

紫色水稻土钾有效性和钾释放的研究^①

魏朝富 杨剑虹 屈明 谢德体 魏世强

(西南农业大学资源环境学院,重庆 400716)

摘要 紫色水稻土全钾含量属中等水平,速效钾属中等偏下水平,土壤对钾素的供应总体不足。作物吸收的钾,矿物钾占76.95%,速效钾和缓效钾仅占10.81%和12.24%。土壤矿物钾释放随着时间的延长逐渐下降,随土壤颗粒粒径的下降显著增大,在80分钟时,释放量仍高达 $0.8\sim 8.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,80分钟内的累积释放量为土壤缓效钾的1.5~2.0倍,土壤速效钾的形成随着时间的延长逐渐趋向稳定。不同土壤矿物钾的释放顺序和土壤速效钾形成顺序的不一致性,是由它们的机理和土壤性状综合造成的,但是,Elovich方程都能较好地拟合土壤矿物钾的释放过程和土壤速效钾的形态过程,方程参数b值能反映过程进行的速度。

关键词 钾有效性 钾释放 矿物钾 Elovich方程 紫色水稻土

长期以来,紫色土(包括紫色水稻土)被认为是我国南方钾素含量最丰富的土壤,一直到80年代初期的试验研究都表明,紫色土对钾肥的需求不迫切^[1,2]。但是,随着复种指数日益提高,尤其是在多熟高产栽培技术下,紫色土钾素供应不足的现象越来越明显,成为粮食产量上新台阶的重要障碍因素,因而,钾肥的施用量、施用面积、施用作物种类在不断的增加,与此同时,紫色土钾素和钾肥施用效应的研究也取得重要的进展,特别是钾肥施用对粮食作物、蔬菜、果树产量和品质的影响^[3~6]。由于土壤钾素对作物的供应,不仅与土壤中钾素的丰缺有关,而且最重要的是钾在土壤中存在状况,相互转化及影响因素。

本文研究了紫色水稻土钾的有效性状况和土壤钾素的释放能力,这对合理利用钾肥,提高钾肥肥效具有重要意义。

1 材料与方法

首先是收集紫色水稻土全钾、缓效钾、速效钾的资料;其次,在田间不施用钾肥下,在作物(水稻、小麦)种收时,采土测定土壤缓效钾和速效钾,同时,测定作物生长量和植株含钾量,计算作物吸收钾量;选其中六种土壤做土壤钾释放和速效钾形成的土壤培养试验,土壤基本性质列于表1。

1.1 土壤矿物钾的释放 先用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 除去缓效钾,再用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 连续提取法测定土壤矿物钾的释放^[7]。

1.2 土壤速效钾的形成 先用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 除去土壤速效钾,再用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 连续浸提法来测定土壤速效钾的形成及与时间的关系^[7]。

1.3 测定方法 土壤全钾用NaOH熔融—火焰光度法^[7];土壤缓效钾用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 煮沸浸提—火焰光度法^[7];土壤培养试验溶液中的钾也用火焰光度法测定^[7]。

① 水利部老库区移民后期扶持农业重点项目资助。

表 1 供试土壤的基本性质
Table 1 Basic properties of the soils

采样地 Location	土属 Soil genus	土种 Soil species	pH	有机质 O.M. (g/kg)	粘粒 Clay (g/kg)	CEC (c mol/kg)	全钾 Total K (g/kg)	缓效钾 Slowly avail. K (g/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
宜宾	红紫泥田	红沙泥田	6.5	17.34	117.0	13.15	19.50	117.0	98.1
		红沙田	5.2	17.45	98.3	12.53	16.15	167.0	132.0
北碚	灰棕紫泥田	紫黄泥田	7.0	40.73	224.9	29.91	21.35	629.0	165.0
		豆瓣泥田	6.7	30.73	209.7	28.51	26.00	724.0	234.0
遂宁	红棕紫泥田	大眼泥田	7.9	22.84	264.8	31.72	30.05	987.0	200.0
		二泥田	7.9	25.65	329.2	32.66	30.00	839.0	213.0

2 结果与讨论

2.1 紫色水稻土钾状况与作物对钾的吸收

2.1.1 土壤有效钾状况 1566个土壤耕层样品的分析结果(表2)表明,紫色水稻土全钾含量在6.0~30.8g/kg之间,平均为16.8g/kg,高于地壳中钾的含量(14.3g/kg)。按全国土壤全钾分级标准,属3级水平,在全国各类土壤中,含钾居中等水平,全钾含量在10g/kg~25g/kg间的土壤占91.3%。不同类型的紫色水稻土,其全钾含量为红棕紫泥田>灰棕紫泥田>红紫泥田,并且,3种土壤中,分别有48.2%,51.7%和63.3%的土壤,其全钾含量集中在25g/kg~20.0g/kg,20g/kg~15g/kg和15g/kg~10g/kg3个不同全钾水平上,这也在一定程度上反映了紫色水稻土风化发育程度对土壤全钾的影响。

表 2 紫色水稻土全钾状况
Table 2 Total potassium status of paddy soils developed from purple soils

土壤 Soil type	样本数 Number of soils	变幅 Range (g/kg)	均值 Mean (g/kg)	分配状况 Distribution of total K (g/kg, %)				
				>25	25~20	20~15	15~10	<10
紫色水稻土	1566	6.0~30.8	16.81	3.4	18.0	44.3	29.0	5.3
红紫泥田	248	6.0~21.6	14.23		2.0	21.8	65.3	10.9
灰棕紫泥田	1011	7.3~28.6	16.46	3.9	12.8	51.7	26.6	5.0
红棕紫泥田	307	8.1~30.8	20.34	4.9	48.2	37.8	7.5	1.6

紫色水稻土速效钾含量的变幅很大在14~338mg/kg之间,平均为97.5mg/kg(表3)。在全国土壤速效钾分级标准中,属四级水平,有60%左右的土壤速效钾含量低于100mg/kg,土壤供钾能力属中等偏下水平,即紫色水稻土对钾紫的供应总体来讲是不足的。不同土壤之间的差异大致同土壤全钾相似,土壤速效钾含量与土壤全钾含量之间存在一定的依存关系($r = 0.576^{**}$, $n = 40$),全钾含量高的土壤,其速效钾含量通常也较高。红棕紫泥田、灰棕紫泥田和红紫泥田速效钾在100mg/kg以下的土壤分别为50.8%、58.2%和72.9%。

表 3 紫色水稻土速效钾状况

Table 3 Available potassium of paddy soils developed from purple soils

土壤 Soil type	样本数 Number of soils	变幅 Range (g/kg)	均值 Mean (g/kg)	分配状况 Distribution of total K (g/kg, %)					
				>200	200~150	150~100	100~50	50~30	<30
紫色水稻土	1566	14~338	97.5	4.7	11.1	24.8	48.3	10.1	
红紫泥田	248	14~224	85	1.2	9.4	16.5	53.2	14.5	1.0
灰棕紫泥田	1011	32~338	97.7	5.7	11.2	24.6	50.2	8.3	5.2
红棕紫泥田	307	32~287	107	4.3	13.0	31.9	38.1	12.7	

2.1.2 土壤钾的形态与作物对钾的吸收

紫色水稻土钾素营养主要是继承母岩物质,一部分由粘粒中的次生矿物晶格中和边缘的钾以及土壤速效钾的形态存在,一部分由粉砂中的长石、白云母等原生矿物所保持^[3]。从植物营养角度出发,土壤钾可分为矿物钾、缓效钾和速效钾(交换性钾和水溶性钾)三种形态。紫色水稻土钾的形态分配与其他类型土壤相似(表4),存在于矿物晶格中或深受结构束缚的矿物钾如长石、白云母中的钾是土壤钾的主体,占土壤钾的95.1~98.9%,以红紫泥田的比例较高,灰棕紫泥田和红棕紫泥田的比例比较接近;存在于层状硅酸盐矿物层间和颗粒边缘的缓效钾以及存在于土壤胶体表面的交换性钾和水溶液中的水溶性钾(合为速效钾)仅占土壤钾的0.421~3.65%和0.225~1.321%,以红紫泥田最低。尽管缓效钾被认为是土壤钾素供应潜力的化学指标,速效钾,特别是根际土壤中的速效钾是当季作物钾素的主要来源^[7],但是以每公顷耕层土壤225万公斤,紫色水稻土耕层土壤速效钾含量为100mg/kg,缓效钾550mg/kg来计算,紫色水稻土一年二熟所带走的钾约为速效钾1.4~2.0倍,缓效钾的40~50%,即一季作物就可基本上耗尽土壤的速效钾,2~3年就可耗尽土壤缓效钾。然而,作物(水稻或小麦)栽种前后,土壤速效钾和缓效钾并没有显著下降。在作物收获后短时间内,土壤速效钾和缓效钾就可恢复到土壤原来的水平或接近原来的水平。作物在整个生长期内吸收的钾主要是来源矿物钾占76.95%(表5),来源于土壤速效钾和缓效钾仅占10.81%和12.24%,这样以土壤速效钾或缓效钾的含量来表征土壤钾的有效性的高低,显然是不够的。作物在其生长过程中是否表现缺钾症状,依赖于土壤矿物钾→缓效钾→速效钾这一个转化方向的转化速度或土壤钾的释放速度。

表 4 紫色水稻土钾的形态分配(%)

Table 4 Distribution of potassium in various forms in the soils.

土壤 Soil type	速效钾 Avail. K		缓效钾 Slowly avail. K		矿物钾 Mineral K	
	变幅 Range	均值 Mean	变幅 Range	均值 Mean	变幅 Range	均值 Mean
红紫泥田	0.225~0.712	0.426	0.421~1.37	1.01	98.1~98.8	98.57
灰棕紫泥田	0.334~1.321	0.654	1.83~3.65	2.64	95.1~97.8	96.71
红棕紫泥田	0.471~0.736	0.589	1.95~3.29	2.67	96.0~97.6	96.74
紫色水稻土	0.225~1.321	0.554	0.421~3.65	2.07	95.1~98.8	97.46

表 5 土壤钾的形态与作物对钾的吸收(%)

Table 5 Relationship of soil potassium forms and uptake of potassium by crops.

土壤 Soil type	速效钾 Rapidly avai. K		缓效钾 Slowly avai. K		矿物钾 Mineral K	
	变幅 Range	均值 Mean	变幅 Range	均值 Mean	变幅 Range	均值 Mean
红紫泥田	3.07~21.86	12.93	7.36~16.26	14.34	58.61~78.78	72.73
灰棕紫泥田	-1.62~15.84	10.47	5.78~16.72	12.24	62.45~83.67	77.29
红棕紫泥田	-3.42~13.62	8.59	6.82~12.32	9.62	68.26~89.85	81.79
紫色水稻土	-3.42~21.86	10.81	5.78~16.72	12.24	58.61~89.85	76.95

2.2 土壤矿物钾的释放

缓效钾为 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 煮沸一次性从土壤中浸提出来的钾,这部分是存在于2:1型粘土矿物晶层中(或称层间钾I),在2:1型粘土矿物晶层中还存在着另一个部分不能为 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 一次性提取的钾(称层间钾II,或也称矿物态钾),这部分矿物钾与土壤原生矿物晶格中的钾不一样,可为 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 进一步所提取,与缓效钾之间相互转化,或补充缓效钾的减少,它的存在状态及转化速度(释放速度)对土壤钾的有效性和植物对土壤钾的吸收有很大的影响^[8,9]。

2.2.1 土壤类型 用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 提取(除去)土壤缓效钾后,再用 $1.0\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HNO}_3$ 提取的土壤钾,可以认为是土壤矿物钾(主要是层间II)所释放的钾,其提取量能反映这部分矿物钾的释放能力。图1所示,土壤矿物钾的释放速率随着时间的延长逐步下降。但是总体来看,土壤矿物钾对缓效钾的补偿能力是十分强的,80分钟(连续8次)提取的矿物钾的累积释放量为土壤缓效钾的1.5~2.0倍,最初10分钟内土壤矿物钾的释放量可达缓效钾的27~44%,即使在80分钟时的释放量仍高达 $0.8\sim 8.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。三类紫色水稻土,矿物钾的释放为红棕紫泥田>灰棕紫泥田>红紫泥田,这一结果进一步说明了不同土壤上,作物吸钾与土壤形态关系上的差异(表5)。

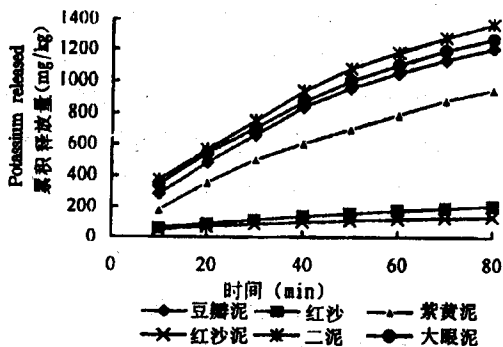


图1 土壤矿物钾的释放

Fig.1 Release of mineral K in soils

2.2.2 土壤颗粒 土壤中缓效钾和矿物钾含量的高低及转化是受土壤含钾矿物类型、数量和土壤性状的支配,在同一土壤中,不同粒径的土壤颗粒的矿物组成和数量比例是不同的,其缓效钾的含量和矿物钾的释放能力也就不同。图2所示,随着土壤颗粒粒径的增大,其缓效钾的含量和矿物钾的释放量都明显下降。80分钟的累积释放量比缓效钾高2.0~5.2倍;<0.002mm土壤颗粒的累积释放量比1~0.25mm土壤颗粒高7.0~7.5倍。<0.25mm土壤颗粒的缓效钾含量和矿物钾的释放能力均大于原土壤,只有1~

0.25mm土壤颗粒的缓效钾含量和矿物钾的释放量小于原土壤。各级土壤颗粒的加权平均值大于原土壤,即将土壤分解为各级土壤颗粒后有利于矿物钾的释放。

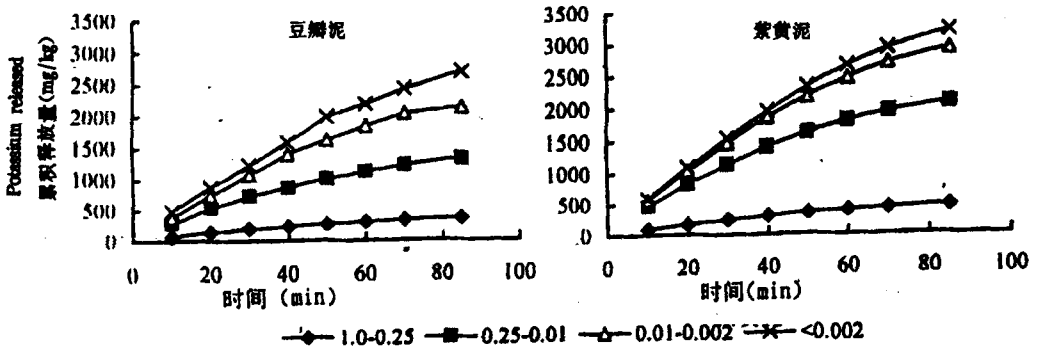


图2 土壤颗粒矿物钾的释放

Fig.2 Release of mineral K in soil particle

不同土壤缓效钾含量和矿物钾的释放能力的差异在各级土壤颗粒上也明显反映出来,豆瓣泥田大于紫黄泥田。

2.2.3 矿物钾释放的动力学 Martin和Sparks认为,土壤钾的释放符合一级动力学方程,也可以用其他一些动力学方程如抛物扩散方程,Elovich方程,零级方程等来描述^[10]。本文用一级动力学方程,Elovich方程和Freundlich方程拟合矿物钾释放量与时间的关系(图1,2)结果(表6)表明,这三种数学方程都能很好地用于描述矿物钾的释放。单从拟合动力学方程的相关系数r值及其变异系数来看,以Freundlich方程的拟合程度最好,以一级动力学方程的吻合性相对较差。一级动力学方程参数Ka,Elovich方程的参数b和Freundlich方程的参数m,从动力学方程的表达式来看,这三个参数在相当程度上都可以认为是反映动力学过程的速度参数,即该值的大小反映了土壤在给定条件下,矿物钾的释放速度。累积释放量与这三种参数值之间都达到了显著性相关(r值分别为0.636*,0.999**和-0.583*,n=14),并且,直观上,累积钾释放量与一级动力学方程Ka值和Freundlich方程m值之间的规律性不明显,只有Elovich方程参数b值与累积钾释放量之间规律性最好,相关系数也最大,从这一意义上说,Elovich方程是适合用于描述土壤矿物钾的释放,其参数b值能反映矿物钾的释放速度。表6所示,紫色水稻土矿物钾的释放能力为二泥田>大眼泥田>豆瓣泥田>紫黄泥田>红沙田>红沙泥田。b值随土壤颗粒粒径的增大而显著下降。

2.3 土壤速效钾的形成

土壤速效钾包括交换性钾和水溶性钾,它们随时都处于平衡与转化过程中,是作物吸收利用的土壤钾素形态,土壤是否出现缺钾症状,主要依赖于缓效钾或者矿物钾向速效钾的释放速度是否能补偿土壤速效钾因作物吸收而呈现的下降。

用1.0mol·L⁻¹NH₄OAc去除掉土壤的速效钾后,再用1.0mol·L⁻¹NH₄OAc所浸提的钾则可认为是土壤矿物钾或缓效钾向土壤速效钾的转化,或者是土壤速效钾的形成(补偿)(图3)。土

壤速效钾的形成速度随时间的延长急剧下降,其速效钾累积形成量逐步趋向于稳定,其稳定值只有红沙泥田和豆瓣泥田超过了原土壤速效钾。

表 6 矿物钾的释放动力学数学模型
Table 6 Kinetic equation of mineral potassium release

土壤 Soil type	一级动力学方程 First order kinetic equation $\ln q_t = Kt + \ln q_0$			Elovich方程 Elovich equation $q_t = a + blnt$			Freundlich方程 Freundlich equation $\ln q_t = \ln K + (1/m) \ln t$			
	Ka	q ₀	r	a	b	r	K	m	r	
红沙泥田	0.0132	53.1	0.962	-52.7	42.3	0.985	16.8	2.08	0.999	
红沙田	0.0162	64.4	0.927	-115.2	71.2	0.990	15.7	1.69	0.999	
紫黄泥田	0.0208	217.2	0.932	-714.3	367.2	0.992	33.0	1.29	0.995	
豆瓣泥田	0.0188	322.9	0.946	-830.5	456.2	0.989	59.3	1.43	0.996	
大眼泥田	0.0172	374.9	0.946	-774.0	458.2	0.989	81.9	1.58	0.999	
二泥田	0.0174	397.7	0.949	-848.1	492.8	0.987	86.2	1.57	0.996	
紫	1~0.25	0.210	80.7	0.928	-274.6	139.9	0.990	12.0	1.27	0.996
黄	0.25~0.01	0.0199	325.0	0.923	-956.2	506.6	0.993	52.9	1.34	0.994
泥	0.01~0.002	0.0225	447.6	0.928	-1792.7	879.1	0.988	58.4	1.19	0.995
田	<0.002	0.0228	530.0	0.928	-2233.7	1077	0.978	71.2	1.20	0.996
豆	1~0.25	0.0208	107.0	0.923	-335.2	181.2	0.992	16.1	1.28	0.994
瓣	0.25~0.01	0.0193	536.0	0.932	-1470.0	792.6	0.991	94.5	1.39	0.997
泥	0.01~0.002	0.0214	642.6	0.938	-2299.0	1154	0.986	94.7	1.26	0.998
田	<0.002	0.0222	661.8	0.943	-2594.7	1274	0.983	92.2	1.22	0.999

注:(1) q_t —累积释放量(mg/kg); t —时间(分钟);(2) $r_{0.05} = 0.707$; $r_{0.01} = 0.834$; $n = 8$

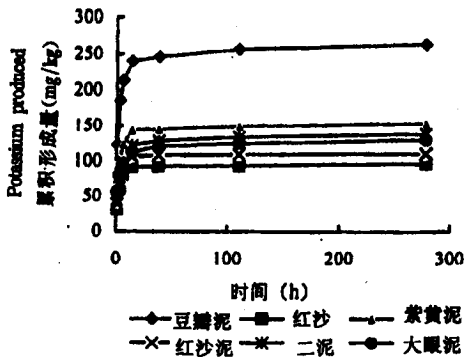


图3 土壤速效钾的形成

Fig.3 Production of available K in the soils

不同土壤速效钾的形成能力大小顺序与矿物钾释放能力的大小顺序不一致是两个过程的机理不同以及土壤性状综合引起的。矿物钾(主要层间II)的释放由矿物钾 \rightleftharpoons 速效钾和矿物钾 \rightleftharpoons 速效钾两过程决定,而速效钾的形成(补偿)由矿物钾 \rightleftharpoons 缓效钾和缓效钾 \rightleftharpoons 速效钾两过程决定。红紫泥田(红沙泥田和红沙田),土壤pH值低,风化程度高,由红色砂岩发育而成,土壤粘粒含量低,层间钾(I和II)都相对较低,土壤缓效钾和速效钾含量低,并且,矿物钾的释放能力和速效钾的形成能力也低,在27小时,速效钾的形成也趋于零,因而,在作物生长期间,速效钾的下降幅度相对较大,作物吸收的钾中土壤

速效钾占较高的比例(表5)。红棕紫泥田(大眼泥田和二泥田),土质粘重,富含蒙脱石、蛭石、伊利石等2:1型硅铝酸盐矿物^[6],层间钾的含量高,矿物钾的释放能力大,同时对钾的固定作用也强,其速效钾的补偿能力相对较差,但速效钾形成速度的下降幅度比红紫泥田低,因而以相对较低补偿能力,长时间地稳定地补偿土壤速效钾。灰棕紫泥田(紫黄泥田和豆瓣泥田)的矿物组成,土壤性状介于红紫泥田和红棕紫泥田间,不仅速效钾的含量较高,也利于速效钾的形成。

同样,用一级动力学方程,Elovich方程和Freundlich方程来拟合速效钾的形成量与时间之间的关系。结果(表7)表明,速效钾的形成累积量随时间的变化关系不满足一级动力学方程,Elovich方程和Freundlich方程的拟合达到了显著性水准,但拟合程度并不高,其中,又以Elovich方程相对较为理想,方程参数b值的大小顺序与土壤速效钾形成的累积量大小顺序是一致的,Elovich方程参数b值能反映不同土壤速效钾形成的速度。

表 7 土壤速效钾形成的动力学数学模型

Table 7 Kinetic equation of available potassium production in the soils

土壤 Soil type	Elovich方程 Elovich equation $q_t = a + b \ln t$			Freundlich方程 Freundlich equation $\ln q_t = \ln K + (1/m) \ln t$		
	a	b	r	k	m	r
	红沙泥田	57.9	11.7	0.872	55.3	6.33
红 沙 田	45.6	11.3	0.871	43.4	5.49	0.839
紫黄泥田	81.5	15.6	0.895	79.0	6.74	0.848
豆瓣泥田	154.4	22.9	0.915	152.5	8.44	0.872
大眼泥田	67.4	12.6	0.953	67.8	7.34	0.921
二 泥 田	60.2	14.3	0.936	59.4	5.43	0.886

参 考 文 献

- 1 农业部科学技术司. 中国南方农业中的钾. 农业出版社, 1991, 21~15.
- 2 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 科学出版社, 1987, 502~516.
- 3 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上册). 科学出版社, 1991, 214 221.
- 4 何天秀等. 钾肥对红皮萝卜产量及硝酸盐含量的影响. 西南农业大学学报(增刊), 1994, 总9: 48~50.
- 5 王成秋等. 柑桔配施氮、磷、钾肥效应研究初报. 中国南方果树, 1996, 25(1): 3~6.
- 6 屈明等. 四川紫色水稻土钾的形态和固定. 西南农业大学学报, 1993, 15(3): 189~193.
- 7 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 科学出版社, 1983, 109~119.
- 8 鲍士旦等. 土壤钾素供应状况的研究. 南京农学院学报, 1982, 5(1): 59~66.
- 9 Ganeshamurthy AN. Contribution of potassium from nonexchangeable source in soil to crops. Indian Soc. Soil Sci. 1985, 33: 60~66.
- 10 Martin. HW and Sparks, DL. Kinetics of nonexchangeable from two coastal plain soils. Soil Sci Am. J. 1983, 47: 883~887.

POTASSIUM RELEASE AND ITS AVAILABILITY IN PADDY SOILS DEVELOPED FROM PURPLE SOILS

Wei chao fu Yang Jianhong Qu Ming Xie Deti Wei Shiqiang

(College of resource and Environment, Southwest Agrt. Univ., Chongqing 400716)

Abstract There are medium contents of total K and lesser medium contents of available K in the paddy soils developed from purple soils so that soil K is not sufficient for potassium requirement of crops in short. Mineral K accounts for 76.95% of potassium uptaken by crops, while slowly available K and available K only accounts for 12.24% and 10.84%, respectively. The release of mineral K in the soils gradually decrease with prolonging of time and significantly increase with decreasing of size of soil particle. The accumulative releasing capacity of mineral K during 80 min is 1.5~2.0 times of slowly available K, and releasing capacity in 80 min can reach 0.8~8.8 mg/(kg.min). The formation of soil available K may tend towards constant with extending of time. The inconsistency of sequences of releasing capacity of mineral K and forming capacity of available K in various soils results from their mechanisms and soil properties. The releasing processes of mineral K and the forming processes of available K can fit by the Elovich equation, in which b values can express the rate of these processes.

Key words Potassium availability Potassium release Mineral potassium Elovich equation Purple paddy soil