

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.09.021

长期施用化肥和秸秆对紫色土 非交换性钾释放特性研究^①

郑志斌¹, 江秋菊¹, 张跃强^{1,2}, 石孝均^{1,2}

1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 国家紫色土肥力与肥料效益监测站, 重庆 400716

摘要: 土壤非交换性钾的释放总量和释放速率是土壤供钾能力的重要指标. 本文采用 CaCl_2 连续提取的方法研究了 22 年长期不施肥(CK)、NP(不施钾肥)、NPK(施钾肥)、NPKS(钾肥与秸秆还田配施)和 S(单施秸秆)对紫色土非交换性钾释放特性的影响, 以期为紫色土钾素管理提供科学依据. 结果表明: 当运用不一样的施肥处理紫色土非交换性钾的释放全部是前期迅速释放、后期缓慢平稳释放的特点. 采用 4 种动力学方程对紫色土交换性钾的释放过程进行模拟发现, 前期快释放阶段(1~168 h)用 Elovich 方程(对数曲线方程)模拟最佳, 释放量占全过程的 74.2%~77.0%; 后期慢释放阶段(168~1472 h)用抛物线方程模拟效果最佳. 不同处理土壤非交换性钾的释放速率和释放量的差异有统计学意义, 其大小为: S>原始土壤>NPKS、CK>NPK>NP, 长期不施钾肥的 NP 处理非交换性钾的释放速率比 NPK 处理低 18.3%, 比试验前土壤低 26.7%; 该处理土壤的非交换性钾累积释放量(133.32 mg/kg)仅占 NPK 释放量的 78.69%; 化肥配施秸秆土壤非交换性钾释放量为 176.26 mg/kg, 释放速率为 16.13 mg/kg·h⁻¹ 略高于氮磷钾施肥, 秸秆还田能够提高紫色土供钾能力.

关键词: 非交换性钾; 释放动力学; 化肥; 秸秆; 紫色土

中图分类号: S143.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)09-0139-06

长期以来, 紫色土被认为是南方钾素含量最丰富的土壤^[1], 但是在长年不间断性的多熟高产栽培方式下, 其钾素无法达到满足所需的状况愈发严重, 这已经变为粮食高产优质的重要障碍因素之一^[2]. 一般情况下, 土壤钾有 4 种样式: 土壤水溶液钾、交换性钾、非交换钾、矿物钾^[3]. 水溶性钾和交换性钾(统称速效钾)是作物直接有效的钾源. 非交换性钾是土壤速效钾的储备库, 是土壤供钾能力的潜在指标. 大量研究表明, 由于长期的耕种和钾肥施用不足, 我国土壤交换性钾下降明显, 所以非交换性钾的贮存和释放对植物钾素营养非常重要^[4-5]. 非交换性钾主要存在于 2:1 型粘土矿物如云母和蛭石^[6]层状硅酸盐中, 非交换性钾释放速率和释放量与粘土矿物类型有关. 秸秆含有大量钾素^[7], 在红壤水稻土 30 年的研究表明, 秸秆还田能够提高土壤非交换性钾质量分数^[8]. 通常情况下, 土壤非交换性钾释放动力学模型运用 4 种方程表示: 零级动力学方程、一级动力学方程、抛物线扩散方程、Elovich 方程^[9-10]. 依据相关探究显示, 土壤中钾释放是一类复杂反应, 主要是通过 2 个不一样的过程引发的^[11-12], 提倡运用分段回归模型表示, 当斜率(b)和截距(a)直线分段回归模型不一样时, 能够将不一样释放率过程描绘为不同的机制, 本文以中性紫色土

① 收稿日期: 2015-07-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B04, 2012BAD05B03); 国家自然科学基金项目(201203030, 201003016); 中国烟草总公司重庆市公司项目((NY20130501070007).

作者简介: 郑志斌(1990-), 男, 四川德阳人, 硕士, 主要从事养分资源管理.

通信作者: 石孝均, 研究员, 博士研究生导师.

为研究对象,分析了长期施用化肥和秸秆还田对紫色土非交换性钾释放特性的影响,以期对紫色土钾素管理提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

供试土壤来自国家紫色土肥力与肥料效益长期定位试验的原始耕层土壤(1991年)和2013年水稻收获后的耕层(0~20 cm)土壤(即长期试验22年后的耕层土壤).长期试验共设13个处理,本研究选取其中的5个处理的耕层土壤进行研究:①CK,只种作物、不施肥;②NP,不施钾肥、仅施氮磷肥;③NPK,施氮磷钾肥;④NPKS,氮磷钾肥与秸秆还田配施;⑤S,单施秸秆.试供土壤属紫色土类,中性紫色土亚类,通常情况下,蒙脱石和云母-蒙脱石混层层间矿物的质量分数在土壤黏土矿物中最大,其次才是云母的质量分数.一般情况下,一年种植2次,水稻和小麦替换着种植,1991年到1996年一季度作物每公顷施肥量为氮肥150 kg(N),磷肥75 kg(P₂O₅),钾肥75 kg(K₂O).从1996年秋季开始,磷、钾肥的使用量从以前的75 kg 变换为60 kg;小麦氮肥使用量变换为135 kg,秸秆还田每年在小麦季施入,用量为7.5 t/hm².

1.2 土壤非交换性钾释放动力学试验

土壤非交换性钾释放动力学试验采用连续交换法.具体步骤如下:

1) Ca²⁺饱和土壤的制取^[13-14]:量取10 g土样(过1 mm筛)放在10 mL离心管中,注入0.25 mol/L CaCl₂溶液50 mL,并且在250 r/min摇荡0.5 h,再在3 500 r/min离心3 min,将上层的清液除掉,像上面反复3次;再注入50 mL无水乙醇在250 r/min下摇荡15 min后,离心3 min,反复2次;再注入50 mL蒸馏水摇荡15 min后离心3 min,反复2次,一直到没有Cl⁻(AgNO₃检验),然后在60℃烘干后碾磨过0.25 mm筛.

2) 土壤非交换性钾释放试验^[14]:量取4份1.000 g Ca²⁺饱和土壤放在50 mL离心管中,注入20 mL 0.01 mol/L CaCl₂在25℃下间断性摇荡(250次/min,试验期间每天2次,一次1 h),再在10 000 r/min下离心10 min,将上层的清液除掉留下备用,用火焰光度计测定钾含量.提取时间分别为1,6,12,24,48,96,168,272,416,560,728,896,1 064,1 232和1 472 h.

1.3 有关参数计算及统计方法

土壤非交换性钾的释放动力学用下列动力学方程进行模拟
零级反应方程:

$$K_0 - K_t = a - bt$$

抛物线扩散方程:

$$K_t = a + bt^{1/2}$$

一级反应方程:

$$\ln(K_0 - K_t) = a - bt$$

对数曲线方程:

$$K_t = a + b \ln t$$

式中: a 和 b 都是常数; t 为释放时间; K_0 为钾的最大释放量; K_t 为在时间 t 时钾的释放量.标准差 $SE = [(K_t - K)^2 / (n - 2)]^{1/2}$ (K_t 和 K 为在 t 时间段内测定和计算得到的钾释放量, n 为测定的次数).

试验数据用SPSS Statistic 20.0软件和Microsoft Office软件进行分析.试验数据的差异水平通过Duncan法检验, $p < 0.05$ 时具有统计学意义.

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥条件下紫色土非交换性钾的释放动态

由图1可知,各类方法的钾素释放全部是前期迅速释放、后期缓和 平稳释放的特性.各施肥处理

土壤得到的非交换性钾累积释放量都在 133.3~210.4 mg/kg 之间, 当运用不一样施肥方法去处理土壤的非交换性钾释放总量差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 长久不施钾肥的 NP 处理非交换性钾累积释放量最低仅仅为 133.3 mg/kg, 仅占 NPK 释放量的 78.69%; 在氮磷钾的基础上配施秸秆(NPKS 处理)以及单施秸秆(S 处理)钾素释放总量分别为 176.3 mg/kg 和 210.4 mg/kg, 都高于 NPK 处理; 说明秸秆能够明显提高紫色土非交换性钾的质量分数和释放量.

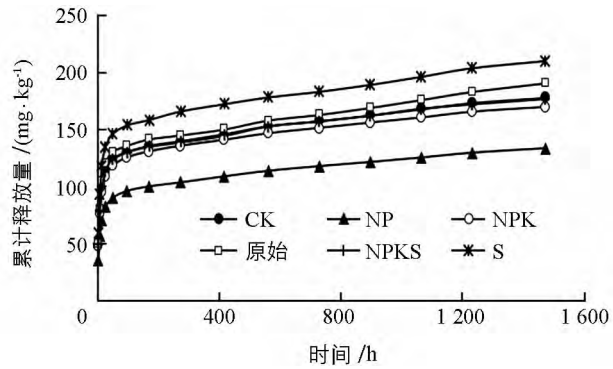


图 1 紫色土不同施肥处理非交换性钾累积释放量

2.2 长期不同施肥紫色土非交换性钾释放动力学方程模拟

当运用不一样施肥方式去处理土壤非交换性钾释放过程用 4 种动力学方程实施拟合的成果如表 1 所示. 决定系数的值分别为: 对数曲线方程(0.982) > 一级反应方程(0.926) > 抛物线(0.829) > 零级方程(0.672). 标准差(SE)大小顺序为对数曲线(5.11 mg/kg) < 抛物线(15.55 mg/kg) < 一级反应(18.41 mg/kg) < 零级反应(21.48 mg/kg). 由上面能够得到, 对数的 R^2 最高, 标准差最小, 说明所有处理紫色土非交换性钾的释放过程以 Elovich 对数曲线方程拟合最好, 该释放是扩散控制过程.

表 1 长期不同施肥条件下紫色土非交换性钾 4 种动力学方程及参数

处理	零级动力学方程			一级动力学方程		
	拟合方程	R^2	SE	拟合方程	R^2	SE
CK	$K_0 - K_t = -0.0606t + 73.06$	0.673	21.9	$\ln(K_0 - K_t) = -0.0021t + 4.36$	0.931	18.23
NP	$K_0 - K_t = -0.0467t + 56.31$	0.682	16.51	$\ln(K_0 - K_t) = -0.002t + 4.10$	0.935	13.86
NPK	$K_0 - K_t = -0.0563t + 67.33$	0.662	20.83	$\ln(K_0 - K_t) = -0.0021t + 4.27$	0.932	17.62
NPKS	$K_0 - K_t = -0.0589t + 70.47$	0.664	21.69	$\ln(K_0 - K_t) = -0.0021t + 4.32$	0.936	18.39
S	$K_0 - K_t = -0.0694t + 85.27$	0.672	25.22	$\ln(K_0 - K_t) = -0.0019t + 4.50$	0.914	21.95
原始土样	$K_0 - K_t = -0.0642t + 80.87$	0.681	22.74	$\ln(K_0 - K_t) = -0.0018t + 4.44$	0.911	20.41
平均		0.672	21.48		0.926	18.41

处理	对数方程			抛物线方程		
	拟合方程	R^2	SE	拟合方程	R^2	SE
CK	$K_t = 16.479 \ln t + 52.212$	0.983	5.04	$K_t = 2.6149t^{1/2} + 87.023$	0.833	15.85
NP	$K_t = 12.631 \ln t + 36.668$	0.987	3.38	$K_t = 2.0134t^{1/2} + 63.19$	0.841	11.6
NPK	$K_t = 15.452 \ln t + 52.357$	0.986	4.25	$K_t = 2.4399t^{1/2} + 85.213$	0.825	15.08
NPKS	$K_t = 16.132 \ln t + 53.95$	0.984	4.73	$K_t = 2.5504t^{1/2} + 88.197$	0.825	15.69
S	$K_t = 18.874 \ln t + 64.675$	0.98	6.27	$K_t = 2.9897t^{1/2} + 104.64$	0.825	18.3
原始土样	$K_t = 17.238 \ln t + 55.04$	0.97	6.97	$K_t = 2.7457t^{1/2} + 91.274$	0.826	16.78
平均		0.982	5.11		0.829	15.55

2.3 长期不同施肥紫色土非交换性钾释放的分段回归模型

从表 2 可知, 第一阶段(1~168 h)零级方程的 R^2 平均值为 0.570, 对数曲线方程的 R^2 平均值为 0.985, 一级反应的 R^2 均值为 0.698, 抛物线的均值为 0.781. 因此第一阶段中对数曲线的 R^2 值最高. 而且在此阶段对数曲线方程 SE 在 2.73~5.82 mg/kg 范畴内, 均值为 4.25 mg/kg, 并且是这几个方程中 SE 最低值. 因此在第一阶段(1~168 h)运用不一样的施肥方式去处理土壤非交换性钾的释放过程以对数曲线方程拟合成效最好. 第二阶段(168~1472 h)中抛物线方程 R^2 最高, SE 最低, 均值分别为 0.994 和 0.97. 因此在此阶段抛物线扩散方程对非交换性钾释放的累积效果拟合最好. 因此运用不一样的施肥方式去处理土壤交换性钾的释放过程以对数曲线方程(第一阶段)和抛物线扩散方程(第二阶段)拟合最好.

表 2 长期不同施肥处理在 2 个阶段(1~168 h, 168~1 472 h)的钾累积释放 4 种动力学方程模拟相关参数

处理	零级反应				对数曲线				一级反应				抛物线			
	1~168 h		168~1 427 h		1~168 h		168~1 427 h		1~168 h		168~1 427 h		1~168 h		168~1 427 h	
	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE
CK	0.576	22.52	0.986	1.93	0.987	3.89	0.959	3.27	0.704	20.95	0.939	9.93	0.787	15.85	0.995	1.07
NP	0.594	16.46	0.986	1.44	0.989	2.73	0.967	2.25	0.722	15.2	0.949	6.43	0.803	11.47	0.998	0.53
NPK	0.58	21.04	0.987	1.65	0.987	3.72	0.966	2.64	0.717	19.5	0.938	8.18	0.79	14.91	0.998	0.68
NPKS	0.573	22.22	0.984	1.95	0.986	4.09	0.965	2.86	0.705	20.68	0.954	8.82	0.784	15.86	0.997	0.88
S	0.552	22.61	0.993	1.62	0.983	5.22	0.948	4.25	0.675	24.97	0.916	11.26	0.767	19.15	0.991	0.17
原始	0.543	24.86	0.998	0.8	0.975	5.82	0.923	5.1	0.662	23.47	0.928	11.26	0.757	18.12	0.982	2.48
平均	0.57	21.62	0.989	1.57	0.985	4.25	0.955	3.4	0.698	20.8	0.937	9.31	0.781	15.89	0.994	0.97

土壤非交换性钾的释放特征在模拟的 1~168 h 和 168~1 472 h 时间段存在明显差异, 前期释放快、后期释放慢, 即存在钾素的快释放和慢释放 2 个阶段. 分段累积释放如表 3 所示, 在 1~168 h 时间段内, 各处理释放速率为 18.6~22.6 mg/d, 是第二阶段释放速率的 20~23 倍; 第一阶段各处理的钾累积释放量在 99.91~158.40 mg/kg 之间, 其释放量占据总量的 74.15%~78.18%, 体现了第一阶段(1~168 h)释放速率比较快, 为钾素快速释放阶段; 第二阶段(168~1 472 h)释放量比较小, 释放速率也比较缓慢. 尽管不同处理释放量和释放速率存在差异, 但是所有处理在第一阶段的释放量占整个培养期释放总量的比例相差不大, 均在 75% 左右, 说明钾素的释放除受施肥影响外, 还受土壤本身矿物的影响.

根据非交换性钾累积释放最优方程对数曲线方程(1~168 h)和抛物线方程(168~1 472 h)的模拟参数表 2 能够得到: 在 1~168 h 这一时间段内, 运用不一样方式去处理非交换性钾释放对数曲线方程参数差别比较大, 其中长期不施钾肥的 NP 处理的 a, b 都较小, 表示释放速率的 b 值比施钾 NPK 处理低 11.1%. NPKS 处理 b 值为 17.50, 略高于 NPK 处理, 所以在 1~168 h 时间内化肥配施秸秆对非交换性钾释放速率略有增高. S 处理土壤, 原始土壤的 a, b 较大, CK 与 NPK 处理的 a, b 值差异较小. 在 168~1 472 h 这一时间段内, 各处理方式中抛物线参数值差别与对数曲线相同, 均表明了 NP 处理最低, S 处理最高. 这体现了在 1~168 h 和 168~1 472 h 2 个时间段内都体现了长久缺钾处理的 NP 非交换性钾释放速率最低, 长久缺钾的 CK 处理与全量施肥的 NPK, NPKS 等秸秆混施的处理非交换性钾释放速率相差不大, 长久只施秸秆的 S 处理释放速率最高.

表 3 不同施肥处理非交换性钾释放的对数曲线方程和抛物线方程参数

处理	第 1 阶段(1~168 h)				第 2 阶段(168~1 472 h)				第一阶段释放量占全过程释放量比例/%
	释放量/ (mg · kg ⁻¹)	释放速率/ (mg · d ⁻¹)	对数方程参数		释放量/ (mg · kg ⁻¹)	释放速率/ (mg · d ⁻¹)	抛物线方程参数		
			a	b			a	b	
CK	134.95	19.28	49.88	17.8	43.08	0.79	110.5	1.759	75.80
NP	99.91	14.27	35.56	13.32	33.41	0.61	81.79	1.338	74.94
NPK	130.43	18.63	49.92	16.73	38.98	0.72	109.5	1.558	76.99
NPKS	135.27	19.32	51.42	17.5	40.99	0.75	112.5	1.668	76.74
S	158.4	22.63	61.89	20.41	51.99	0.96	131.2	2.018	75.29
原始土样	141.42	20.2	52.39	18.81	49.3	0.91	112.1	1.975	74.15

2.4 长期不同施肥紫色土非交换性钾与产量的关系

在长期高产高效的大田耕作模式下, 当钾肥施用量不能满足作物需求时, 非交换性钾将成为作物钾素的主要来源. 表 4 中非交换性钾与产量相关性分析表明, 非交换性钾的释放量与作物产量的正相关分析有统计学意义($p < 0.05$). 对紫色土长久施肥 NP, NPK, NPKS 处理非交换性钾释放总量及最佳拟合方程的释放速率 b 与其对应的作物产量的相关分析结果表明, 在各时间段内, 紫色土非交换性钾释放量与释放速率与小麦产量呈正相关性, 与水稻产量和周年产量的正相关分析有统计学意义($p < 0.05$). 表明土壤非交换性钾的释放总量与释放速率与作物的产量的相关性有统计学意义.

表4 非交换性钾释放量和参数 b 与作物产量的简单线性相关

产量/ (kg · hm ⁻¹)	1~1 472 h		1~168 h		168~1 472 h	
	释放量	b	释放量	b	释放量	b
小麦产量	0.946	0.957	0.938	0.953	0.975	0.989
水稻产量	1	0.999	1	0.999	0.992	0.98
年产量	0.998*	0.999	0.996	0.999	0.999	0.993

3 讨论

Sparks 和 Jardine^[15] 探究钾在高岭石、蒙脱石和蛭石矿物体系的吸附期间,得到高岭石和蒙脱石对钾的吸附能够运用一级反应方程实施很好的拟合,然而蛭石对钾的吸附则体现出 2 个速率不一样的一级反应.紫色土长期施肥各处理的非交换性钾素释放都体现了前期释放比较快,后期缓和平稳的特性,这一过程运用(1~1 472 h)Elovich 方程模拟成效最好.前期(1~168 h)反应重点是非特殊吸附钾的释放,其速率比较快;后期(168~1 472 h)重点是特殊吸附钾的释放,钾离子在 2:1 型粘土矿物模型位内和晶层,其释放反应速率比较缓慢,这样的 K 值能够准确反应非交换性钾释放的真实状况.这与 Hosseinpur 等^[16] 探究成果一致,其在对爱尔兰土壤非交换性钾释放的探究中,得到对数曲线方程和抛物线扩散方程全能很好的拟合土壤非交换性钾释放.不同施肥处理土壤非交换性钾释放不同时间段内释放量和释放率具有很大的差别,然而,释放比例比较固定,和土壤的含钾矿物紧密相连.

长时间内不施钾肥的 NP 处理释放速率比 NPK 处理小 18.3%,因此该处理土壤的非交换性钾累积释放量(133.32 mg/kg)远远小于 NPK 处理,仅仅是 NPK 释放量的 78.69%;然而,一样长时间内不施钾肥的 CK 处理非交换性钾累积释放量为 178.03 mg/kg,明显高于 NPK 处理.主要是因为 NP 处理施用氮肥,稻麦的籽粒和秸秆产量更高,从土壤得到的钾素量更多,土壤钾严重亏缺.NPKS 处理的释放速率和释放量略高于 NPK 处理,秸秆还田能够缓解土壤钾素亏缺,增加土壤非交换性钾.而单施秸秆 S 处理远高于其他各个处理,甚至高于原始土样,主要是该处理产量较低,钾素的投入高于输出,土壤钾素盈余.总的来说,在作物高产高效的栽培模式下,每季每公顷施用 60 kg 化学钾肥,会导致土壤钾素亏缺,土壤非交换性钾的释放总量和释放速率降低,秸秆还田能够明显提高土壤的非交换性钾释放速率和释放总量,有利于获得作物高产.

参考文献:

- [1] 熊毅,李庆远.中国土壤[M].2版.科学出版社,1987.
- [2] 屈明,魏朝富,谢德体,等.四川紫色水稻土钾的形态和固定[J].西南农业大学学报,1993,15(3):1-5.
- [3] 谢建昌,周健民.我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J].土壤,1999(5):244-254.
- [4] 占丽平.作物种植对土壤钾素形态转化、运移及供应能力的影响[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [5] MENGEL K. Dynamics and Availability of Major Nutrients in Soils [J]. Advances in Soil Science, 1985(2): 65-131.
- [6] MENGEL K, RAHMATULLAH X, DOU H. Release of Potassium from the Silt and Sand Fraction of Loess Derived Soils [J]. Soil Sci, 1998, 163(10): 805-813.
- [7] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等.不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J].农业工程学报,2010,26(6):272-276.
- [8] LIAO Y L, ZHENG S X, NIE J, et al. Long-Term Effect of fer-Tilizer and Rice Straw on Mineral Composition and Potassium Adsorption in a Reddish Paddy Soil [J]. Journal of Integrative, 2013, 12(4): 694-710.
- [9] MARTIN H W, SPARKS D L. Kinetics of Non-Exchangeable Potassium Release from Two Coastal Plain Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(5): 883-887.
- [10] 周米平,刘金华,杨靖民,等.吉林省黑土非交换性钾的释放动力学研究[J].吉林农业大学学报,2008,30(1):59-63.
- [11] ANDERSON R L, NELSON L A. A Family of Models Involving Intersecting Straight Lines and Concomitant Experimental Designs Useful in Evaluating Response to Fertilizer Nutrients [J]. Biometrics, 1975, 31(2): 303-318.
- [12] SHUAI X, ZHOU Z, YOST R S. Using Segmented Regression Models to Fit Soil Nutrient and Soybean Grain Yield Changes Due to Liming [J]. Journal of Agricultural, Biological and Environment Statistics, 2003, 8(2): 240-252.
- [13] SRIVASTAVA S, RUPA T R, SWARUP A. Effect of Long-Term Fertilization and Manuring on Potassium Release

- Properties in a Typic Ustochrept [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 165(3): 352–356.
- [14] SRINIVASARAO C H, RUPA T R, RAO A S, et al. Release Kinetics of Nonexchangeable Potassium by Different Extractants from Soils of Varying Mineralogy and Depth [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(3/4): 473–491.
- [15] SPARKS D L, JARDINE P M. Comparison of Kinetic Equations to Describe K-Ca Exchange in Pure and in Mixed Systems [J]. *Soil Science*, 1984, 138(2): 115–122.
- [16] HOSSEINPUR A R, MOTAGHIAN H R. Application of Kinetic Models in Describing Soil Potassium Release Characteristics and Their Correlations with Potassium Extracted Chemical Methods [J]. *Pedosphere*, 2013, 23(4): 482–492.

Study of the Effects of Long-Term Chemical Fertilization and Straw Returning on the Characteristics of Nonexchangeable Potassium Release in Purple Soil

ZHENG Zhi-bin¹, JIANG Qiu-ju¹,
ZHANG Yue-qiang^{1,2}, SHI Xiao-jun^{1,2}

1. School of Resources and Environmental Science, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. National Monitoring Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Purple Soils, Chongqing 400716, China

Abstract: The total release amount and release rate of soil nonexchangeable K are important parameters of the potassium supply capacity of the soil. In order to provide a scientific guidance for potassium management in purple soil, the release characteristics of nonexchangeable K in purple soil in a long-term (1991–2013) experiment were investigated, in which the CaCl_2 sequential extraction method was used and 5 fertilizer treatments were made: no fertilizer (CK), chemical NP fertilizer (NP), chemical NPK fertilizer (NPK), straw returning with chemical NPK fertilizer (NPKS), and straw returning only (S). The simulation experiment showed the release of nonexchangeable K in purple soil was characterized by a rapid release in the early period (1–168 h) and a slow and stable release in the later period (168–1 472 h) in all the treatments. Four kinds of kinetic equations were tested for their suitability to describe the release of non-exchangeable K. The result showed that the release of nonexchangeable K during the early period accounted for 74.15%–76.99% of the total with a high release rate of nonspecific adsorption K, while the release of specific adsorption K during the later period was slower in purple soil. Elovich models were the best to simulate the early period, but parabolic diffusion models were the best to simulate the later period. The amount of release and release rate of purple soil showed significant difference between the 5 treatments (S>original>NPKS, CK>NPK>NP). The rate of non-exchangeable K release in the treatment NP was 18.3% lower than in the treatment NPK and was 26.7% lower than the original soil while its accumulations of non-exchangeable K release (133.32 mg/kg) was 78.69% of NPK. The rate of non-exchangeable K release in the treatment NPKS was 176.26 mg/kg, and its rate was 16.13 mg/kg·h⁻¹, a little higher than in the treatment NPK, indicating that straw returning can improve the content of non-exchangeable potassium obviously in purple soil.

Key words: nonexchangeable potassium; release kinetics; chemical fertilizer; straw; purple soil

责任编辑 包颖