施肥量	114.0	63.8	220.0	31 557
[26]	最高施肥量	150.0	75.0	270.0	32 275
平均值 Mean		193.5	87.3	230.4	27 874
最大值 Max		300.0	190.0	400.0	34 238
最小值 Min		114.0	45.0	90.0	19 862
氮磷钾比 NPK ratio		1	0.45	1.19	-

2.5.2 数学模型拟合有效养分校正系数计算推荐施肥量

采用目标产量的养分平衡法推荐施肥, 即根据作物目标产量与土壤供肥量间差估算施肥量的方法。在此采用3个双曲线数学模型分别拟合氮磷钾有效养分校正系数来计算土壤养分供应量, 在目标产量26 250 kg/hm²的需肥量基础上, 分别算出氮磷钾肥推荐施用量(表10)。

2.5.3 碱解氮有效养分校正系数的取值范围及推荐施肥量分析

当碱解氮含量从50~240 mg/kg等量递增时, 采用数学模型拟合的有效养分校正系数呈双曲线递减趋势(图3), 土壤供肥量则随着碱解氮含量的升高而

增加, 推荐施氮量与土壤供肥量呈相反的变化趋势, 当碱解氮含量为50 mg/kg时推荐施肥量为303 kg/hm²(表10), 已接近各地推荐施肥量最高值300 kg/hm²(表9), 此时有效养分校正系数为47%左右, 当碱解氮含量为210 mg/kg时推荐施肥量为117 kg/hm², 接近推荐施肥最低值114 kg/hm², 其对应的有效养分校正系数为23%左右, 据此可确定马铃薯产量在26 250 kg/hm²时, 碱解氮的有效养分校正系数取值范围为23%~47%, 当碱解氮低于50 mg/kg时均采用47%计算土壤供氮量, 高于210 mg/kg时均采用23%计算, 由此可见, 当土壤碱解氮含量为50~210 mg/kg时推荐施氮量在114~300 kg/hm²(图4), 且随土壤碱解氮含量逐渐增加而减少推荐施氮量。

表10 马铃薯目标产量26 250 kg/hm²氮磷钾推荐施肥量
Table 10 N, P and K recommended fertilization rate for target yield of potato (26 250 kg/ha)

N 施用量推荐				P ₂ O ₅ 施用量推荐				K ₂ O 施用量推荐			
N application				P ₂ O ₅ application				K ₂ O application			
碱解氮 (mg/kg)	拟合校正 系数(%)	土壤供氮量 (kg/hm ²)	推荐施氮量 (kg/hm ²)	有效磷 (mg/kg)	拟合校正 系数(%)	土壤供磷量 (kg/hm ²)	推荐施磷量 (kg/hm ²)	速效钾 (mg/kg)	拟合校正 系数(%)	土壤供钾量 (kg/hm ²)	推荐施钾量 (kg/hm ²)
Available N	Fitting correction coefficient	Soil nitrogen supply (kg/ha)	Recommended application (kg/ha)	Available P	Fitting correction coefficient	Soil phosphorus supply (kg/ha)	Recommended application (kg/ha)	Available K	Fitting correction coefficient	Soil potassium supply (kg/ha)	Recommended application (kg/ha)
30	68.0	46	326	5	249.0	28	136	30	166.0	112	364
40	54.9	49	314	8	161.0	29	131	40	131.0	118	350
50	47.1	53	303	11	120.0	30	126	50	110.0	124	335
60	41.9	57	291	14	97.5	31	122	60	95.9	129	321
70	38.2	60	280	17	82.7	32	117	70	85.9	135	306
80	35.4	64	268	20	72.3	33	112	80	78.5	141	292
90	33.2	67	256	23	64.6	33	107	90	72.7	147	277
100	31.5	71	245	26	58.7	34	102	100	68.0	153	262
110	30.0	74	233	29	54.1	35	98	110	64.2	159	248
120	28.9	78	222	32	50.3	36	93	120	61.0	165	233
130	27.9	81	210	35	47.1	37	88	130	58.4	171	219
140	27.0	85	198	38	44.5	38	83	140	56.1	177	204
150	26.2	89	187	41	42.2	39	78	150	54.1	183	190
160	25.6	92	175	44	40.2	40	74	160	52.3	188	175
170	25.0	96	164	47	38.5	41	69	170	50.8	194	161
180	24.5	99	152	50	37.0	42	64	180	49.4	200	146
190	24.1	103	140	53	35.7	43	59	190	48.2	206	132
200	23.6	106	129	56	34.5	43	54	200	47.1	212	117
210	23.3	110	117	59	33.4	44	50	210	46.1	218	103
220	22.9	113	106	62	32.5	45	45	220	45.2	224	88
230	22.6	117	94	65	31.6	46	40	230	44.4	230	74
240	22.3	121	83	68	30.8	47	35	240	43.6	236	59

注: 马铃薯目标产量26 250 kg/hm²氮磷钾需肥量分别为146.0, 53.8和259.6 kg/hm²。
Note: N, P and K fertilizer requirements for the target potato yield of 26 250 kg/ha were 146.0, 53.8, 259.6 kg/ha, respectively.

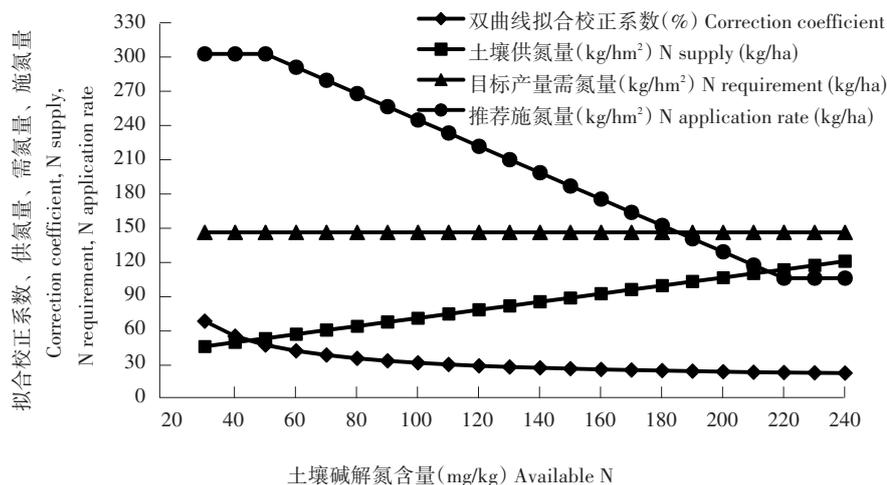


图4 马铃薯目标产量26 250 kg/hm² N推荐施用量曲线

Figure 4 Recommended N application rate with the target yield of 26 250 kg/ha for potato

2.5.4 有效磷有效养分校正系数的取值范围及推荐施肥量分析

土壤有效磷含量从5~65 mg/kg等量递增时, 数学模型拟合的有效养分校正系数同样呈双曲线递减趋势(图1), 土壤供磷量随有效磷含量增加而递增, 推荐施磷量随着土壤供磷量增加而降低, 推荐施磷量从136 kg/hm²开始逐渐递减(表10), 直至推

荐施磷量最低值45 kg/hm²时(表9), 土壤有效磷含量为62 mg/kg, 对应有有效养分校正系数为32.5%。因此, 马铃薯产量在26 250 kg/hm²时, 有效磷的有效养分校正系数取值在32.5%~249%, 对应土壤有效磷含量为5~62 mg/kg时推荐施磷量在45~136 kg/hm², 当有效磷低于5 mg/kg时均采用249%计算土壤供磷量, 高于62 mg/kg时均采用32.5%计算(图5)。

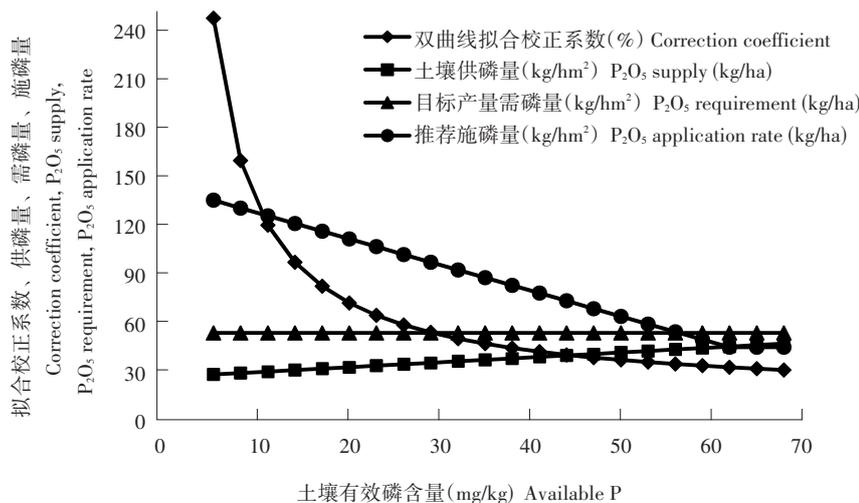


图5 马铃薯目标产量26 250 kg/hm² P₂O₅推荐施用量曲线

Figure 5 Recommended P₂O₅ application rate with the target yield of 26 250 kg/ha for potato

2.5.5 速效钾有效养分校正系数的取值范围及推荐施肥量分析

在土壤速效钾含量从30~240 mg/kg递增时, 速效钾有效养分校正系数从166%开始呈双曲线趋势递减, 土壤供钾量则随速效钾含量增加而增加, 推荐施钾量从364 kg/hm²开始递减(表10), 直至220 mg/kg时接近推荐施肥量最低值90 kg/hm², 此

时速效钾含量为220 mg/kg、有效养分校正系数为45.2%。可见速效钾有效养分校正系数取值范围为45%~166%, 对应的速效钾含量为30~220 mg/kg, 推荐施钾量为90~364 kg/hm²。当土壤速效钾高于220 mg/kg时均采用45%的有效养分校正系数计算土壤供钾量和推荐施钾量, 低于30 mg/kg时均采用166%计算(图6)。

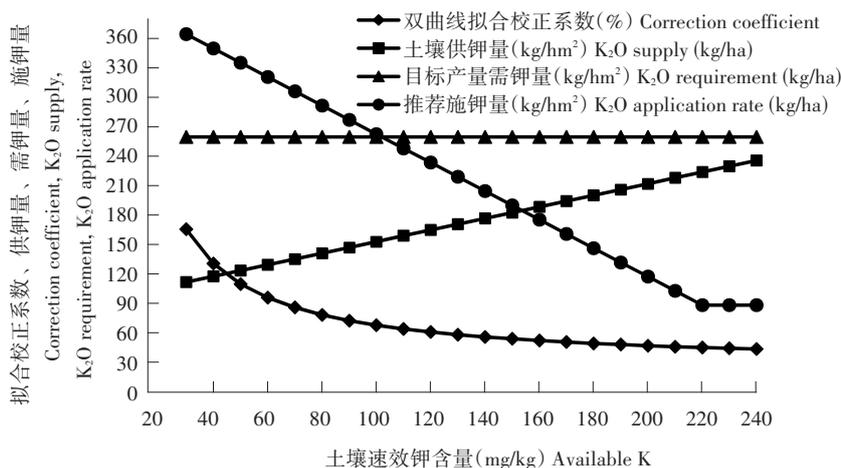


图6 马铃薯目标产量26 250 kg/hm² K₂O推荐施用量曲线

Figure 6 Recommended K₂O application rate with the target yield of 26 250 kg/ha for potato

3 讨论

3.1 马铃薯养分系数和化肥利用率的取值

生产100 kg马铃薯经济产量所需养分量(养分系数)是计算需肥量和施肥量的重要技术参数, 体现马铃薯对氮磷钾的需肥特性, 其取值大小直接影响肥料利用率、土壤有效养分校正系数等施肥技术参数的计算。范吉梅和杜朝昆^[7]、刘林等^[8]、李瑞等^[9]、廖华俊等^[10]、段玉等^[11]、姜巍和刘文志^[12]、邢阳洋^[13]对生产100 kg马铃薯需吸收氮磷钾养分量的研究表明: 马铃薯对氮磷元素的吸收量均较一致, 分别在0.55 kg/100 kg和0.20 kg/100 kg左右, 对钾元素的吸收量差异较大, 在0.617~1.25 kg/100 kg。在分析过往研究基础上, 采用马铃薯养分系数N 0.556 kg/100 kg、P₂O₅ 0.205 kg/100 kg、K₂O 0.989 kg/100 kg, 可以用于计算其他施肥技术参数。汇总计算的53个马铃薯“3414”肥效试验的

肥料利用率, 氮、磷、钾肥的平均利用率分别为30.66%、19.03%、40.55%, 这与段玉等^[14]、贾豪等^[15]、廖华俊等^[10]研究的马铃薯氮、磷、钾肥料平均利用率为34.35%、18.61%、38.26%接近。应用在马铃薯推荐施肥中具有较好的代表性。

3.2 土壤有效养分含量与其校正系数的相关性

53个马铃薯肥效试验中土壤碱解氮、有效磷、速效钾的养分校正系数平均值分别为31.63%、69.94%、83.56%, 尽管有效养分校正系数变化幅度较宽, 变异系数较大, 但与其对应的土壤速效养分含量密切相关, 相关系数分别为-0.665 5、-0.784 0、-0.813 5, 均呈极显著负相关。这与多名学者研究结果一致^[27-30], 即土壤有效养分校正系数随着土壤有效养分含量的升高而降低, 说明土壤有效养分检测值越高, 其养分利用率越低。

3.3 有效养分校正系数与土壤有效养分含量变化利用有效养分校正系数与对应土壤有效养分含

量作数学模型拟合, 筛选出最佳数学模型均为双曲线数学模型, 这与多名学者研究结果相同^[31-34], 模型 F 检验值和复相关系数均达极显著水平, 说明土壤氮磷钾有效养分校正系数随着有效养分含量增加呈双曲线规律递减。有效养分校正系数是养分平衡法计算土壤供肥量的技术参数, 但其变化范围较大, 并随着作物和土壤养分含量的不同而变化, 在实际应用中难以精准取值。利用其与土壤有效养分含量的密切相关性和变化规律, 采用数学模型可较为精准计算出有效养分校正系数的取值范围, 从而解决有效养分校正系数取值不精准问题。

3.4 土壤有效养分校正系数取值范围及推荐施肥量

将土壤氮磷钾有效养分含量分别代入双曲线数学模型, 即可拟合对应的有效养分校正系数并计算土壤氮磷钾养分的供应量, 马铃薯产量在 26 250 kg/hm² 的需肥量基础上, 计算推荐施肥量。结果表明碱解氮的有效养分校正系数取值为 23%~47%, 对应的土壤碱解氮含量为 50~210 mg/kg, 推荐施氮量在 114~300 kg/hm²; 有效磷的有效养分校正系数取值为 32.5%~249%, 对应有效磷含量为 5~62 mg/kg, 推荐施磷量为 45~136 kg/hm²; 速效钾有效养分校正系数取值为 45%~166%, 对应速效钾含量为 30~220 mg/kg, 推荐施钾量为 90~364 kg/hm²。这与林万树等^[19]、徐亚新^[20]、刘润梅等^[21]、梁锦秀等^[23]、王凯^[24]、姚宝全^[25]、张静等^[26]研究马铃薯推荐施肥量范围接近, 即 N 为 114~300 kg/hm², P₂O₅ 为 45~190 kg/hm², K₂O 为 90~400 kg/hm²。可见土壤氮磷钾的有效养分校正系数取值范围有较大的差别, 其中碱解氮的有效养分校正系数取值范围最窄, 有效磷和速效钾的取值范围较宽, 对应的推荐施肥量均有较大变化。在实际应用时, 当土壤有效养分低于下限值时可采用下限值对应的有效养分校正系数计算土壤的供肥量和推荐施肥量, 高于上限值时可采用上限值的有效养分校正系数计算推荐施肥量, 如此可避免推荐施肥偏高或偏低问题。因此, 在有效养分校正系数的取值范围内, 在 3 个数学模型中代入土壤有效养分含量的任意值, 即可计算出有效养分校正系数, 并计算土

壤氮磷钾供肥量, 结合目标产量需肥量可精准计算出氮磷钾肥推荐施肥量, 实现马铃薯平衡施肥。

[参 考 文 献]

- [1] 高媛, 韦艳萍, 樊明寿, 等. 马铃薯的养分需求 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(3): 182-186.
- [2] 胡辉, 杨波, 郑元红, 等. 毕节地区脱毒马铃薯平衡施肥技术应用示范 [J]. 中国马铃薯, 2005, 19(4): 228-231.
- [3] 段玉, 张君, 张三粉, 等. 内蒙古马铃薯施肥效应特征参数与施肥推荐 [J]. 中国马铃薯, 2019, 33(2): 89-100.
- [4] 戴树荣. 应用“3414”试验设计建立二次施肥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.
- [5] 洪彩志, 戴树荣. 南安市马铃薯测土配方施肥指标的研究 [J]. 江西农业科学, 2010, 22(9): 79-83.
- [6] 谢卫国, 黄铁平, 钟武云, 等. 测土配方施肥理论与实践 [M]. 长沙: 湖南科技出版社, 2006.
- [7] 范吉梅, 杜朝昆. 马铃薯需肥特性及测土配方施肥量计算 [J]. 云南农业, 2017(9): 42-43.
- [8] 刘林, 杨乾龙, 汤利, 等. 云南宣威勾姑村马铃薯施肥现状与对策 [J]. 中国热带农业, 2016, 1(68): 45-47.
- [9] 李瑞, 樊明寿, 郑海春, 等. 基于产量水平的内蒙古阴山地区马铃薯施肥评价 [J]. 中国土壤与肥料, 2020, 1(6): 181-188.
- [10] 廖华俊, 闫冲冲, 王前前, 等. 安徽马铃薯肥料利用现状调查 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47(15): 154-157.
- [11] 段玉, 妥德宝, 赵沛义, 等. 马铃薯施肥肥效及养分利用率的研究 [J]. 中国马铃薯, 2008, 22(4): 197-200.
- [12] 姜巍, 刘文志. 马铃薯测土配方施肥技术研究现状 [J]. 现代化农业, 2013(3): 11-13.
- [13] 邢阳洋. 黑龙江省马铃薯氮磷钾养分需求量特性 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [14] 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.
- [15] 贾豪, 郭恒, 王舰, 等. 氮、磷、钾肥配施对马铃薯肥料利用率及产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2018, 47(2): 32-36.
- [16] 宋惠洁, 李大明, 柳开楼, 等. 不同施肥措施对南方冬种马铃薯产量和肥料利用率的影响 [J]. 湖南农业科学, 2021(8): 48-51.
- [17] 郭恒, 贾豪, 王舰, 等. 氮磷钾肥配施对全膜覆盖马铃薯肥料利

- 用率及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 75-78.
- [18] 徐亚新, 何萍, 仇少君, 等. 我国马铃薯产量和化肥利用率区域特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 23-35.
- [19] 林万树, 黄功标, 曹榕彬, 等. 古田马铃薯氮磷钾肥料效应及其施肥指标体系的研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(5): 865-871.
- [20] 徐亚新. 基于产量反应和农学效率的马铃薯推荐施肥方法[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- [21] 刘润梅, 范茂攀, 付文章, 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.
- [22] 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.
- [23] 梁锦秀, 郭鑫年, 张国辉, 等. 氮磷钾用量对宁南旱地马铃薯产量及水肥利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 76-81.
- [24] 王凯. 冬作马铃薯氮磷钾营养特性与合理施肥的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [25] 姚宝全. 冬季马铃薯氮磷钾肥料效应及其适宜用量研究[J]. 福建农业学报, 2008, 23(2): 191-195.
- [26] 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.
- [27] 田苗. 回归分析法测定土壤有效养分校正系数相关性研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 121-123.
- [28] 米泽民, 李翠娥, 郝铁锁, 等. 灵石县淡褐土旱作玉米土壤养分校正系数的研究[J]. 农学学报, 2012, 2(6): 35-48.
- [29] 韩银生, 陈春梅, 蔡春雷, 等. 新疆巴里坤县春小麦测土配方施肥土壤养分校正系数研究[J]. 新疆农业大学学报, 2014, 37(3): 250-253.
- [30] 魏建军, 董巨河, 盛建东, 等. 和田县玉米测土配方施肥土壤养分校正系数研究[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(6): 517-520.
- [31] 陈小虎, 蔡冬华, 吴远帆, 等. 湖南省主要农作物土壤有效养分校正系数估算数学模型研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(5): 19-26.
- [32] 邢月华, 汪仁, 安景文, 等. 土壤养分测定值与其校正系数的回归关系[J]. 辽宁农业科学, 2005(2): 45-46.
- [33] 陈小虎, 蔡冬华, 吴远帆, 等. 早稻土壤有效养分校正系数与土壤有效养分含量的数学模型研究[J]. 作物研究, 2014, 28(3): 294-296.
- [34] 陈小虎, 蒋佐升, 黄铁平, 等. 主要农作物推荐施肥智能手机专家系统的开发应用[J]. 作物研究, 2014(5): 527-532.