

土壤钾素解吸模型及其特征值的作物效应*

章明清^{1,2} 颜明娟¹ 林琼¹ 李娟¹ 陈子聪¹ 吴启堂² 陈防³

(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所,福州 350013)

(2 华南农业大学资源环境学院,广州 510642)

(3 加拿大钾磷肥研究所武汉办事处,武汉 430074)

摘要 土壤钾素可解吸数量和强度及其缓冲系数是评价土壤供钾能力的重要指标。通过室内解吸试验研究土壤钾素解吸特性及其解吸特征值,应用盆栽和田间试验探讨土壤钾素解吸特征值与供试蔬菜鲜重产量和吸钾量的相关性。应用土壤解吸模型对 7 种土壤 32 个钾素解吸试验表明,土壤解吸模型能很好地模拟土壤钾素解吸动态特征,相关系数均达到显著水平。菜心和空心菜的盆栽和田间试验均表明,土壤钾可解吸量 Q 、土壤溶液初始钾浓度 C_i 和 C_i/θ 比值等解吸特征值与供试蔬菜吸钾量或鲜重产量有显著的抛物线型关系。空心菜盆栽试验还表明,这种抛物线型关系与土壤类型无关,说明 Q 、 C_i 和 C_i/θ 比值确实反映了土壤供钾能力。以最高产量的 90% 为基础,根据抛物线型关系可求得 Q 和 C_i 的临界值。解吸模型研究为评价土壤钾素生物有效性和钾素肥力临界指标提供了一种新方法。

关键词 土壤;钾素;解吸;模型;作物效应

中图分类号 S153 文献标识码 A

土壤养分供给植物根系吸收的能力称为土壤养分供应能力,供应能力大小取决于土壤固相和液相该元素的浓度以及养分由固相向液相转化的能力即土壤养分缓冲能力^[1],通常用吸附等温线平衡法测定。研究发现,平衡法测定的吸附等温线受水土比的影响较大^[2,3]。土壤钾素吸附或解吸能力已做了许多研究^[4~8],Havlin 等、吕晓男等和 Schneider 等还分别研究了钾解吸参数与盆栽苜蓿效应和田间大麦、冬小麦和玉米效应的关系^[9~11]。但至今为止,由于动力学理论的困惑、试验手段的限制以及土壤钾素形态的复杂性等因素影响了动力学方程的适用性^[10],土壤钾解吸参数与作物盆栽或田间实际反应的报道还很少,有待深入研究。

钾肥施入土壤后会被土壤吸附,然后在植物生长期间不断解吸出来供植物吸收利用。由于吸附和解吸并不是完全可逆的,解吸作用是补充土壤溶液钾素养分的主要过程。吴启堂等提出的土壤解吸模型能同时求得评价土壤解吸生物有效性的强度指标和数量指标以及缓冲系数^[12,13],试验方法较简单。本文探讨该模型用于评价福建几种主要土壤类型钾解吸特性的可行性,以及解吸特征值对供试蔬菜钾

吸收量和生物产量的效应。

1 材料与方法

1.1 解吸模型基本原理

用解吸的方法研究土壤养分的供应能力一般是向重复的土样中分别加入不同水土比的去离子水。土壤溶液中养分浓度(C)与水土比(H)关系可用下式描述^[12,13]:

$$C = C_1 H^{-\theta} \quad (0 < \theta < 1) \quad (1)$$

式中: C_1 表示水土比为 1 时的土壤溶液养分浓度; θ 描述 C 随 H 变化的趋势, θ 越大,土壤缓冲能力越弱。式(1)用 OriginPro 7.0 软件进行参数估计。在某一水土比时解吸到土壤溶液中的元素总量为:

$$q = C \cdot H = C_1 \cdot H^{1-\theta} \quad (2)$$

由于解吸到土壤溶液中的养分被植物根系吸收,导致浓度下降。当土壤溶液中的养分浓度降低至根系吸收动力学所要求的最小浓度 C_{\min} 时,土壤养分可解吸的最大量即为可供根系吸收的量,或者说土壤有效养分含量。由于 C_{\min} 对不同的植物来说

* 中-加合作项目(Fujian-13)和福建省财政专项基金(Y015)资助

作者简介:章明清(1963~),男,博士,研究员,主要从事土壤肥力、平衡施肥和污染生态学等领域研究。电话:0591-87572840, E-mail: zhangmq2001@163.com

收稿日期:2006-12-01;收到修改稿日期:2007-05-17

是不同的,因此土壤有效养分含量也与植物种类有关。 C_{\min} 越大,可供植物根系吸收的土壤有效养分含量越低。由于目前只有很少一部分植物和元素的 C_{\min} 是知道的^[15],同时为避免远外推可能造成的误差,在实用上可用试验时的最大水土比 H_{\max} 来估计 Q 值,且称为可解吸性养分含量:

$$Q = C_1 \cdot H_{\max}^{1-\theta} \quad (3)$$

由于水土比即为土壤湿度(含水量),因此式(1)也可用以估算土壤初始水分含量(H_i)条件下的土壤溶液养分浓度(C_{li}),即

$$C_{li} = C_1 \cdot H_i^{1-\theta} \quad (4)$$

该条件下的土壤平均缓冲系数为:

$$b = \frac{Q}{C_{li}} \quad (5)$$

因此,表征土壤养分生物有效性的数量指标和

强度指标以及缓冲系数均可通过模型同时得到。

1.2 解吸试验

1.2.1 土壤样品 由于供试蔬菜为浅根作物,取0~15 cm土层土样4 kg,在室温下风干。7个供试土壤的主要理化性质列于表1。其中,从上到下的前3个土壤取自莆田县丘陵耕地,第4个和第6个土壤取自福州市郊区耕地,第5个和第7个土壤取自平和县城关耕地。各项指标采用常规方法测定^[14]:pH为电位法,有机质为重铬酸钾容量法,全氮为硫酸消煮开氏法,全磷为氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法,全钾为氢氧化钠熔融-火焰光度计法,碱解氮为碱解扩散法,有效磷为 0.5 mol L^{-1} 碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法,速效钾为 1 mol L^{-1} 乙酸铵提取-火焰光度计测定。阳离子交换量为乙酸铵法,质地为比重计法测定。

表1 供试土壤主要理化性状

Table 1 Main physico-chemical properties of experimental soils

| 土壤代号 Soil No. | 土壤类型 Soil type | pH | 有机质 OM (g kg^{-1}) | 全氮 Total N (g kg^{-1}) | 全磷 Total P (g kg^{-1}) | 全钾 Total K (g kg^{-1}) | 碱解氮 Alkalyzable N (mg kg^{-1}) |
|------------------|-------------------|------|-------------------------------------|---|---|---|---|
| A | 普通筒育水耕人为土 | 6.00 | 26.36 | 1.66 | 0.70 | 10.33 | 170.9 |
| B | 普通强育湿润富铁土 | 5.91 | 14.00 | 0.83 | 0.69 | 7.61 | 90.1 |
| C | 普通筒育水耕人为土 | 6.15 | 19.06 | 1.16 | 0.53 | 7.94 | 129.7 |
| D | 底潜铁聚水耕人为土 | 5.59 | 14.00 | 1.22 | 1.20 | 11.29 | 124.4 |
| E | 普通筒育水耕人为土 | 6.78 | 18.94 | 1.07 | 1.04 | 10.60 | 143.1 |
| F | 底潜铁聚水耕人为土 | 5.70 | 24.32 | 2.19 | 2.18 | 27.30 | 186.9 |
| G | 普通铁聚水耕人为土 | 4.73 | 13.38 | 1.46 | 2.37 | 26.96 | 109.9 |

| 土壤代号 Soil No. | 土壤类型 Soil type | 有效磷 Available P (mg kg^{-1}) | 速效钾 Available K (mg kg^{-1}) | CEC (cmol kg^{-1}) | 黏粒 Clay < 0.01 mm (g kg^{-1}) | 粉粒 Silt 0.01 ~ 0.05 mm (g kg^{-1}) | 砂粒 Sand > 0.05 mm (g kg^{-1}) |
|------------------|-------------------|---|---|----------------------------------|--|---|--|
| A | 普通筒育水耕人为土 | 22.0 | 68.3 | 8.56 | 477 | 263 | 260 |
| B | 普通强育湿润富铁土 | 47.9 | 103.8 | 4.54 | 216 | 94 | 690 |
| C | 普通筒育水耕人为土 | 16.6 | 48.1 | 5.97 | 331 | 149 | 520 |
| D | 底潜铁聚水耕人为土 | 51.2 | 148.2 | 5.66 | 409 | 187 | 404 |
| E | 普通筒育水耕人为土 | 86.3 | 112.1 | 11.23 | 426 | 130 | 444 |
| F | 底潜铁聚水耕人为土 | 78.3 | 115.3 | 11.55 | 485 | 171 | 344 |
| G | 普通铁聚水耕人为土 | 49.4 | 102.5 | 5.67 | 384 | 474 | 142 |

Typic Haplistagnic Anthrosols; Typic Hi-weatheri-Udic Ferrosols; Endogleyic Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols; Typic Fe-accumuli-Stagnic Anthrosols

1.2.2 土壤加肥培养 称取过1 mm筛的各土样若干份,每份400 g于同样大小的塑料瓶中。各供试土壤的处理及其加肥量如表2,其中,取自莆田县丘陵耕地的A、B、C号土壤的处理(1)和处理(2)加

肥量与盆栽试验施肥量相同,其他处理的加肥量是为研究不同加钾水平的钾解吸特性而设;取自福州市郊区和平和县城关的D、E和F、G号土壤的各处理氮磷钾加肥量与盆栽试验和田间试验的实际施肥

量相同,田间试验以每公顷 2.25×10^6 kg 土壤为转换计算依据。氮磷钾养分分别由分析纯尿素(N 46%)、磷酸二氢钙(P 26.50%)和硫酸钾(K 44.83%)提供。分别测定各供试土壤初始水分含量以及与塑料瓶中土壤相同装填方法的各供试土壤最

大持水量。

肥料溶解于去离子水中,然后分别加入各自的塑料瓶,再加去离子水至每种土壤的最大持水量。用塑料纸覆盖密封瓶子,放在室温(25 ± 3)中培养2周。然后取出土样在室温下风干,过1 mm筛待用。

表2 供试土壤氮、磷、钾养分加入量

Table 2 Application rates of N, P and K in the experimental soils

| 土壤代号 Soil No. | 处理养分 Nutrients | 各处理加肥水平 Added nutrients levels in treatments (mg kg^{-1}) | | | | |
|------------------|-------------------|--|-------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A、B | N | 200 | 200 | 200 | 300 | 400 |
| | P | 52.4 | 52.4 | 100 | 200 | 300 |
| | K | 0 | 132.8 | 200 | 300 | 400 |
| C | N | 200 | 200 | - | - | - |
| | P | 52.4 | 52.4 | - | - | - |
| | K | 0 | 132.8 | - | - | - |
| D、E | N | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| | P | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| | K | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 |
| F | N | 53.4 | 53.4 | 53.4 | 53.4 | 53.4 |
| | P | 11.6 | 11.6 | 11.6 | 11.6 | 11.6 |
| | K | 0 | 16.6 | 33.2 | 49.8 | 66.4 |
| G | N | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | P | 17.5 | 17.5 | 17.5 | 17.5 | 17.5 |
| | K | 0 | 22.1 | 44.3 | 66.4 | 88.5 |

1.2.3 试验操作 称取上述每种过1 mm筛待用的风干土样各6份,其中一份50 g,其他5份各30 g,分别放入1 000 ml塑料瓶中,加去离子水使水土比分别为1 1、2 1、3 1、5 1、10 1、20 1、50 g的那份土样用于配置水土比为1 1。然后,放在震荡器震荡30 min,后静置24 h,取清夜在高速离心机上离心,用火焰光度计法测定离心液中的 K^+ 含量。每个水土比重复测定3次。

1.3 盆栽试验

1.3.1 空心菜(*Iponoea aquatica*) 2 水平钾素试验

在试验前2个月,在莆田县丘陵耕地取3种不同土壤类型的供试土壤即A、B和C号土壤,在自然状态下风干。盆栽试验前,破碎土壤,过3 mm筛,去除杂物。选择23 cm \times 17 cm的塑料盆,每盆装土2.5 kg,每个处理14盆。试验设为(1)不施钾(NP)和(2)施钾(NPK)。处理2的N、P、K用量分别为200、52.4、132.8 mg kg^{-1} 。肥料分别选用化学纯的尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 14%, P_2O_5 44%)和氯化

钾(K_2O 60%)。肥料配成溶液后均匀喷施于每盆土壤中,然后浇去离子水使土壤保持湿润状态,5 d后播种。供试作物选用泰国空心菜,每盆播种空心菜种子20粒。齐苗后进行间苗,每盆保持12株。在试验期间,用去离子水浇灌,使土壤保持湿润状态。A、B、C号土壤初始重量含水量(下同)分别为25.3%、20.8%和26.6%。试验时间在2004年9~11月。收获时对每盆植株分别称鲜重和烘干重,用常规方法^[14]测定植株样品钾含量。

1.3.2 菜心(*Brassica parachinensis*)和空心菜5水平钾素试验 供试土壤分别为底潜铁聚水耕人为土(D号)和普通筒育水耕人为土(E号)土壤。试验方法与上述盆栽试验相同,试验处理和施肥方案如表2。菜心和空心菜试验分别在2005年4~5月和6~7月进行,土壤初始含水量分别为28.7%和23.5%。

1.4 田间试验

空心菜5水平钾素田间试验在平和县的底潜铁聚水耕人为土(G号)上进行,选择肥力均匀的有代

表性的菜地,试验方案如表 2,以每公顷 2.25×10^6 kg 土壤计算实际施肥量。3 次重复,随机区组排列,小区面积 20 m^2 。氮肥用尿素,磷肥选用磷酸二铵,钾肥用氯化钾。试验地不施有机肥。由于生长期短,肥料全部做基肥施用。每公顷播种空心菜种子 135 kg。试验时间为 2005 年 6~7 月,土壤初始含水量 23.3%。收获时测植株鲜重,取各处理的植株混合样品测定烘干重和钾含量。

菜心 5 水平钾素田间试验在福州郊区的普通铁聚水耕人为土(F号)上进行,试验方案如表 2,以每公顷 2.25×10^6 kg 土壤计算实际施肥量。按常规种植密度播种,小区面积 12 m^2 。其他试验方法与空心菜田间试验相同。

2 结果与分析

2.1 土壤钾素解吸模型及其解吸特征值

2.1.1 土壤钾素解吸模型参数估计 在钾解吸能力研究中,由于受土壤理化性质影响,不同土壤类型常需采用不同模型来表达^[4~7,16]。根据土壤溶液 K^+

浓度测定值与相应的水土比,对式(1)解吸模型进行参数估计,表 3 为各供试土壤不同钾水平的参数估计结果。32 个试验结果表明,回归模型的统计复相关系数大都在 0.98 以上,均达到极显著水平,说明式(1)能很好地拟合 7 种不同类型供试土壤的钾素解吸规律,解吸模型的数学形式不受土壤类型和理化性质的影响。图 1 为底潜铁聚水耕人为土(D号)供试土壤不同施钾量下的解吸曲线,表明土壤溶液钾浓度与水土比的关系均呈幂函数递减规律。随着水土比的增大,起初的土壤溶液钾浓度迅速下降,但当水土比达到一定程度后,土壤溶液钾浓度就大致趋于平衡状态。其他 6 种供试土壤的钾素解吸特征与 D 号土壤相似。

理论分析表明,解吸模型中 C_1 表示水土比(H)为 1 时的土壤溶液养分浓度 C , θ 值越大土壤缓冲能力越弱。参数估计结果表明,钾素的 θ 值平均为 0.687 4($n=32$),变异系数为 9.9%。不同土壤钾素的 θ 值有一定的差异,例如 A 号普通筒育水耕人为土的 θ 值大都在 0.6~0.7 之间,而 B 号普通强育湿润富铁土的 θ 大都在 0.7~0.8 之间,这是由于普通强育湿润富铁土的砂性较强质地较轻的缘故(表 1)。

表 3 供试土壤钾素解吸模型参数

Table 3 K desorption model parameters of investigated soils

| 土壤 代号 Soil No. | 施钾量 Added K (mg kg^{-1}) | C_1 | θ | R^2 | 土壤 代号 Soil No. | 施钾量 Added K (mg kg^{-1}) | C_1 | θ | R^2 |
|----------------------|---|-------|----------|------------|----------------------|---|-------|----------|------------|
| A | 0 | 8.44 | 0.561 6 | 0.993 7 ** | B | 0 | 37.61 | 0.696 4 | 0.963 2 ** |
| | 132.8 | 60.39 | 0.670 8 | 0.975 6 ** | | 132.8 | 127.1 | 0.774 2 | 0.995 7 ** |
| | 200 | 87.56 | 0.665 0 | 0.991 3 ** | | 200 | 180.5 | 0.819 2 | 0.995 0 ** |
| | 300 | 133.1 | 0.659 7 | 0.993 2 ** | | 300 | 211.5 | 0.698 8 | 0.985 7 ** |
| | 400 | 168.2 | 0.648 6 | 0.991 0 ** | | 400 | 251.3 | 0.724 9 | 0.995 1 ** |
| D | 0 | 45.68 | 0.714 7 | 0.994 6 ** | E | 0 | 28.64 | 0.551 2 | 0.998 1 ** |
| | 40 | 83.38 | 0.717 9 | 0.992 4 ** | | 40 | 56.41 | 0.618 8 | 0.974 5 ** |
| | 80 | 109.6 | 0.708 5 | 0.995 9 ** | | 80 | 75.25 | 0.600 6 | 0.979 9 ** |
| | 120 | 134.0 | 0.717 8 | 0.997 5 ** | | 120 | 100.1 | 0.664 4 | 0.989 1 ** |
| | 160 | 152.3 | 0.720 5 | 0.997 1 ** | | 160 | 120.1 | 0.663 1 | 0.987 3 ** |
| F | 0 | 44.20 | 0.705 2 | 0.997 7 ** | G | 0 | 102.6 | 0.780 0 | 0.994 0 ** |
| | 16.6 | 59.01 | 0.647 3 | 0.995 0 ** | | 22.1 | 108.6 | 0.773 4 | 0.996 6 ** |
| | 33.2 | 68.82 | 0.651 6 | 0.993 9 ** | | 44.3 | 119.7 | 0.776 1 | 0.994 3 ** |
| | 49.8 | 82.58 | 0.667 1 | 0.995 8 ** | | 66.4 | 130.6 | 0.768 2 | 0.994 3 ** |
| | 66.4 | 92.75 | 0.652 4 | 0.995 6 ** | | 88.5 | 137.2 | 0.761 8 | 0.993 9 ** |
| C | 0 | 5.92 | 0.540 9 | 0.979 1 ** | | | | | |
| | 132.8 | 56.64 | 0.675 4 | 0.972 0 ** | | | | | |

** $p < 0.01$

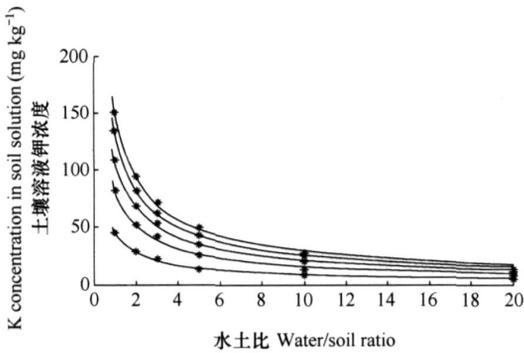


图 1 底潜铁聚水耕人为土(D号)供试土壤不同施钾水平的钾素解吸曲线

Fig. 1 Potassium desorption curve with Endogleyic Fe-accumuliferous Anthrosols (No. D)

2.1.2 土壤钾素解吸特征值 描述土壤供钾能力的指标通常有数量指标和强度指标以及缓冲系数。解吸试验表明,在水土比为 20:1 时,土壤溶液 K⁺ 浓度大都在 5 mg L⁻¹ 左右,即相当于 0.1 mmol L⁻¹。

表 4 是根据式(3)~式(5)和 $H_{max} = 20$ 时计算得到的土壤钾素可解吸量 Q 、试验开始时初始水分含量下的土壤溶液钾浓度 C_{li} 及其缓冲系数 b 。表明土壤钾素 Q 和 C_{li} 与钾素加入量呈极显著的线性正相关,相关系数分别为 0.878 4 和 0.741 7 ($n = 32$)。由于土壤对 K⁺ 有较强的吸附能力,钾的缓冲系数 b 变幅在 2.6~6.5 之间,其大小与基础土壤速效钾和 <0.01 mm 黏粒含量等因素有关。对比表 1 的基础土样测定结果, b 的大小与土壤速效钾含量呈负相关而与 <0.01 mm 黏粒含量呈正相关关系。如 B、D、G 号土壤的速效钾含量较高,而 <0.01 mm 黏粒含量较低, b 值均较低,A、E、F 号供试土壤黏粒含量分别达到 47.71%、42.56% 和 48.48%,不同施钾量下的 b 均较大。

有关土壤溶液 K⁺ 浓度的研究很少,据 Mengel 等的研究,美国土壤溶液 K⁺ 浓度在 0.2~10 mmol L⁻¹ [11],鲁如坤等对太湖地区水稻土在水分饱和条件下的研究表明,土壤溶液 K⁺ 浓度变化在 0.09~0.25 mmol L⁻¹ 之间 [17]。本研究表明,菜园在土壤初始水分含量下,不施钾肥时的土壤溶液 K⁺ 浓度变化在 3.7~78.9 mg L⁻¹ (表 4),即相当于 0.09~2.02 mmol L⁻¹,平均浓度高于水稻土,主要是由于土壤初始水分含量低于田间持水量使 K⁺ 浓度升高的缘故。

表 4 供试土壤钾素解吸特征值

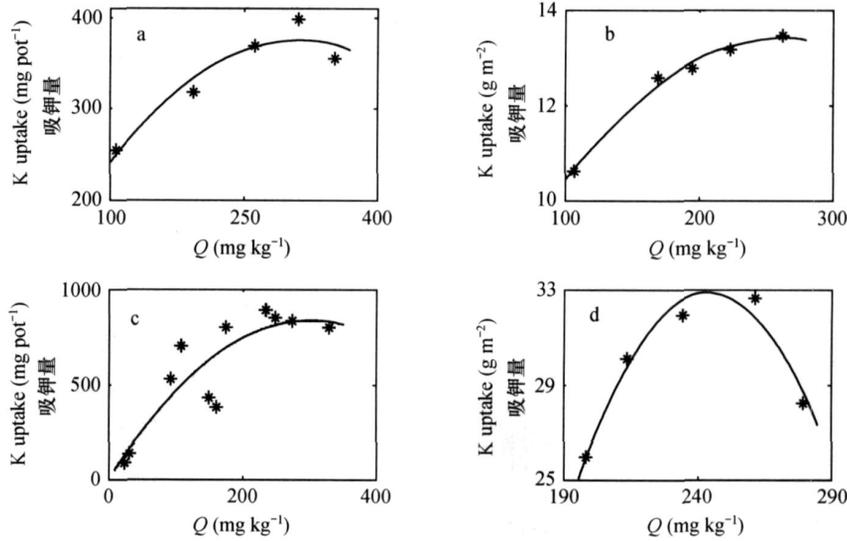
Table 4 K desorption eigenvalues of investigated soils

| 土壤代号 Soil No. | 施钾量 Added K (mg kg ⁻¹) | Q (mg kg ⁻¹) | C_{li} (mg L ⁻¹) | b | 土壤代号 Soil No. | 施钾量 Added K (mg kg ⁻¹) | Q (mg kg ⁻¹) | C_{li} (mg L ⁻¹) | b |
|------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|-----|------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|-----|
| A | 0 | 31.4 | 5.2 | 6.0 | B | 0 | 93.4 | 25.1 | 3.7 |
| | 132.8 | 161.9 | 42.3 | 3.8 | | 132.8 | 249.9 | 93.9 | 2.7 |
| | 200 | 238.9 | 60.9 | 3.9 | | 200 | 418.6 | 141.7 | 3.0 |
| | 300 | 368.8 | 92.1 | 4.0 | | 300 | 521.5 | 141.4 | 3.7 |
| | 400 | 481.9 | 115.0 | 4.2 | | 400 | 573.0 | 174.0 | 3.3 |
| D | 0 | 107.4 | 35.3 | 3.0 | E | 0 | 109.9 | 16.9 | 6.5 |
| | 40 | 194.1 | 64.5 | 3.0 | | 40 | 176.7 | 36.0 | 4.9 |
| | 80 | 262.6 | 84.1 | 3.1 | | 80 | 234.5 | 47.0 | 5.0 |
| | 120 | 312.0 | 103.7 | 3.0 | | 120 | 273.6 | 67.4 | 4.1 |
| | 160 | 351.9 | 118.2 | 3.0 | | 160 | 329.4 | 80.7 | 4.1 |
| F | 0 | 106.9 | 31.4 | 3.4 | G | 0 | 198.3 | 78.9 | 2.5 |
| | 16.6 | 169.7 | 39.1 | 4.3 | | 22.1 | 214.1 | 82.9 | 2.6 |
| | 33.2 | 195.4 | 45.9 | 4.3 | | 44.3 | 234.1 | 91.7 | 2.6 |
| | 49.8 | 223.9 | 56.1 | 4.0 | | 66.4 | 261.5 | 99.1 | 2.6 |
| | 66.4 | 262.7 | 61.9 | 4.2 | | 88.5 | 280.0 | 103.3 | 2.7 |
| C | 0 | 23.4 | 3.7 | 6.3 | | | | | |
| | 132.8 | 149.8 | 40.7 | 3.7 | | | | | |

2.2 土壤钾素解吸特征值对供试蔬菜的效应

2.2.1 Q 和 C_{li} 对供试蔬菜钾吸收量的影响 在解吸特征值中, Q 表示土壤钾素可解吸数量, C_{li} 表示土壤溶液初始钾浓度, 都是对作物有效的钾素形态。对表 4 的土壤钾素 Q 或 C_{li} 与相应供试蔬菜

吸钾量进行回归分析, 其中, 盆栽试验的 A、B、C 和 E 号供试土壤不区分土壤类型, 将有关 Q 值或 C_{li} 值 (x) 与相应处理的空心菜吸钾量 (y) 组合进行回归分析, 结果如图 2 和表 5。盆栽试验和田间试验都表明, 供试菜心和空心菜收获时的吸钾量与各施钾



a. 菜心盆栽试验 Pot experiment for flowering Chinese cabbage, $y = 80.2582 + 1.8950x - 0.0030x^2$, $F = 21.6^*$, $n = 5$; b. 菜心田间试验 Field experiment for flowering Chinese cabbage, $y = 5.5732 + 0.05945x - 0.0001x^2$, $F = 101.0^{**}$, $n = 5$; c. 空心菜盆栽试验 Pot experiment for water spinach, $y = -7.8195 + 5.6082x - 0.0093x^2$, $F = 14.2^{**}$, $n = 11$; d. 空心菜田间试验 Field experiment for water spinach, $y = -166.1121 + 1.6305x - 0.0033x^2$, $F = 26.5^*$, $n = 5$. *: 实测值 Observed values

图2 土壤钾素 Q 对供试蔬菜钾吸收量的影响

Fig. 2 Effect of Q on vegetable K uptake

| 参数 Parameters | 试验 Experiments | 土壤代号 Soil No. | 作物 Crops | 样品数 Sample number | 回归模型 Regression model | | | F |
|-------------------|---------------------------|------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|--------|---------|--------|
| | | | | | $y = a + bx + cx^2$ | | | |
| | | | | | a | b | c | |
| C_{li} | 盆栽试验 Pot experiments | D | 菜心 Flowering Chinese cabbage | 5 | 78.67 | 5.802 | -0.028 | 17.4* |
| | | A, B, C, E | 空心菜 Water spinach | 11 | 129.9 | 17.56 | -0.109 | 6.7* |
| | 田间试验 Field experiments | F | 菜心 Flowering Chinese cabbage | 5 | 0.110 | 0.471 | -0.004 | 21.2* |
| | | G | 空心菜 Water spinach | 5 | -276.8 | 6.688 | -0.036 | 23.3* |
| C_{li}/∂ | 盆栽试验 Pot experiments | D | 菜心 Flowering Chinese cabbage | 5 | 79.98 | 3.185 | -0.009 | 11.6* |
| | | A, B, C, E | 空心菜 Water spinach | 11 | 34.92 | 9.527 | -0.029 | 11.6** |
| | 田间试验 Field experiments | F | 菜心 Flowering Chinese cabbage | 5 | 4.194 | 0.1339 | -0.0005 | 50.5** |
| | | G | 空心菜 Water spinach | 5 | -202.4 | 2.964 | -0.009 | 17.0* |

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

水平所对应的 Q 值或 C_{ii} 值之间存在显著水平的抛物线型关系,其中,不分土壤类型条件下的盆栽空心菜吸钾量与土壤钾素 Q 或 C_{ii} 之间亦有显著水平的相关性。表明 Q 和 C_{ii} 确实反映了土壤钾素对供试蔬菜的有效性,并与土壤类型无关。

2.2.2 C_1/θ 比值对供试蔬菜钾吸收量的影响

式(1)的理论分析表明, C_1/θ 比值越大,表示土壤供应养分的能力越强。根据表 3 的 D、E、F 和 G 号供试土壤的 C_1 和 θ 的比值,与相应的盆栽试验和田间试验的土壤各施钾处理的吸钾量 (mg pot^{-1} ,

g m^{-2}) 进行回归分析,结果见表 5。

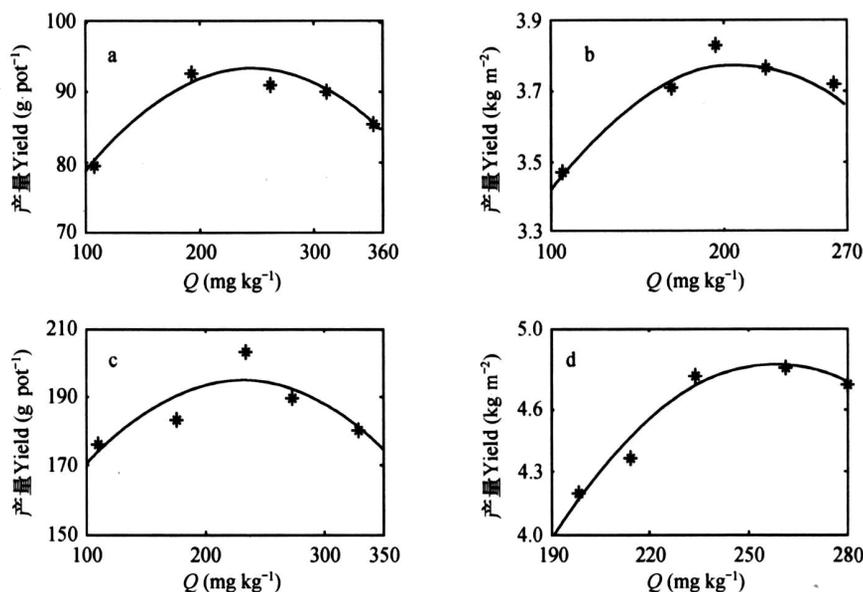
C_1/θ 比值与供试蔬菜吸钾量亦呈显著的抛物线型关系,表明在中低施钾量时供试蔬菜吸钾量与 C_1/θ 比值大致呈线性关系,高量钾肥使 C_1/θ 比值过大可能导致作物其他养分问题反而不利于钾吸收。同样的,不区分土壤类型,将盆栽试验供试的 A、B、C 和 E 号土壤的有关 C_1/θ 比值 (x) 与相应处理的空心菜吸钾量 (y) 组合进行回归分析,表明二者间亦达显著水平(表 5)。回归分析表明, C_1/θ 比值同样反映了土壤钾素供应水平,且与土壤类型无关。

表 6 土壤钾 $C_{ii}(x)$ 对供试蔬菜产量 (y) 的影响

Table 6 Effect of $C_{ii}(x)$ in soil solution on yield (y) of the vegetables

| 试验 Experiments | 土壤代号 Soil No. | 作物 Crops | 样品数 Samples number | 回归模型 Regression model | | | F |
|------------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|--------|---------|
| | | | | $y = a + bx + cx^2$ | | | |
| | | | | a | b | c | |
| 盆栽试验 Pot experiments | D | 菜心 Flowering Chinese cabbage | 5 | 53.28 | 0.962 | -0.006 | 57.1** |
| | E | 空心菜 Water spinach | 5 | 148.3 | 1.828 | -0.018 | 6.6 |
| 田间试验 Field experiments | F | 菜心 Flowering Chinese cabbage | 5 | 2.682 | 0.197 | -0.002 | 114.2** |
| | G | 空心菜 Water spinach | 5 | -40.88 | 1.059 | -0.006 | 91.0** |

注:盆栽试验供试蔬菜产量单位为 g pot^{-1} ,田间试验则为 kg m^{-2} ,产量指鲜重 Note: The unit of yield is g pot^{-1} (fresh mass) of the vegetables in the pot experiment and kg m^{-2} in the field experiment



a. 菜心盆栽试验 Pot experiment for flowering Chinese cabbage, $y = 51.7386 + 0.3358x - 0.0007x^2$, $F = 21.5^*$, $n = 5$; b. 菜心田间试验 Field experiment for flowering Chinese cabbage, $y = 2.4645 + 0.0125x - 0.00003x^2$, $F = 21.6^*$, $n = 5$; c. 空心菜盆栽试验 Pot experiment for water spinach, $y = 119.2208 + 0.6520x - 0.0014x^2$, $F = 2.1$, $n = 5$; d. 空心菜田间试验 Field experiment for water spinach, $y = -7.0942 + 0.0921x - 0.0002x^2$, $F = 22.3^*$, $n = 5$. *: 实测值 Observed values

图 3 土壤钾素可解吸量 Q 对供试蔬菜鲜重产量的影响

Fig. 3 Effect of Q on yield (fresh mass) of the vegetables

2.2.3 Q 和 C_{li} 对供试蔬菜产量的影响 表 6 和图 3 是根据表 4 的 Q 和 C_{li} 与相应的盆栽试验和田间试验收获时的供试蔬菜鲜重产量进行回归分析所得结果。表明除 E 号土壤外,不同施钾水平的土壤钾素可解吸量 Q 或土壤溶液初始钾浓度 C_{li} 与供试蔬菜产量呈显著的抛物线型关系。E 号土壤的速效钾含量达到 112.1 mg kg^{-1} , Q 和 C_{li} 分别达到 109.9 mg kg^{-1} 和 78.9 mg L^{-1} , 钾对空心菜没有增产效应,因而钾素 Q 和 C_{li} 与产量关系不显著。

以最高产量的 90% 为基础,根据抛物线型关系求得 Q 和 C_{li} 的临界值,表明田间条件下,不同试验地的 Q 和 C_{li} 临界值受土壤和供试蔬菜的共同影响,菜心的土壤钾素 Q 和 C_{li} 的临界值分别为 104 mg kg^{-1} 和 31 mg L^{-1} ;而吸钾量较大的空心菜的 Q 和 C_{li} 则分别为 207 mg kg^{-1} 和 82 mg L^{-1} 。表明当土壤 Q 或 C_{li} 超过临界指标就可以不施钾肥,因而,式 (1) 为科学施肥提供了一个新的土壤肥力指标。

3 讨 论

目前表征土壤钾素供应能力的数量指标通常用化学试剂浸提测定,简单易行,但是在不同土壤类型中往往需要选择不同的浸提剂,使结果难以相互比较;强度指标的测定需获得土壤低含水量时的土壤溶液,操作比较麻烦,且测定结果只能对所测定的那个土壤含水量才有效。平衡法测定的土壤钾吸附等温线由于水土比与实际土壤相差较大,不一定能反映土壤钾素的实际供给能力。解吸模型式 (1) 的试验方法较简单,不同土壤类型均可采用去离子水提取土壤速效钾,能同时测得土壤钾素的强度指标 C_{li} 和数量指标 Q 以及缓冲系数 b ,对于评价土壤钾素供应水平、指导作物施肥有明显优势。但在田间条件下,土壤溶液钾浓度 C_{li} 易受土壤水分和温度等因素的影响,是个易变的参数,而钾素可解吸量 Q 应是相对稳定的,因而在评价土壤钾素有效性时用 Q 做指标可能更好。

表 4 的 A、B 号土壤的计算结果表明,若以对照土壤的实测 Q 值与加钾量之和作为速效钾数量的理论值,在加钾 132.8 、 200 、 300 、 400 mg kg^{-1} 的条件下,A 号土壤的钾可解吸量 Q 实测值较理论值分别增加 -2.3 、 7.5 、 37.5 、 50.5 mg kg^{-1} ,B 号土壤则分别增加 23.7 、 125.2 、 128.1 、 79.6 mg kg^{-1} ,说明不同氮磷加入量对土壤钾的 Q 值有明显影响。表 4 的 D、E、F 号土壤的 Q 值测定结果还表明,在相同氮磷加

入量下,不同加钾水平的土壤钾素的 Q 实测值与理论值之差随钾加入量的增加而增加,表明加入钾肥促进了土壤钾素有效化,但不同土壤有差异,如 C、G 号土壤的 Q 实测值小于理论值,说明加入的钾有部分被土壤吸附固定而不能被去离子水提取。产生上述差异的原因可能与土壤速效钾数量、土壤质地和黏土矿物组成等因素有关,有待进一步研究。因此,在研究土壤钾素解吸特征值与作物效应的相关性时,应特别注意解吸试验加入的养分种类数量应与盆栽或田间试验的实际施肥情况相同。

由于解吸试验所测定的土壤有效钾数量指标,只是表征土壤现时的有效钾数量,不包括植物生长期土壤缓效钾等其他形态钾所释放的养分数量,对生长期较长的大田作物的相关性如何还需进一步研究。作者曾基于生态学的 Lotka-Volterra 模型,建立了能描述盆栽试验和田间试验作物一个生长周期的土壤缓效钾和速效钾对供试作物释放速率的动力学方程^[18,19]。若将钾素解吸模型与动力学方程结合起来校正 Q 或 C_{li} ,就有可能提高解吸特征值与生长期较长的作物效应的相关性。

众所周知,在灌溉或降雨条件下,只有当土壤水分含量达到或超过田间持水量时才会发生养分的地表径流和向下淋溶。由于建立了土壤溶液养分浓度与水土比的定量关系,式 (1) 解吸模型可方便地用于评估土壤钾等养分流失或下渗时的养分浓度,对于评价养分损失也有应用价值。

4 结 论

7 种土壤 32 个钾素试验表明,式 (1) 解吸模型能很好地模拟土壤钾素的解吸动态特征,其数学形式不受土壤类型和理化性质的影响。该模型可同时求得表征土壤钾素生物有效性的强度指标 C_{li} 和数量指标 Q 以及缓冲系数 b 。

盆栽试验和田间试验表明,对生长期较短的空心菜和菜心而言,由解吸模型计算得到的土壤钾素 Q 、 C_{li} 和 C_l/∂ 比值等解吸特征值指标与供试蔬菜产量和吸钾量大多呈显著的抛物线型关系,而且土壤钾素解吸特征值与供试空心菜吸钾量的抛物线型关系不受土壤类型的影响。因而,土壤钾素解吸模型研究为评价土壤钾素生物有效性提供了一种新方法。

参 考 文 献

[1] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料. 上海: 上海科

- 学技术出版社, 1994. 73 ~ 84. Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Fertilizers in China (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994. 73 ~ 84
- [2] 叶柄, 王虹. 应用 Langmuir 等温式解释我国东北某些土壤对磷酸离子的吸附作用. 土壤学报, 1984, 21(1): 21 ~ 28. Ye B, Wang H. Application of Langmuir isotherm to study absorption of PO_4^{3-} in some soils of northeast China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(1): 21 ~ 28
- [3] 徐明岗, 孙本华. 陕西土壤磷等温吸附特性及其测定条件的研究. 土壤, 1997, 29(2): 109 ~ 112. Xu M G, Sun B H. Studies on isothermal absorption character and measuring conditions of soil phosphorus in Shaanxi Province (In Chinese). Soils, 1997, 29(2): 109 ~ 112
- [4] 芒森 R D 主编. 农业中的钾. 北京: 科学出版社, 1995. 175 ~ 234. Mansen R D. ed. Potassium in Agriculture (In Chinese). Beijing: Science Press, 1995. 175 ~ 234
- [5] 金继运. 土壤钾素研究进展. 土壤学报, 1993, 30(1): 94 ~ 101. Jin J Y. Research progress on soil potassium (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(1): 94 ~ 101
- [6] Sparks D L, Jardine P M. Comparison of kinetics equations to describe potassium-Calcium exchange in pure and in mixed system. Soil Sci., 1984, 138: 115 ~ 122
- [7] Sparks D L, Zelazny L W, Marten D C. Kinetics of potassium desorption in soil using Miscible displacement. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 1 205 ~ 1 208
- [8] 薛泉宏, 尉庆丰, 李宝安, 等. 黄土性土壤 K^+ 吸附、解吸动力学研究. 土壤学报, 1997, 34(2): 113 ~ 122. Xue Q H, Wei Q F, Li B A, *et al.* Studies on absorption and desorption of K^+ in loess soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(2): 113 ~ 122
- [9] Havlin J L, Westfall D G. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 366 ~ 370
- [10] 吕晓男, 陆允普. 土壤钾解吸动力学方程和大麦反应的关系. 土壤学报, 1995, 32(1): 69 ~ 76. Lu X N, Lu Y P. Relationships between soil K desorption dynamics model and barley response (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(1): 69 ~ 76
- [11] Schneider A, Castillon P, Pellerin S. Relationships between soil potassium supply characteristics based on soil solution concentration and buffer power and field responses of winter wheat and maize. Plant and Soil, 2003, 254: 269 ~ 278
- [12] 吴启堂. 一个定量植物吸收土壤重金属的原理模型. 土壤学报, 1994, 31(1): 68 ~ 76. Wu Q T. A mechanistic model predicting the plant uptake of heavy metals from soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 68 ~ 76
- [13] Wu Q T, Xu Z, Meng Q, *et al.* Characterization of cadmium desorption in soils and its relationship to plant uptake and cadmium leaching. Plant and Soil, 2004, 258: 217 ~ 226
- [14] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. ed. Analytical Methods of Soil and Agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [15] Barber S A. Soil Nutrient Bio-availability: A Mechanistic Approach. New York: Wiley, 1984
- [16] Schneider A. Characterization of soil potassium supply as derived sorption-desorption experiments. Plant and Soil, 2003, 251: 331 ~ 341
- [17] 鲁如坤, 顾益初. 太湖地区水稻土壤溶液的养分含量和养分供应机理. 土壤肥料, 1991(3): 32 ~ 33. Lu R K, Gu Y C. Nutrients contents in the soil solution and nutrients supply mechanism (In Chinese). Soils and Fertilizers, 1991(3): 32 ~ 33
- [18] 章明清, 彭嘉桂, 杨杰, 等. 土壤—作物系统钾素动力学模型及其参数研究. 土壤学报, 2003, 40(1): 89 ~ 95. Zhang M Q, Peng J G, Yang J, *et al.* Studies on dynamics model of soil-crop system and its parameter (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 89 ~ 95
- [19] 章明清, 彭嘉桂, 林琼, 等. 闽东南耕地土壤长期供钾特性研究. 见: 周建民主编. 土壤钾素肥力评价与钾肥合理施用. 长春: 吉林科学技术出版社, 2004. 167 ~ 172. Zhang M Q, Peng J G, Lin Q, *et al.* Studies on characteristics of soil long-term supplying K in southeast of Fujian (In Chinese). In: Zhou J M. ed. Evaluation of Soil Potassium Fertility and Potassium Fertilizer Appropriate Application. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2004. 167 ~ 172

SOIL K DESORPTION MODEL AND CROP RESPONSES TO ITS EIGENVALUES

Zhang Mingqing^{1,2} Yan Mingjuan¹ Lin Qiong¹ Li Juan¹ Chen Zhichong¹ Wu Qitang² Chen Fang³

(1 Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, China)

(2 College of Natural Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(3 Wuhan Office of Potash and Phosphate Institute of Canada, Wuhan 430074, China)

Abstract Desorbable quantity and desorption intensity of soil K and their buffer power are important indices in evaluation of soil K supply capacity. An indoor soil K desorption experiment was carried out to explore soil K desorption characteristics and their eigenvalues, and pot and field experiments as well to study relationships of the eigenvalues with crop response in yield. A desorption model for soil cadmium was used to fit 7 types of soils in 32 K desorption experiments. Results show that the model fitted well with correlation coefficients reaching the level of significance. In the pot and field experiments with water spinach (*Iponoea aquatica*) and flowering Chinese cabbage (*Brassica parachinensis*), desorption eigenvalues, like quantity of desorbable soil K (Q), initial K concentration in the soil solution (C_{li}) and concentration/buffer power ratio (C_l/θ), were related to total K uptake or yield (fresh weight) of the vegetables, showing apparent parabola curves. Furthermore, the pot experiment with water spinach indicated that the parabola relationships fitted all the soils regardless of soil type, suggesting that Q , C_{li} and C_l/θ indexes indeed reflect K supply capacity of soils. Based on the parabola relationships and 90% of the maximum yield of the investigated vegetables under field conditions, critical indices of Q and C_{li} were worked out, to be 104 mg kg^{-1} and 31 mg L^{-1} respectively for flowering Chinese cabbage, and 207 mg kg^{-1} and 82 mg L^{-1} respectively for water spinach. If soils have Q or C_{li} determined well beyond the critical index, they do not need K fertilization. The findings indicate that the proposed model can be cited as a new method to evaluate availability and critical index of soil K.

Key words Soil; Potassium; Desorption; Modeling; Crop response