

不同土壤钾素淋溶特性的初步研究^①

董艳红^{1,2}, 王火焰^{1*}, 周健民¹, 任正文^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过室内土柱淋溶试验, 研究降雨情况下不同土壤钾素的淋溶特性及其与土壤性质的关系, 结果表明: 未施钾的自然土壤, 在降雨量较小时(87 mm), 决定钾素淋溶状况的主要土壤因子是土壤质地, 质地越轻, K^+ 淋溶量越大; 降雨量较大时(435 mm), 决定钾素淋溶状况的主要因子则为速效钾, 田间速效钾含量愈大, 淋溶风险愈大。外源钾施入土壤后, 在降雨量较小时(87 mm), 钾素淋溶状况主要受土壤粉粒和缓效钾的影响, 粉粒含量和缓效钾越大, 淋溶量越小; 降雨量较大时(435 mm), 钾素淋溶状况主要受全钾和缓效钾的影响, 其值越大淋溶量越小。在降雨量充足、田间排水不畅的情况下, 短时间内(2 h)土壤钾肥表观淋出率仅与粉粒含量呈显著负相关关系, 土壤的质地是影响钾淋溶主要因子; 长时间(24 h)淋溶后钾肥表观淋出率则与土壤 pH、粉粒、全钾、缓效钾和长石含量均呈显著负相关关系, 其中全钾和粉粒的影响作用最大。

关键词:钾淋溶; 降雨; 土壤性质; 质地

中图分类号: S151.9⁺3

钾作为植物生长必需的大量元素, 对农作物的高产、优质和抗逆性有着举足轻重的作用。植物所吸收的钾主要来自于土壤, 而土壤中的钾元素以离子形态对作物提供营养, 其较强的移动性决定了钾素的淋溶损失是农田土壤钾素损失的重要部分。已有研究表明, 淋失作用是导致化肥利用率低的主要原因, 尤其是在降雨量大、渗透率低、阳离子交换量低的土壤上^[1]。在我国钾肥资源匮乏, 国际钾肥进口成本增加^[2]的多重压力下, 研究土壤的钾素淋溶特性, 减少钾素淋溶损失, 提高肥料利用率显得尤为重要。

农田土壤养分淋失的影响因素很多^[3-6], 可以概括为外界影响因素(降雨、施肥、作物及耕作措施等)和土壤性质因素两个方面。钾元素作为可溶性养分, 其移动和淋失与水分同步, 降雨成为影响钾素淋溶的重要外界因素之一^[7-8]。而在外界因素相同的状况下, 影响钾素淋溶的土壤性质则主要有 pH^[8]、土壤矿物类型^[9]、交换性钾的含量^[10]、质地组成^[11]等。但是, 已有的关于土壤钾素淋溶的研究结果由于研究条件不同而各有差异, 对于影响土壤钾素淋溶的主要土壤性质没有得出统一的结论, 基于多种土壤的系统研究则更为罕见。

本研究选取 14 种土壤进行室内土柱淋溶试验,

模拟不同降雨情况下农田土壤钾素的淋溶状况, 研究不同土壤钾素淋溶特性的差异, 分析土壤性质与淋溶特性的关系, 进而确定影响钾素淋溶特性的主要土壤因子。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及基本性质测定方法

供试的 14 种土壤分别采自湖南长沙、江西鹰潭、湖北蕲春、湖北潜江、安徽芜湖、黑龙江海伦、河南封丘、安徽广德、安徽怀宁、山东莱阳、江苏常熟、江苏盐城、重庆、河北衡水。土壤样品经风干后过 2 mm 筛。按照鲁如坤^[12]的《土壤农业化学分析方法》测定土壤的基本理化性质: 土壤 pH 测定采用 Sartorius 普及型(PB-10)pH 计(水土比为 2.5:1); 阳离子交换量(CEC)测定采用乙酸铵交换法; 有机质(OM)测定采用重铬酸钾容量法; 全钾测定采用氢氟酸-高氯酸消煮法; 速效钾测定采用乙酸铵提取法; 缓效钾测定采用硝酸煮沸法; 土壤体积质量与饱和含水量测定采用环刀法; 土壤质地组成测定采用吸管法; 采用 X' PERT PRO X 射线衍射仪(HX041)测定土壤的矿物类型, 并将其分别按照长石、非长石含钾矿物及含钾矿物总量等进行归类。土壤基本理化性质见表 1。

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203013)、国际植物营养研究所(IPNI)和国际钾肥研究所(IPI)项目资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介: 董艳红(1987—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事土壤、作物营养与施肥方面的研究。E-mail: dyh.youxiang@163.com

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

采样点	土壤类型	pH	CEC (cmol/kg)	SOM (g/kg)	全钾 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)	缓效钾 (mg/kg)	体积质量 (g/cm ³)	饱和含水量 (g/kg)	砂粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	长石 (g/kg)	非长石钾 矿物(g/kg)	含钾矿物 总量(g/kg)
湖南长沙	水稻土	4.63	10.9	32.2	12.3	26.8	191	1.30	385	104	554	342	30.0	250	280
江西鹰潭	水稻土	4.93	10.4	15.4	10.5	87.7	143	1.31	339	402	322	276	0.0	175	175
湖北蕲春	水稻土	5.08	9.75	25.9	14.2	37.4	256	1.30	387	227	548	224	100.0	125	225
湖北潜江	水稻土	5.31	9.63	36.1	8.6	44.0	151	1.29	392	290	452	257	0.0	250	250
安徽芜湖	水稻土	4.99	10.6	21.4	17.0	33.0	302	1.29	385	206	572	222	75.0	150	225
黑龙江海伦	黑土	5.69	49.1	147	15.2	196	565	0.94	627	180	641	179	225.0	125	350
河南封丘	潮土	8.06	8.11	12.9	17.9	77.1	615	1.44	288	611	320	69	225.0	125	350
安徽广德	水稻土	6.06	7.15	0.78	12.9	49.3	303	1.46	299	264	588	148	50.0	175	225
安徽怀宁	水稻土	4.63	12.2	24.9	18.8	36.9	210	1.31	343	365	414	222	150.0	150	300
山东莱阳	潮土	4.69	7.77	6.89	16.3	42.6	813	1.53	256	650	259	91	275.0	175	450
江苏常熟	水稻土	5.15	20.2	45.3	17.0	47.6	334	1.30	39.2	120	576	304	150.0	200	350
江苏盐城	潮土	8.37	7.64	13.0	18.0	48.4	656	1.31	36.6	96	862	42	200.0	200	400
重庆	紫色土	7.78	22.5	13.5	19.0	73.9	513	1.44	32.2	294	572	134	150.0	175	325
河北衡水	潮土	8.27	13.7	15.5	18.1	82.2	882	1.31	30.8	150	740	109	175.0	175	350

1.2 淋溶方法

试验设施钾(K)与不施钾(CK)两个处理, 每个处理 3 个重复。施钾的处理整个土柱中加入等量的氯化钾, 施钾量为 200 mg/kg(以纯 K 计)。试验所用土柱为内径 5.4 cm, 高 25 cm 的 PVC 管, 淋溶液于底部收集。每个土柱装土 297.728 g, 使用相同力度均匀装入土壤。土柱顶部和底部均放置 200 目尼龙网, 分别起到减少加水对土壤的搅动影响及防止土壤渗漏到淋出液中的作用。装填土柱时特别注意将土柱边缘的土壤压实, 确保无贴壁水流入渗, 尽量减少管壁效应的产生。土柱装填结束后加入足量的水使土壤饱和, 第二天开始用去离子水淋

洗土柱。淋溶液 10 ~ 50 ml 收集一次, 并记录淋溶时间, 采用 M410 型火焰光度计测定淋溶液中 K⁺ 含量。有关数据分析与统计采用 Excel 和 SPSS19.0 进行。

2 结果与讨论

2.1 不同降雨量各土壤钾素淋溶状况

不考虑水分的蒸发与作物吸收的情况下, 模拟田间不同降雨量下(87、131、218 和 435 mm)不同土壤钾素淋溶状况, 其中 87 mm 和 435 mm 分别代表田间降雨量较小和降雨量较大的情况。87 mm 和 435 mm 降雨量下各土壤的淋溶指标见表 2。

表 2 降雨量为 87 mm 和 435 mm 各土壤的钾素淋溶指标
Table 2 Soil K leaching index under 87 mm and 435 mm rainfall

采样点	不施钾处理淋溶液 K ⁺ 平均浓度		施钾处理淋溶液 K ⁺ 平均浓度		淋溶液体积		不施钾处理 K ⁺ 累积淋溶量		施钾处理 K ⁺ 累积淋溶量		钾肥表观淋出率	
	(mg/L)		(mg/L)		(ml)		(mg/kg)		(mg/kg)		(%)	
	87 mm	435 mm	87mm	435 mm	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm
湖南长沙	2.69	0.77	83.7	24.9	85	885	0.77	2.29	23.9	74.1	11.6	35.9
江西鹰潭	4.66	3.85	75.2	24.8	99	899	1.55	11.6	25.0	75.0	11.7	31.7
湖北蕲春	2.39	1.46	45.7	22.8	85	885	0.68	4.33	13.1	67.8	6.19	31.8
湖北潜江	2.55	0.85	57.9	19.7	83	883	0.71	2.52	16.1	58.3	7.71	27.9
安徽芜湖	2.01	1.20	37.1	16.0	85	885	0.57	3.56	10.6	47.7	5.01	22.1
黑龙江海伦	19.5	7.85	82.2	19.6	13	813	0.85	21.4	3.59	53.5	1.37	16.0
河南封丘	3.46	1.53	35.0	12.6	114	914	1.33	4.69	13.4	38.7	6.03	17.0
安徽广德	2.22	0.91	38.0	11.4	111	911	0.83	2.80	14.2	34.8	6.67	16.0
安徽怀宁	2.76	0.65	51.3	10.6	98	898	0.91	1.97	16.9	32.1	7.99	15.1
山东莱阳	2.70	0.77	24.7	6.30	124	924	1.12	2.39	10.3	19.6	4.59	8.58
江苏常熟	1.46	0.75	14.1	6.05	83	883	0.41	2.23	3.92	18.0	1.76	7.86
江苏盐城	1.94	0.65	15.3	4.70	91	891	0.59	1.96	4.69	14.1	2.05	6.05
重庆	1.45	0.78	4.76	2.19	104	904	0.51	2.37	1.66	6.64	0.58	2.13
河北衡水	0.90	0.36	4.68	1.55	108	908	0.33	1.09	1.70	4.73	0.69	1.82

注: 钾肥表观淋出率 = (施钾处理 K⁺ 累积淋溶量 - 不施钾处理 K⁺ 累积淋溶量) / 施钾量(200 mg/kg) × 100, 下表同。

由表中可以看出,随降雨量增大,两处理 K^+ 淋溶液体积、 K^+ 累积淋溶量及钾肥表观淋出率逐渐增大,淋溶液 K^+ 平均浓度逐渐降低。降雨量较小为 87 mm 时,江西鹰潭的土壤钾肥表观淋出率最大,为 11.7%,重庆的土壤最小为 0.85%,14 种土壤平均淋出率为 5.28%。降雨量较大为 435 mm 时,湖南长沙的土壤钾肥表观淋出率最大为 35.9%,河北衡水的土壤最小为 1.82%,14 种土壤平均淋出率为 17.1%,是 87 mm 时淋出率的 3.24 倍。降雨量 87 mm 和 435 mm 时,不施钾处理 K^+ 累积淋溶量最大的分别为江西鹰潭和黑龙江海伦;施钾处理 K^+ 累积淋溶量最大的均为江西鹰潭。

这可能是由于江西鹰潭和黑龙江海伦的土壤速效钾含量较高,而速效钾能够反映土壤钾的投入和残余量^[10],因此其土壤溶液中易淋溶的 K^+ 浓度较

高,土壤钾较易淋溶。重庆及河北衡水的土壤缓效钾含量相对较高,缓效钾是指存在于膨胀性层状硅酸盐矿物层间和颗粒边缘上的一部分钾^[13],缓效钾高,土壤固钾及缓冲能力较强,淋溶液 K^+ 平均浓度较低,故淋溶量较小。另外,土壤类型也是影响 K^+ 淋溶量的重要因素。江西鹰潭和湖南长沙是红壤发育的水稻土,富含 1:1 型高岭组黏土矿物^[14],由一层硅氧四面体和一层铝氧八面体组成的晶层结构决定其不能形成闭合的孔穴,同时同晶置换产生的负电荷量很小,吸附阳离子能力很弱,所以 K^+ 易淋溶损失。

2.2 不同降雨量土壤钾素淋溶的影响因素

降雨量较小(87 mm)和降雨量较大(435 mm)时各淋溶指标及钾肥表观淋出率与土壤性质的 Pearson 相关系数列于表 3。

表 3 87 mm 和 435 mm 降雨量时土壤钾素淋溶指标与土壤性质的相关系数
Table 3 The correlation coefficient between soil K leaching index and soil properties under 87 mm and 435 mm rainfall

土壤性质	不施钾处理 K^+ 累积淋溶量		不施钾处理淋溶液 K^+ 平均浓度		施钾处理 K^+ 累积淋溶量		施钾处理淋溶液 K^+ 平均浓度		钾肥表观淋出率	
	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm	87 mm	435 mm
速效钾	0.169	0.884**	0.889**	0.893**	-0.345	0.036	0.277	0.080	-0.363	-0.175
pH	-0.244	-0.158	-0.129	-0.152	-0.576*	-0.606*	-0.604*	-0.605*	-0.581*	-0.616*
SOM	-0.074	0.816**	0.922**	0.840**	-0.242	0.256	0.496	0.310	-0.245	0.079
CEC	-0.176	0.758**	0.842**	0.781**	-0.468	-0.020	0.233	0.034	-0.473	-0.204
体积质量	0.164	-0.742**	-0.789**	-0.760**	0.142	-0.359	-0.529	-0.407	0.139	-0.208
饱和含水量	-0.174	0.761**	0.836**	0.783**	-0.179	0.368	0.533*	0.420	-0.177	0.213
砂粒	0.738**	-0.004	-0.057	-0.026	0.259	-0.019	-0.018	-0.043	0.233	-0.020
粉粒	-0.761**	-0.048	0.050	-0.022	-0.569*	-0.334	-0.301	-0.308	-0.551*	-0.348
黏粒	-0.028	0.095	0.017	0.089	0.537*	0.640*	0.580*	0.639*	0.554*	0.667**
全钾含量	-0.327	-0.225	-0.115	-0.209	-0.661*	-0.752**	-0.665**	-0.745**	-0.664**	-0.757**
缓效钾	-0.162	-0.034	0.079	-0.018	-0.692**	-0.706**	-0.592*	-0.692**	-0.704**	-0.753**
长石	-0.037	0.095	0.253	0.114	-0.651*	-0.631*	-0.456	-0.610*	-0.668**	-0.703**
含钾矿物总量	-0.169	-0.108	0.094	-0.085	-0.607*	-0.687**	-0.482	-0.671**	-0.617*	-0.715**

注：* 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平, ** 表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

不施钾处理,降雨量 87 mm 时 K^+ 累积淋溶量与土壤砂粒含量呈极显著正相关关系,与土壤粉粒含量呈极显著负相关关系;而降雨量 435 mm 时,累积淋溶量与土壤质地无相关关系,而与土壤速效钾、有机质、阳离子交换量及土壤饱和含水量呈显著正相关关系,与土壤体积质量呈显著负相关关系。对这些土壤性质与降雨量 435 mm 累积淋溶量作回归分析,回归方程为:不施钾处理 435 mm 降雨量时的累积淋溶量 = $0.112 \times \text{速效钾} - 2.429$, $r = 0.884$,系数的 t 检验 $P<0.1$,故其累积淋溶量与速效钾存在一定偏相关性。由此,未施钾的自然土壤,在降雨量较小时,决定钾素淋溶状况的主要土壤因子是土壤质地,质地越轻, K^+ 淋溶量越大;降雨量较大时,决定钾素淋溶状况

的主要因子则为速效钾,田间速效钾含量越大,土壤溶液中易交换的 K^+ 浓度越高,淋溶风险越大。

降雨量 87 mm 及 435 mm 钾肥表观淋出率及施钾处理 K^+ 累积淋溶量及淋溶液 K^+ 平均浓度均与土壤黏粒含量呈显著正相关关系,与土壤 pH、全钾、缓效钾及含钾矿物呈显著负相关关系。此外,87 mm 降雨量时钾肥表观淋出率及施钾处理的 K^+ 累积淋溶量还与土壤粉粒含量呈显著负相关关系。将这些淋溶指标与相关的土壤性质作回归分析,其方程见表 4,可见降雨量较小时淋溶指标与粉粒和缓效钾有一定偏相关性,且粉粒对其影响最大;而降雨量较大时的淋溶指标则与全钾和缓效钾有更强的相关性,全钾对其影响更大。由此可知,外源钾施入土壤后,在降雨量较小时,钾

表 4 87 mm 和 435 mm 降雨量时淋溶指标与土壤性质的回归方程($n = 14$)
Table 4 Regression equations between soil K leaching index and soil properties under 87 mm and 435 mm rainfall

回归方程(逐步回归方法)	回归系数	系数 t 检验显著性
施钾处理 87 mm 降雨量时累积淋溶量 = $29.6 - 0.018 \times \text{缓效钾} - 0.198 \times \text{粉粒}$	$r = 0.808$	$P < 0.05$
降雨量 87mm 钾肥表观淋出率 = $14.0 - 0.009 \times \text{缓效钾} - 0.091 \times \text{粉粒}$	$r = 0.807$	$P < 0.05$
施钾处理 435mm 降雨量时累积淋溶量 = $126 - 56.3 \times \text{全钾}$	$r = 0.752$	$P < 0.01$
降雨量 435mm 时钾肥表观淋出率 = $51.6 - 16.5 \times \text{全钾} - 0.021 \times \text{缓效钾}$	$r = 0.843$	$P < 0.05$

素淋溶状况主要受土壤粉粒和缓效钾的影响；降雨量增大后，钾素淋溶状况主要受全钾和缓效钾的影响。

土壤质地 在降雨量较小时决定了钾素淋溶状况，砂粒含量越高，质地越轻，钾淋溶量越大。Rosolem 等^[11]也发现相对黏质土，砂质黏壤土耕层以下钾的淋失量随施钾量增加而增加的趋势更显著。并且已有研究发现钾的固定一般随黏粒含量的增多而有加强的趋势^[15-17]。因此，土壤黏粒含量越高，土壤钾淋溶风险越小。可见，土壤质地是影响土壤钾素淋溶的重要因素之一。这是因为 K^+ 等可溶性养分在土壤中的淋溶与土壤水分的运动状况密不可分，而土壤质地是土壤固相物质各粒级土粒的配合比例，它通过对土粒的表面能、土壤孔隙尺度和分布的影响，对土壤水分入渗能力产生影响。土壤质地越重，黏粒质量分数越高，颗粒越细微，固体相比表面积越巨大，表面能高、吸附能力越强，粒间孔隙越小，吸水、保水性能越强^[18]，淋溶液淋出速率越慢， K^+ 的淋溶量则越小。另外发现，土壤黏粒含量与钾肥表观淋出率呈显著正相关关系，这是由于江西鹰潭和湖南长沙的土壤，其为红壤发育的水稻土，富含铁铝氧化物及高岭石，质地黏细，对土壤钾的固定能力较弱，钾淋溶量较大，导致整体相关分析结果存在偏差。将这两种土壤剔除后分析得另外 12 种土壤黏粒含量与 87 mm 及 435 mm 钾肥表观淋出率的相关系数分别为 0.261 和 0.482，均未达到显著水平。同时研究发现土壤黏土矿物类型不同，其固钾能力有明显差异^[9,16]。因此，分析土壤钾的淋溶不仅要关注土壤的粒径组成，还应该考虑土壤的黏土矿物的类型。

降雨量较大时，土壤孔隙中水分呈现饱和状态，对水分阻滞作用增强，质地的影响作用变弱，这时，土壤溶液中残余的 K^+ 浓度则决定了土壤钾的淋溶量。未施钾的自然土壤，其速效钾含量反映土壤中 K^+ 的残余量，影响了钾素的淋溶；外源钾施入土壤后，相当部分进入矿物晶层转变为缓效钾^[19]，未被固定的部分 K^+ 才能够随水淋溶。对于本文采用的自然耗竭土壤而言，其全钾及缓效钾含量越高，说明其土壤固持钾素的潜力越大，同时含钾矿物含量越多，对 K^+ 的保持能力也越强，因此土壤钾的淋溶量越小。

降雨量较大及较小两种情况下，14 种土壤的钾肥表观淋出率均与土壤 pH 呈显著负相关关系，即土壤 pH 越小，酸性越强，钾的淋溶量越大；土壤 pH 越大，碱性越强，钾的淋溶量越小，这与和林涛等^[8]研究的紫色土钾淋失量与土壤 pH 关系的规律基本相同，并基本符合我国南方酸性土壤持钾能力弱、北方中碱性土壤持钾能力强的现状。这是由于酸性土壤的水化铝离子常聚合成为大型的多价阳离子，吸附于黏粒矿物表面，一方面对晶片表面的蜂窝状空穴产生阻塞作用，防止 K^+ 进入空穴内，同时又发挥“楔子”作用，把相邻两晶片撑住，使它们不能闭合在一起，从而增大了晶片之间的距离，使酸性土壤固定钾的能力小于碱性土壤^[20]。此外，沈钦华等^[21]也研究发现盐酸对各种矿物的促释作用最强，表明在酸性条件下能够引起土壤矿物中钾的大量释放，从而导致钾淋溶量的增大。

2.3 不同淋溶时间各土壤钾素淋溶状况

自然条件下一次降雨量很大或者多次降雨总量很大时，如果田块排水不畅，雨水会在农田中积累，并随时间的推移慢慢下渗。此时，农田土壤中的养分容易随着雨水的下渗而产生淋溶，从而导致养分的淋失，降低了肥料的利用率。为模拟自然条件农田排水不畅时不同时间(2、6、12 和 24 h)土壤中钾的淋溶情况，用保持 5 cm 的液面的去离子水对土柱进行等强度的淋溶。选取 2 h 和 24 h 分别代表短时间及长时间的淋溶，其土壤钾淋溶状况见表 5。

由表 5 可知，随淋溶时间增加，两处理淋溶液体积、 K^+ 累积淋溶量及钾肥表观淋出率逐渐增大，淋溶液 K^+ 浓度逐渐减小。施钾处理 K^+ 累积淋溶量及淋溶液 K^+ 浓度均显著高于不施钾处理，而淋溶液体积则为不施钾处理略大于施钾处理，但其差异未达到显著水平。淋溶 2 h 和 24 h 后钾肥表观淋出率的最大值分别为安徽怀宁 6.86%、湖北潜江 20%；同时，最小值则均为重庆的紫色土，其值分别为 0.07% 及 0.38%。

短时间淋溶(2 h)，两处理土壤 K^+ 累积淋溶最大的分别为安徽怀宁和山东莱阳的土壤。淋溶 2 h 后，14 种土壤淋溶液平均淋出体积为 28 ml，而安徽怀宁

表 5 淋溶 2 h 和 24 h 各土壤的钾素淋溶指标
Table 5 Soil K leaching index within 2 and 24 hours

采样点	不施钾处理淋溶液 K ⁺ 平均浓度(mg/L)		施钾处理淋溶液 K ⁺ 平均浓度(mg/L)		不施钾处理淋溶液体积(ml)		施钾处理淋溶液体积(ml)		不施钾处理 K ⁺ 累积淋溶量(mg/kg)		施钾处理 K ⁺ 累积淋溶量(mg/kg)		钾肥表观淋出率(%)	
	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h	2 h	24 h
湖南长沙	4.10	1.35	139	52.1	31	179	19	287	0.42	1.26	8.59	30.8	4.09	14.8
江西鹰潭	7.28	4.41	143	45.0	25	206	23	230	0.62	3.41	11.0	31.2	5.18	13.9
湖北蕲春	5.41	2.35	113	51.2	12	72	8	90	0.22	0.70	3.16	12.3	1.47	5.81
湖北潜江	3.23	1.16	79.3	28.7	45	434	44	465	0.49	1.81	11.7	41.8	5.60	20.0
安徽芜湖	4.61	1.54	90.9	31.9	8	101	7	132	0.12	0.68	2.16	10.7	1.02	5.01
黑龙江海伦	19.5	14.3	82.2	56.0	5	39	5	41	0.35	1.97	1.49	7.36	0.57	2.70
河南封丘	5.27	2.15	65.2	20.2	37	311	34	330	0.65	2.38	7.44	21.1	3.39	9.35
安徽广德	4.54	2.36	110	43.1	10	89	7	109	0.15	0.82	2.74	12.8	1.30	6.01
安徽怀宁	3.14	0.63	63.7	11.9	82	745	69	975	0.86	2.05	14.6	29.2	6.86	13.6
山东莱阳	3.08	0.73	30.2	5.88	106	1039	96	1139	1.08	2.78	9.68	20.5	4.30	8.87
江苏常熟	2.67	1.09	26.7	10.8	20	167	18	165	0.18	0.60	1.63	6.00	0.73	2.70
江苏盐城	4.82	1.78	43.1	15.4	8	92	8	103	0.14	0.61	1.11	4.71	0.49	2.05
重庆	3.10	1.72	11.1	6.39	8	55	6	65	0.08	0.38	0.22	1.13	0.07	0.38
河北衡水	1.73	0.59	10.0	3.35	30	193	25	238	0.17	0.47	0.82	2.16	0.32	0.84

和山东莱阳的土壤由于砂粒含量较高,淋溶液淋出较快,平均淋溶液体积分别达到 76 ml 和 101 ml,使得 K⁺ 淋溶量相对较大。就淋溶体积而言,黑龙江海伦的土壤两个淋溶时间内淋溶液体积均最小,可能与其土壤有机质含量高(147 g/kg)有关。长时间淋溶(24 h),两处理土壤 K⁺ 累积淋溶最大的则分别为江西鹰潭和湖北潜江的土壤,与此两种土壤固钾能力差有关。江西鹰潭速效钾含量高,又是红壤发育而来的水稻土,故钾较易淋溶。湖北潜江的土壤缓效钾含量较低,为 151 mg/kg,

土壤固钾及缓冲能力较弱,因此淋溶量较大。

2.4 不同淋溶时间土壤钾素淋溶的影响因素

降雨量充足,排水不畅时,各土壤在不同淋溶时间下的淋溶特性存在显著差异,其淋溶体积、淋溶液 K⁺ 平均浓度、累积淋溶量及钾肥表观淋出率的大小与土壤的基本性质密切相关,用 SPSS 进行相关统计分析,短时间淋溶(2 h)和长时间淋溶(24 h)时土壤各淋溶指标与土壤性质的 Pearson 相关系数分别列于表 6。

表 6 淋溶 2 h 和 24 h 土壤钾素淋溶指标与土壤性质的相关系数
Table 6 The correlation coefficient between soil potassium leaching index and soil properties within 2 and 24 hours

土壤性质	不施钾处理 K ⁺ 累积淋溶量		不施钾处理淋溶液 K ⁺ 平均浓度		不施钾处理淋溶体积		施钾处理 K ⁺ 累积淋溶量		施钾处理淋溶液 K ⁺ 平均浓度		施钾处理淋溶体积		钾肥表观淋出率	
	2 h	24 h	2 h	24 h	2h	24h	24h	24 h	2 h	24 h	2h	24h	2 h	24 h
速效钾	-0.060	0.246	0.867**	0.911**	-0.294	-0.313	-0.276	-0.279	-0.055	0.266	-0.261	-0.287	-0.288	-0.313
pH	-0.408	-0.370	-0.097	-0.062	-0.352	-0.382	-0.528	-0.547*	-0.542*	-0.437	-0.328	-0.355	-0.530	-0.546*
SOM	-0.087	0.091	0.875**	0.889**	-0.258	-0.250	-0.183	-0.117	0.097	0.454	-0.245	-0.251	-0.187	-0.130
CEC	-0.199	-0.032	0.788**	0.839**	-0.320	-0.313	-0.367	-0.369	-0.155	0.223	-0.304	-0.310	-0.374	-0.385
体积质量	0.238	0.011	-0.784**	-0.784**	0.399	0.380	0.180	0.085	-0.220	-0.504	0.397	0.407	0.173	0.089
饱和含水量	-0.262	-0.046	0.836**	0.833**	-0.431	-0.405	-0.238	-0.114	0.225	0.560*	-0.423	-0.419	-0.234	-0.116
砂粒	0.780**	0.719**	-0.102	-0.128	0.663**	0.638*	0.540*	0.373	-0.069	-0.250	0.695**	0.687**	0.517	0.335
粉粒	-0.805**	-0.790**	0.103	0.128	-0.652*	-0.627*	-0.744**	-0.651*	-0.235	0.000	-0.665**	-0.652*	-0.731**	-0.621*
黏粒	-0.027	0.063	0.008	0.011	-0.081	-0.080	0.319	0.467	0.556*	0.476	-0.119	-0.127	0.339	0.486
全钾含量	-0.103	-0.358	-0.143	-0.141	0.051	0.081	-0.404	-0.677**	-0.713**	-0.649*	0.044	0.060	-0.420	-0.683**
缓效钾	0.036	-0.106	0.024	0.050	0.158	0.115	-0.423	-0.582*	-0.716**	-0.552*	0.180	0.166	-0.450	-0.603*
长石	0.242	0.030	0.183	0.179	0.382	0.357	-0.263	-0.512	-0.690**	-0.511	0.315	0.318	-0.294	-0.541*
含钾矿物总量	0.246	-0.027	-0.011	-0.004	0.294	0.282	-0.183	-0.374	-0.757**	-0.620*	0.397	0.396	-0.210	-0.391

由表 6 可知,无论长时间还是短时间的淋溶,不施钾处理 K^+ 平均浓度与土壤速效钾、有机质及阳离子交换量呈极显著正相关,而施钾处理 K^+ 平均浓度则与土壤全钾、缓效钾、长石及含钾矿物总量呈显著负相关。这是由于大部分外源钾被土壤矿物所固定^[20],影响了土壤溶液中 K^+ 的平衡,从而使得淋溶浓度与缓效钾等显著相关。

同时,不施钾处理 2 h 和 24 h 内 K^+ 累积淋溶量均与土壤砂粒含量呈极显著正相关,与土壤粉粒含量呈极显著负相关,且随淋溶时间增加相关系数变小。施钾处理淋溶 2 h 的 K^+ 累积淋溶量与土壤砂粒含量呈显著正相关,与粉粒含量呈显著负相关。施钾处理淋溶 24 h 的累积淋溶量则与砂粒含量相关性不显著。淋溶 2 h 的钾肥表观淋出率只与土壤粉粒含量呈极显著负相关,而淋溶 24 h 的钾肥表观淋出率与土壤 pH、粉粒、全钾、缓效钾和长石含量均呈显著负相关。相应回归方程为:施钾处理淋溶 24 h 后累计淋溶量 = $69.8 - 21.2 \times \text{全钾} - 0.389 \times \text{粉粒}$, $r = 0.836^*$;淋溶 24 h 后钾肥表观淋出率 = $32.7 - 10.3 \times \text{全钾} - 0.173 \times \text{粉粒}$, $r = 0.822^*$ 。因此,在降雨量充足,田间排水不畅的情况下,短时间内钾的淋溶状况主要受土壤质地的影响,长时间内钾的淋溶状况则主要受土壤全钾和粉粒含量影响。

3 结论

(1) 未施钾的自然土壤,在降雨量较小时(87 mm),决定钾素淋溶状况的主要土壤因子是土壤质地,质地越轻, K^+ 淋溶量越大;降雨量较大时(435 mm),决定钾素淋溶状况的主要因子则为速效钾,田间速效钾含量越大,土壤溶液中易交换的 K^+ 浓度越高,淋溶风险越大。

(2) 外源钾施入土壤后,在降雨量较小时(87 mm),钾素淋溶状况主要受土壤粉粒和缓效钾的影响,粉粒含量越大、缓效钾越大,淋溶量越小;降雨量较大时(435 mm),钾素淋溶状况主要受全钾和缓效钾的影响,其值越大淋溶量越小。

(3) 在降雨量充足、田间排水不畅的情况下,短时间内(2 h)土壤钾肥表观淋出率仅与粉粒含量呈显著负相关,土壤质地是影响钾淋溶的主要因子;长时间(24 h)淋溶后钾肥表观淋出率则与土壤 pH、粉粒、全钾、缓效钾和长石含量均呈显著负相关,其中全钾和粉粒的影响作用最大。

(4) 不同降雨量及淋溶时间,钾肥表观淋出率均与土壤 pH 呈显著负相关,基本符合我国南方酸性土壤持钾能力弱、北方中碱性土壤持钾能力强的现状。另外,分析土壤钾的淋溶不仅要关注土壤的粒径组

成,还应该考虑土壤黏土矿物的类型。

参考文献:

- [1] Pleysier JL, Juo ASR. Leaching of fertilizer ions in a Ultisol from the high rainfall tropics: Leaching through undisturbed soil columns[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(4): 754-760
- [2] 王姗姗,徐明岗,甘良涛,张树清. 我国南方地区钾肥使用及市场调查研究分析[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 98-103
- [3] 任丽萍,宋玉芳,许华夏,巩宗强,姚德明. 旱田养分淋溶规律及对地下水影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(3): 133-136
- [4] 孙波,王兴祥,张桃林. 红壤养分淋失的影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 257-262
- [5] 牛新湘,马兴旺. 农田土壤养分淋溶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 451-456
- [6] 占丽平,李小坤,鲁剑巍,王瑾,廖志文. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548-553
- [7] Alfaro MA, Gregory PJ, Jarvis SC. Dynamics of potassium leaching on a hillslope grassland soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(1): 192-200
- [8] 和林涛,石孝均,易时来. 不同氮处理下紫色土钾素淋失动态研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(7): 96-101
- [9] 黄绍文,金继运. 我国北方一些土壤对外源钾的固定[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(2): 131-138
- [10] Askegaard M, Eriksen J, Oleson JE. Exchangeable potassium and potassium balances in organic crop rotations on a coarse sand[J]. Soil Use and Management, 2003, 19(2): 96-103
- [11] Rosolem CA, Sgariboldi T, Garcia RA, Calonego JC. Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(16): 1934-1943
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [13] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 94-101
- [14] 杨德湧,蒋梅茵. 我国东部花岗岩发育的红壤和黄壤的粘粒矿物组成及其演变[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 276-283
- [15] 赵玉安,王玉. (土娄)土不同层次钾运移研究[J]. 河南农业科学, 2003(11): 37-39
- [16] 徐晓燕,马毅杰,张瑞平. 土壤中钾的转化及其与外源钾的相互关系的研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 489-492
- [17] 梁成华,魏丽萍,罗磊. 土壤固钾与释钾机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 679-684
- [18] 解文艳,樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(5): 537-540
- [19] 王文忠,徐生瑞. 施钾对两种土壤钾素动态变化影响的研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(3): 120-122
- [20] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 208
- [21] 沈钦华,王火焰,周健民,杜昌文,陈小琴. 含钾矿物中钾的释放及其与溶液环境中离子种类的关系[J]. 土壤, 2009, 41(6): 862-868

Preliminary Study on Potassium Leaching Characteristics of Different Soils

DONG Yan-hong^{1,2}, WANG Huo-yan^{1*}, ZHOU Jian-min¹, REN Zheng-wen^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: A soil leaching column experiment was conducted to investigate K leaching from various soils and to reveal the relationship between K leaching and soil properties. The results showed that under the light rain (87 mm), the soil texture was the main factor in determining K leaching for the soils without application of K fertilizer. The lighter the soil texture, the greater the amount of the K leached. While under the heavy rain (435 mm), soil available K was the main factor in determining how much K could be released from the unfertilized soils. When 200 mg/kg K was applied to the soils, both the content of silt fraction and slowly available K (SAK) were the main factors influencing K leaching under the light rain (87 mm). As the content of soil silt or the SAK increased, the K leaching from the soil decreased. But soil total K and SAK were the main factors in determining K leaching under the heavy rain (435 mm). When the rain fall was very higher, the apparent K fertilizer leaching ratio (AKLR) within 2 h was negatively correlated to content of soil silt. However, AKLR within 24 h was negatively correlated to pH, silt, total K, SAK and feldspar content in soils, and the silt and total K content were more closely related to AKLR than other factors.

Key words: K leaching, Rainfall, Soil properties, Soil texture