

网络出版时间:2023-06-30 15:44 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.01.012
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1390.S.20230629.1646.013.html

玉米种植制度对红壤钾素形态及其有效性的影响

蔡艳^{1,2},蔡泽慧^{1,2},苟小梅^{1,2},叶想^{1,2},李冰^{1,2},张毅^{1,2}

(1 四川农业大学 资源学院,四川 成都 611130;2 自然资源部 耕地资源调查监测与保护利用重点实验室,四川 成都 611130)

摘要 【目的】探讨玉米种植制度对红壤土壤钾形态及其有效性的影响,为该区域合理安排种植制度和玉米地土壤钾素管理提供依据。【方法】于春播前采集红壤区撂荒(CK)、玉米连作(CY)、豌豆-玉米轮作(RWY)和西葫芦-玉米轮作(RXY)4个种植制度下耕层(0~20 cm)和亚耕层(20~40 cm)土壤,测定其土壤理化性质和各形态钾含量,并分析其相关性。【结果】4个玉米种植制度下土壤各形态钾分布规律不同,耕层土壤水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾和非交换性钾含量均高于亚耕层,矿物钾含量未表现出典型规律,种植制度对耕层土壤钾素含量影响更大。耕层和亚耕层土壤的水溶性钾、特殊吸附钾和非特殊吸附钾均与速效钾含量呈极显著正相关,特殊吸附钾是该区有效钾的最大供应源。与玉米轮作相比,玉米连作导致土壤酸化程度增加,尽管其速效钾含量显著高于其他土壤($P<0.05$),但长期采用玉米连作不利于维持土壤钾素平衡。轮作可降低土壤酸化程度,防止速效钾过度累积,其中西葫芦-玉米轮作可使土壤供钾能力处于较高水平并保持稳定。【结论】玉米种植制度对红壤耕层钾形态及其有效性影响较大,其中西葫芦-玉米轮作是该区钾素可持续利用的玉米最佳种植制度。

关键词 种植制度;钾形态;有效钾;红壤;玉米栽培

中图分类号 S158.2

文献标志码 A

文章编号 1671-9387(2024)01-0109-08

Effects of maize based cropping systems on forms and availability of potassium in red soil

CAI Yan^{1,2}, CAI Zehui^{1,2}, GOU Xiaomei^{1,2}, YE Xiang^{1,2}, LI Bing^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China;

2 Key Laboratory of Investigation and Monitoring, Protection and Utilization for Cultivated Land Resources, Ministry of Natural, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: 【Objective】 This paper explored the effects of maize based cropping systems on the forms and availability of potassium (K) in red soil to provide basis for rational cropping system designing and soil K management in the red soil areas. 【Method】 Before spring sowing, soil samples were collected from the cultivated layer (0–20 cm) and sub-cultivated layer (20–40 cm) under four cropping systems, including abandoned land (CK), maize continuous cropping (CY), pea-maize rotation (RWY) and zucchini-maize rotation (RXY). Soil properties and contents of different K forms were determined, and analyze its correlation. 【Result】 The distribution patterns of soil K forms were different under the four cropping systems. The contents of water-soluble K, non-specially adsorbed K, specially adsorbed K and non-exchangeable K in the cultivated layer were higher than those in the sub-cultivated layer. The mineral K contents did not show the typical pattern. Planting systems had greater effects on soil K contents in the cultivated layer than sub-

【收稿日期】 2022-10-14

【基金项目】 国家重点研发计划项目“四川盆地东北部套作春玉米化肥减施增效技术集成与应用”(2018YFD0200704-03)

【作者简介】 蔡艳(1976—),女,四川达县人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事土壤肥力与科学施肥研究。

E-mail: caiyya@126.com

【通信作者】 张毅(1976—),男,四川达县人,副教授,硕士,硕士生导师,主要从事土壤肥力与信息技术研究。

E-mail: zy8709@126.com

cultivated layer. The contents of water-soluble K, specially adsorbed K and non-specially adsorbed K had significantly positive correlation with the available K, and the specially adsorbed K was the largest source of available K supply in this area. Compared to corn rotation, continuous maize cropping increased soil acidification. Although its available K content was significantly higher than that of other soils ($P < 0.05$), long-term continuous cropping of maize was not conducive to maintaining soil K balance. Maize rotation could reduce soil acidification and prevent excessive accumulation of available K, especially zucchini-maize rotation could keep soil K supply capacity at high and stable levels. 【Conclusion】 Maize cropping system had great influences on the forms and availability of K in the cultivated layer of red soil. The zucchini-maize rotation was the best maize cropping system for sustainable utilization of K in this area.

Key words: planting system; potassium form; potassium availability; red soil; maize planting

钾是植物必需的大量元素之一,在提供植物营养与维持土壤健康等方面起着重要作用^[1-2]。钾以不同的形态存在于土壤之中,通常可将其分为水溶性钾(water soluble K)、交换性钾(exchangeable K)、非交换性钾(non-exchangeable K)和矿物钾(structural K)^[3],土壤的有效形态钾(水溶性钾和交换性钾)含量及各形态钾之间的平衡转化决定了钾的有效性和土壤供钾能力。

红壤广泛分布于我国长江以南,玉米是南方红壤种植区主要粮食作物,在农业生产中占有重要地位^[4]。我国南方红壤普遍缺钾^[5],农业生产大多依赖无机肥料的投入,施钾可显著提高土壤速效钾含量和植株钾的累积量,但大量施用钾肥不仅增加生产成本,还会对环境产生负面影响^[6]。秸秆还田、施解钾菌、种植并翻压绿肥等方式均可改善土壤供钾状况和减缓钾素含量下降程度^[7-9]。此外,合理的种植制度可在有限的土地资源上提高土壤钾素供应水平,减少钾的淋失^[10-11],是实现土壤健康和农业可持续性发展的有效方法。

不同种植制度,其作物种类、种植结构与布局等均存在差异,进而影响土壤钾形态及其有效性^[12]。于林等^[13]研究指出,不同种植方式下土壤各养分变幅存在差异,种植结构的变化导致土壤有效钾含量显著提高;罗影等^[14]研究发现,不同胡麻种植模式

对土壤速效钾含量及酶活性有明显影响;Samadi等^[15]研究表明,甜菜长期连作可改变不同形态钾含量及土壤对钾的吸附行为。但不同玉米种植制度对红壤钾形态及其有效性的影响尚未见报道。为此,本研究以攀西地区 4 种长期玉米种植制度下的红壤为对象,探讨玉米种植制度对其土壤钾形态及其有效性的影响,为红壤区合理安排种植制度和玉米地土壤钾素管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域状况及采样

试验土壤取自四川省攀枝花市米易县,该区属亚热带干热河谷立体气候,年均气温 19.9 °C,年均降雨量 1 101.2 mm。设 4 个种植制度:撂荒(CK)、玉米连作(CY)、豌豆-玉米轮作(RWY)和西葫芦-玉米轮作(RXY),每个种植制度均稳定 10 年以上,且均未实行秸秆还田。

采样时间为春播前,具体采样方法为:选择种植制度相同的 3 块相邻地块,避开施肥或垄沟等特殊区域,每个地块在 0~20 和 20~40 cm 土层随机取 6 个土芯(直径 7.0 cm)。土样经风干并剔除石块及植物根系后,过筛待测。各样点基本信息见表 1,土样基本理化性质见表 2。

表 1 土壤采样点基本信息

Table 1 General characteristics of soil sampling sites

种植制度 Cropping system	地理坐标 Geographical coordinates	海拔/m Altitude	平均施肥量/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) Average fertilizer application rate			
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Manure
CK	26°48'35" N, 102°09'25" E	1 728	0	0	0	0
CY	26°48'03" N, 102°09'21" E	1 757	309.6	87.7	99.6	0
RWY	26°47'34" N, 102°09'20" E	1 762	393.8	141.7	174.7	0
RXY	26°48'41" N, 102°09'03" E	1 685	521.1	363.7	212.1	1 000

注:CK. 撂荒;CY. 玉米连作;RWY. 豌豆-玉米轮作;RXY. 西葫芦-玉米轮作。下同。

Note:CK. Abandoned land;CY. Maize continuous cropping;RWY. Pea-maize rotation;RXY. Zucchini-maize rotation. The same below.

表 2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Soil properties of different cropping systems

土层深度/cm Soil depth	种植制度 Cropping system	pH	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic Matter	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹) Alkali hydrolysable nitrogen	有效磷/ (mg·kg ⁻¹) Available phosphorus
土层深度/cm Soil depth	种植制度 Cropping system	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	砂粒	粉粒	黏粒	
			(0.02~2 mm) Sand	(0.002~0.02 mm) Silt	(<0.002 mm) Clay	
0~20	CK	5.18±0.01 b	11.74±3.85 b	0.81±0.12 b	38.31±3.96 b	12.54±2.26 b
	CY	5.26±0.04 b	26.70±5.42 a	1.46±0.29 a	88.50±6.56 a	12.82±2.68 b
	RWY	6.78±0.10 a	9.37±2.94 b	0.67±0.11 b	32.59±0.34 b	116.64±30.55 a
	RXY	5.62±0.10 b	16.52±4.89 ab	0.49±0.09 b	21.71±2.06 c	10.00±2.38 b
20~40	CK	5.56±0.09 b	5.47±0.98 b	0.78±0.15 ab	36.65±2.73 b	10.34±1.29 b
	CY	5.30±0.03 c	24.99±6.47 a	1.30±0.25 a	89.51±9.70 a	12.68±2.29 b
	RWY	6.95±0.02 a	4.90±1.23 b	0.57±0.23 b	26.74±1.39 bc	48.09±15.42 a
	RXY	5.70±0.06 b	13.93±4.00 ab	0.51±0.17 b	21.96±3.33 c	8.62±0.89 b
0~20	CK	7.08±1.29 b	48.5±3.4 b	13.2±1.7 a	38.3±1.9 a	
	CY	6.32±1.26 b	48.7±2.6 b	13.4±4.9 a	37.9±2.3 a	
	RWY	20.08±4.50 a	79.8±4.9 a	11.4±3.9 a	8.8±1.1 b	
	RXY	8.28±2.38 b	49.7±2.5 b	15.5±0.2 a	34.8±2.6 a	
20~40	CK	7.28±3.76 b	49.8±1.3 b	13.7±0.6 ab	36.5±0.7 a	
	CY	5.85±1.06 b	49.0±0.9 b	14.9±1.6 ab	36.1±0.7 a	
	RWY	19.02±3.23 a	74.5±0.7 a	12.9±1.4 b	12.5±0.9 b	
	RXY	7.65±1.36 b	48.6±2.6 b	17.9±1.9 a	33.5±1.6 a	

注:同列数据后标不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same soil layers ($P<0.05$).

1.2 测定项目及方法

土壤基本理化性质测定采用鲁如坤^[16]的方法。具体为:pH值用pH计测定(水土质量比2.5:1),有机质含量采用外加热-重铬酸钾容量法测定,全氮含量用半微量凯氏定氮法测定,碱解氮含量用碱解扩散法测定,有效磷含量采用盐酸氟化铵浸提-磷钼蓝比色法测定,阳离子交换量(CEC)用中性NH₄OAc连续浸提法测定,质地采用比重计法测定。

各形态钾的测定参考黄绍文等^[17]的方法,具体为:水溶性钾由去离子水按土液质量比1:10提取,速效钾用1.0 mol/L中性醋酸铵浸提,全钾采用氢氧化钠熔融法提取,各提取液中的钾均用火焰光度法测定。交换性钾=非特殊吸附钾+特殊吸附钾,其中非特殊吸附钾=0.5 mol/L中性醋酸镁提取的钾-水溶性钾,特殊吸附钾=1.0 mol/L中性醋酸铵提取的钾-0.5 mol/L中性醋酸镁提取的钾;非交换性钾=1.0 mol/L热硝酸提取的钾-速效钾;矿物钾=全钾-1.0 mol/L热硝酸浸提的钾。

钾饱和度(KS)指土壤胶体上的K⁺占全部交换性阳离子总量(CEC)的百分比,计算公式为:

$$KS=(\text{交换性钾}/\text{CEC})\times 100\%$$

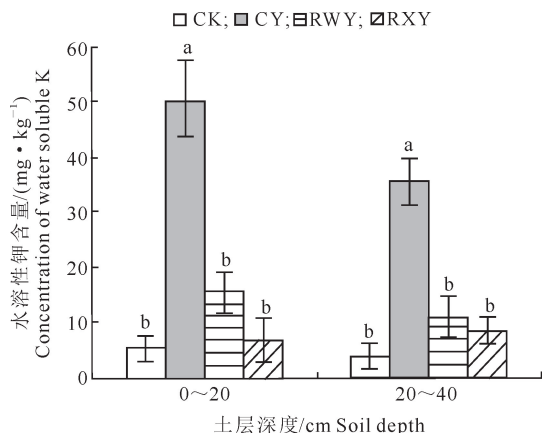
1.3 数据处理

运用Microsoft Excel 2010和Origin 9.0进行试验数据的处理及作图,采用SPSS Statistics 20.0进行数据分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)处理间的差异显著性,差异显著性水平($\alpha=0.05$)通过最小显著差异法(LSD)进行检验。

2 结果与分析

2.1 玉米种植制度对红壤不同形态钾含量的影响

2.1.1 玉米种植制度对水溶性钾含量的影响 由图1可知,0~40 cm土层中水溶性钾含量为3.88~49.96 mg/kg。与撂荒地(CK)相比,种植了作物的3个处理水溶性钾含量均有提高,耕层土壤(0~20 cm)水溶性钾含量表现为CY(49.96 mg/kg)>RWY(15.48 mg/kg)>RXY(6.89 mg/kg)>CK(5.38 mg/kg),亚耕层土壤(20~40 cm)水溶性钾含量的变化规律与耕层相似,但整体表现为耕层土壤高于亚耕层土壤。CY处理在耕层和亚耕层土壤中水溶性钾含量均显著高于其他处理($P<0.05$),分别是其他处理的3.2~9.3和4.6~12.9倍。



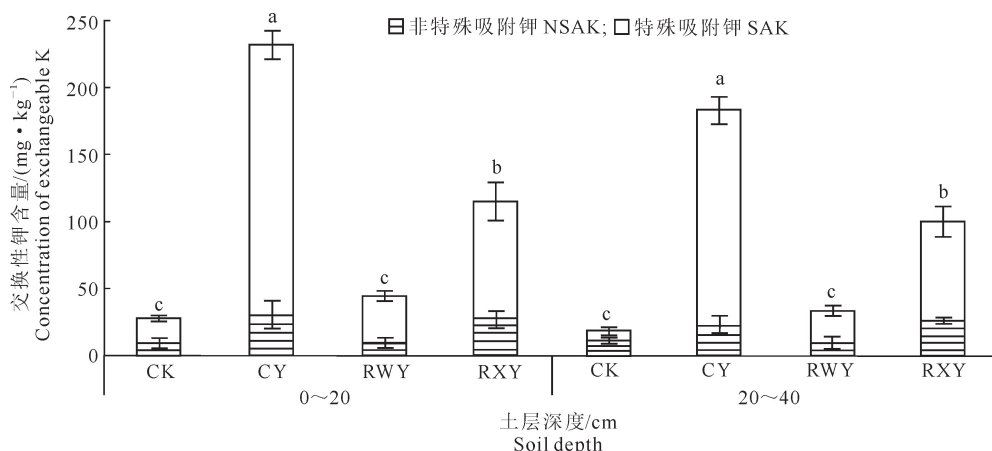
图柱上标不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。图 3 同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same soil layers ($P < 0.05$). The same in Fig. 3

图 1 玉米种植制度对红壤水溶性钾含量的影响

Fig. 1 Effects of maize planting system on water-soluble K content in red soil

2.1.2 玉米种植制度对交换性钾含量的影响 土壤交换性钾是作物吸钾的主要来源,可进一步分为特殊吸附钾(specifically absorptive K, SAK)和非特



图柱上标不同小写字母表示同一土层不同处理间特殊吸附钾含量差异显著($P < 0.05$)。不同处理间非特殊吸附钾含量差异不显著

Lowercase letters indicate significant differences in SAK between treatments in same soil layers ($P < 0.05$).

There was no significant difference in NSAK among treatments

图 2 玉米种植制度对红壤交换性钾含量的影响

Fig. 2 Effects of maize planting system on exchangeable K content in red soil

2.1.3 玉米种植制度对非交换性钾和矿物钾含量的影响 非交换性钾、交换性钾和水溶性钾处于动态平衡状态,当这 3 种形式的钾耗尽时,它们的补充取决于从矿物中释放的结构性钾^[18]。图 3 为不同种植制度对研究区 0~20 和 20~40 cm 土层非交换性钾和矿物钾含量的影响情况。由图 3 可知,耕层与亚耕层土壤的非交换性钾含量为 331.30~505.35 mg/kg,矿物钾含量为 10.74~14.92 g/kg,

殊吸附钾(non-specifically absorptive K, NSAK)^[17]。图 2 显示,耕层和亚耕层土壤交换性钾含量均表现为 SAK 高于 NSAK。同一种种植制度下,耕层土壤 SAK 含量高于亚耕层,而 NSAK 含量在耕层和亚耕层之间的差异较小。

由图 2 还可知,耕层土壤的特殊吸附钾和非特殊吸附钾含量均以 CY 处理最高,分别以 CK 或 RWY 处理最低;不同种植制度间,土壤交换性钾含量表现为 CY (231.82 mg/kg) > RXY (114.70 mg/kg) > RWY (45.52 mg/kg) > CK (28.02 mg/kg),且不同种植制度间土壤交换性钾含量差异显著($P < 0.05$),CY 处理土壤交换性钾含量是其他处理的 2.0~8.3 倍。亚耕层土壤特殊吸附钾和非特殊吸附钾含量分别为 6.93~159.48 和 10.54~25.96 mg/kg,且均以 CY 处理最高,且 CY 处理特殊吸附钾含量显著高于其他处理($P < 0.05$),但不同处理间非特殊吸附钾含量差异不显著($P > 0.05$)。亚耕层土壤交换性钾含量为 28.02~231.82 mg/kg,表现为 CY > RXY > RWY > CK。

同一种种植制度下耕层与亚耕层间差异不显著。耕层土壤非交换性钾含量为 331.30~505.35 mg/kg,以 RWY 处理最高,CY 处理最低;矿物钾含量以 RXY 处理最高,表现为 RXY > CK > RWY > CY。亚耕层非交换性钾含量为 326.10~503.21 mg/kg,以 CK 处理最高,CY 处理最低;矿物钾含量为 12.08~14.92 g/kg,表现为 RXY > CY > CK > RWY。耕层和亚耕层土壤的非交换性钾含量均以

玉米连作(CY)处理最低,这与水溶性钾和交换性钾 表现出的规律恰好相反。

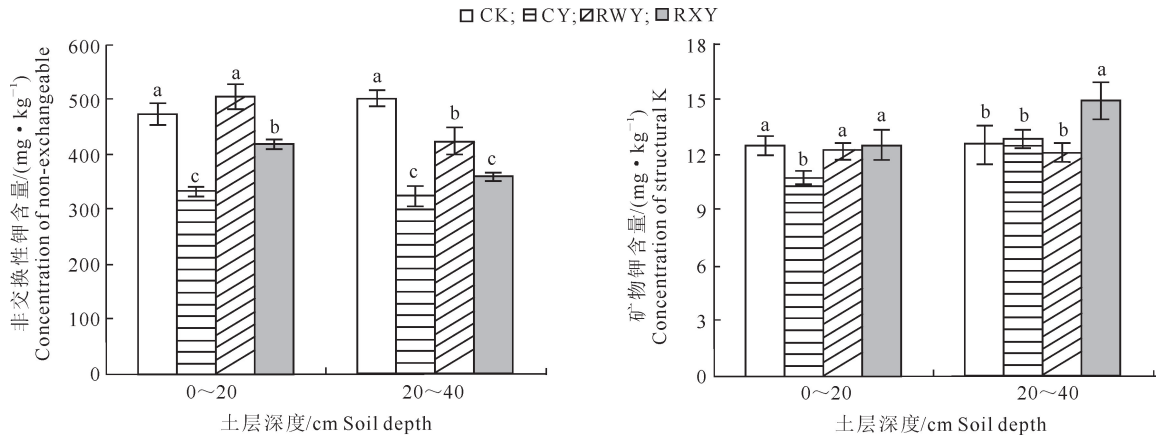


图 3 玉米种植制度对红壤非交换性钾和矿物钾含量的影响

Fig. 3 Effects of maize planting system on non-exchangeable K and structural K content in red soil

2.2 土壤各形态钾素含量间的相关性分析

研究区 0~40 cm 土层中各形态钾素间的相关系数如表 3 所示。由表 3 可知,除了水溶性钾与非特殊吸附钾的相关性不显著外,土壤速效钾与其组分(水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾)以及各

组分两两之间均呈极显著正相关关系。非交换性钾则与水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾和速效钾均呈极显著负相关关系。矿物钾与全钾呈极显著正相关关系($r=0.999$)。表明土壤各形态钾素间存在不同程度的动态平衡。

表 3 土壤各形态钾素间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among orms of K in red soil

钾形态 Potassium form	水溶性钾 Water soluble K	非特殊吸附钾 Non-specifically absorptive K	特殊吸附钾 Specifically absorptive K	速效钾 Available K	非交换性钾 Non-exchangeable K	矿物钾 Structural K	全钾 Total K
水溶性钾 Water soluble K	1.000	0.268	0.893**	0.899**	-0.615**	-0.363	-0.340
非特殊吸附钾 Non-specifically absorptive K	0.268	1.000	0.596**	0.620**	-0.639**	-0.028	-0.018
特殊吸附钾 Specifically absorptive K	0.893**	0.596**	1.000	0.998**	-0.793**	-0.206	-0.182
速效钾 Available K	0.899**	0.620**	0.998**	1.000	-0.793**	-0.229	-0.205
非交换性钾 Non-exchangeable K	-0.615**	-0.639**	-0.793**	-0.793**	1.000	-0.153	-0.160
矿物钾 Structural K	-0.363	-0.028	-0.206	-0.229	-0.153	1.000	0.999**
全钾 Total K	-0.340	-0.018	-0.182	-0.205	-0.160	0.999**	1.000

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。表 5 同。

Note: * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same for Table 5.

2.3 玉米种植制度对红壤钾素有效性的影响

表 4 表明,耕层和亚耕层土壤速效钾含量为 22.44~281.79 mg/kg,同一土层不同种植制度间速效钾含量差异显著($P<0.05$)。同一种植制度下,耕层土壤速效钾含量及速效钾在全钾中的占比

均高于亚耕层,且都以 CY 处理最高,CK 处理最低。耕层土壤钾饱和度为 0.58%~9.38%,亚耕层为 0.45%~7.99%,且均以 CY 处理最高,RWY 处理最低。与速效钾含量相比,钾饱和度所反映的钾素有效性在不同种植制度间的差异更加显著。

表 4 不同玉米种植制度下土壤钾素有效含量

Table 4 Soil K available contents of different maize cropping systems

种植制度 Cropping system	0~20 cm			20~40 cm		
	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹) Content of available K	占全钾百分比/% Percentage of total K	钾饱和度/% Potassium saturation	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹) Content of available K	占全钾百分比/% Percentage of total K	钾饱和度/% Potassium saturation
CK	33.40±2.90 d	0.26	1.10	22.44±5.19 c	0.17	0.74
CY	281.79±13.45 a	2.48	9.38	218.60±19.73 a	1.63	7.99
RWY	61.00±9.16 c	0.48	0.58	44.63±7.06 c	0.36	0.45
RXY	121.60±15.07 b	0.93	3.54	108.44±12.41 b	0.70	3.34

2.4 土壤理化性质与各形态钾含量的相关性分析

表 5 显示,红壤水溶性钾含量与有机质、全氮和碱解氮呈显著或极显著正相关;非特殊吸附钾含量与有机质和黏粒含量呈显著正相关,与 pH 和砂粒含量呈显著负相关,与阳离子交换量(CEC)呈极显

著负相关;特殊吸附钾和速效钾含量与有机质呈显著正相关,与全氮、碱解氮呈极显著正相关,与 pH、CEC 呈显著负相关;非交换性钾与 CEC 呈显著正相关,与全氮、碱解氮分别呈显著或极显著负相关。

表 5 土壤理化性质与各形态钾素的相关性

Table 5 Correlation between physical and chemical properties of soil and forms of K

土壤性质 Soil property	水溶性钾 Water soluble K	非特殊吸附钾 Non-specifically absorptive K	特殊吸附钾 Specifically absorptive K	速效钾 Available K	非交换性钾 Non- exchangeable K	矿物钾 Structural K	全钾 Total K
pH	-0.227	-0.475*	-0.456*	-0.445*	0.358	-0.010	-0.023
有机质 Organic matter	0.405*	0.473*	0.468*	0.487*	-0.343	-0.316	-0.307
全氮 Total nitrogen	0.786**	0.203	0.693**	0.699**	-0.465*	-0.384	-0.368
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.869**	0.291	0.801**	0.807**	-0.548**	-0.361	-0.342
有效磷 Available phosphorus	-0.241	0.197	-0.414*	-0.146	0.381	0.099	0.045
阳离子交换量 Cation exchange capacity	-0.151	-0.516**	-0.415*	-0.423*	0.459*	-0.094	-0.101
砂粒 Sand	-0.098	-0.502*	-0.371	-0.358	0.364	-0.183	-0.194
粉粒 Silt	-0.123	0.224	0.085	0.067	-0.095	0.335	0.342
黏粒 Clay	0.152	0.488*	0.388	-0.380	-0.376	0.092	0.101

3 讨论

耕作土壤钾素来源于土壤母质、施用各种含钾矿物或化学肥料、秸秆还田或施用其他有机肥料等,钾素去向包括作物吸收带走、淋洗或径流损失等,土壤钾含量是钾来源和去向共同作用的结果。此外,在微生物^[19]与作物根系^[20]等生物作用、液土界面和矿物内部物理和化学共同作用下,土壤各形态钾互相转化,对植物和环境产生不同效应。其中,耕层土壤受人为活动、栽培作物和微生物影响程度更明显,其钾形态和含量较非耕层更易表现出分异规律。本研究结果表明,研究区红壤耕层土壤水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾的含量与变幅均高于亚耕层,这与耕作层频繁耕作、施用肥料、作物根系加速土壤钾素循环等密不可分。各种植制度间矿物钾含量差异不显著($P>0.05$),说明其化学性质稳定,主要由土壤母质决定。

种植制度不同,导致:(1)钾肥和有机肥用量差异较大;(2)不同作物对土壤钾吸收量和吸收能力不同^[21];(3)经根茬返还土壤的钾素量不同;(4)通过改变 pH、有机质、阳离子交换量等土壤性质^[22]来影响钾的吸附和释放,进而对土壤中各形态钾的含量及其有效性产生影响。本研究结果表明,玉米连作、豌豆-玉米轮作和西葫芦-玉米轮作的耕层土壤速效钾含量分别比撂荒地显著增加 248.39、88.20 和 27.60 mg/kg($P<0.05$),亚耕层土壤速效钾含量变

化规律与耕层相同,这与红壤区耕作土壤普遍施用化学钾肥密切相关。此外,玉米连作土壤复种指数低于豌豆-玉米轮作和西葫芦-玉米轮作,加之豌豆和西葫芦需钾量高于玉米^[21],导致施用钾肥后轮作土壤速效钾耗竭程度高于玉米连作土壤,故玉米连作土壤速效钾含量最高。耕层和亚耕层土壤钾饱和度均以玉米连作处理最高,但连作土壤化学钾肥投入量比另外 2 种轮作土壤低 43%~53%,综合速效钾积累规律发现,即使连作所投入的化肥钾较少,也能使土壤速效钾含量达到较高水平,这与朱经纬等^[23]的研究结果一致,其原因可能在于玉米连作使土壤酸化程度增加,促进了非交换性钾的释放^[24],当 $\text{pH}<5.5$ 时, Al^{3+} 和 $\text{Al}(\text{OH})_x$ 还会和 K^+ 竞争吸附位点;pH 越低,溶液中的 K^+ 越不易被吸附,导致速效钾不断累积。但应注意,酸度降低会引起磷素固定,导致土壤养分失调,影响作物生长。与玉米连作相比,轮作能够减缓土壤酸化程度,防止速效钾过度累积,这与张玲玉等^[25]的研究结果一致。2 种轮作方式中,西葫芦-玉米轮作土壤的速效钾含量和钾饱和度更高,其原因可能是:一方面,西葫芦-玉米轮作土壤的黏粒含量最高,能够提供更多 K^+ 吸附位点,促进各形态钾的转化^[26];另一方面,西葫芦-玉米轮作下的土壤有机质含量较高,与 Ca^{2+} 复合的土壤有机质羧基基团堵塞在矿物层间,阻止了钾的固定,从而提高了钾的有效性^[27]。而豌豆-玉米轮作土壤阳离子交换量较高,溶液中的 K^+ 多数被层

间固定,导致钾有效性降低^[28]。

各形态钾之间的相关性分析结果表明,土壤速效钾与水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾均呈极显著正相关关系,与特殊吸附钾的相关系数高达 0.998,表明特殊吸附钾是本研究区土壤有效钾养分供应的最主要来源,这与殷志遥等^[29]的研究结果一致。土壤矿物钾含量约占全钾的 96%,因其深受矿物晶格束缚而释放缓慢,不能与其他形态的钾素建立平衡关系,所以种植制度对矿物钾的影响并不显著。

4 结 论

红壤耕层土壤水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量均高于亚耕层,矿物钾含量未表现出典型规律。钾的有效形态中,特殊吸附钾与速效钾的相关系数高达 0.998,是红壤有效钾供应的最主要来源。土壤理化性质与钾素状况密切相关,土壤 pH、有机质、黏粒和阳离子交换量是影响该区红壤钾形态转化及其有效性的主要因素。与玉米连作和豌豆-玉米轮作相比,西葫芦-玉米轮作能使土壤供钾能力处于较高水平并保持稳定,是该区钾素可持续利用的玉米最佳种植制度。

[参考文献]

- [1] Das D, Dwivedi B, Datta S, et al. Potassium supplying capacity of a red soil from eastern India after forty-two years of continuous cropping and fertilization [J]. *Geoderma*, 2019, 341: 76-92.
- [2] Romheld V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects [J]. *Plant and Soil*, 2010, 335: 155-180.
- [3] Sparks D L. Potassium dynamics in soils [J]. *Advances in Soil Science*, 1987, 6: 1-63.
- [4] 李庆逵. 中国红壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
Li Q K. Red soil in China [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [5] 柳开楼, 都江雪, 马常宝, 等. 中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征 [J]. *土壤学报*, 2022, 60(3): 673-684.
Liu K L, Du J X, Ma C B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil potassium in main dryfarming grain arable land of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 60(3): 673-684.
- [6] Zhang H M, Wang B R, Xu M G, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in Southern China [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(2): 199-207.
- [7] 杨 雅, 夏贤格, 范先鹏, 等. 长期秸秆还田提升稻麦轮作系统土壤供钾容量和强度 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(4): 589-597.
Yang Y, Xia X G, Fan X P, et al. Long-term straw returning increase the capacity and intensity of soil potassium supply in a rice and wheat rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 589-597.
- [8] 邓永兴, 王文亮, 周苏政, 等. 小麦根际解钾微生物与土壤钾含量、钾素利用率及根系活力的关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(6): 1027-1043.
Deng Y X, Wang W L, Zhou S M, et al. Relationships of potassium-releasing rhizosphere microorganisms with soil potassium content, potassium use efficiency and root vigor in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(6): 1027-1043.
- [9] 张 帆, 杨 茜, 紫云英与双季稻秸秆协同利用影响稻田土壤钾循环与平衡 [J]. *草业学报*, 2021, 30(1): 72-80.
Zhang F, Yang Q. Effects of co-utilization of Chinese milk vetch and rice straw on the potassium cycle and potassium balance in a paddy soil [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 72-80.
- [10] 刘 瑜, 褚贵新, 梁永超, 等. 不同种植方式对北疆绿洲土壤养分和生物学性状的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 465-471.
Liu Y, Zhu G X, Liang Y C, et al. Soil nutrient and biological characteristics in North Xinjiang Oases as influenced by cropping patterns [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 465-471.
- [11] 董建江, 邵伏文, 张 林, 等. 不同耕作模式对稻田土壤理化性质及经济效益的影响 [J]. *土壤*, 2015, 47(3): 509-514.
Dong J J, Shao F W, Zhang L, et al. Effects of tillage patterns on physical and chemical properties of paddy soils and economic efficiency [J]. *Soils*, 2015, 47(3): 509-514.
- [12] Parihar C M, Yadav M R, Jat S L, et al. Long term effect of conservation agriculture in maize rotations on total organic carbon, physical and biological properties of a sandy loam soil in north-western Indo-Gangetic Plains [J]. *Soil Tillage Res*, 2016, 161: 116-128.
- [13] 于 林, 张 民, 宋付朋, 等. 沿海经济发达区种植结构变化对土壤养分的影响 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 67-71.
Yu L, Zhang M, Song F P, et al. Effects of planting structure changes on soil nutrients in developed coastal region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 67-71.
- [14] 罗 影, 王立光, 陈 军, 等. 不同种植模式对甘肃中部高寒区胡麻田土壤酶活性及土壤养分的影响 [J]. *核农学报*, 2017, 31(6): 1185-1191.
Luo Y, Wang L G, Chen J, et al. Effects of different flex cropping modes on soil enzyme activities and soil nutrients in the cold area of middle part of Gansu [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(6): 1185-1191.
- [15] Samadi A, Dovlati B, Barin M. Effect of continuous cropping on potassium forms and potassium adsorption characteristics in calcareous soils of Iran [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(3): 265-272.
- [16] 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.
Lu R K. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing:

- China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展 [J]. 土壤肥料, 1995(5): 23-29.
Huang S W, Jin J Y. Progress on researches of soil potassium forms and plant effectiveness [J]. Soil and Fertilizer, 1995(5): 23-29.
- [18] Kirkman J H, Basker A, Surapaneni A, et al. Potassium in the soils of New Zealand; a review [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1994, 37(2): 207-227.
- [19] 尚海丽, 毕银丽, 彭苏萍, 等. 解钾细菌 C_6X 对不同富钾矿物含量土壤钾素迁移的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 95-101.
Shang H L, Bi Y L, Peng S P, et al. Effects of potassium-solubilizing bacteria C_6X on potassium migration in soils with different content of potassium-rich minerals [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(18): 95-101.
- [20] 周华君. 植物根系分泌物对难溶磷钾及土壤硒的活化作用研究 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2001.
Zhou J J. A study on the activating reaction of root exudates on the insoluble phosphorus, potassium and the selenium in the soil [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2001.
- [21] 张俊伶. 植物营养学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2021.
Zhang J L. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2021.
- [22] 苟小梅, 王昌全, 李冰, 等. 玉米种植制度对红壤磷素形态及其有效性的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 883-889.
Gou X M, Wang C Q, Li B, et al. Effects of corn-based cropping systems on phosphorus fractions and availability in red soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 883-889.
- [23] 朱经伟, 石俊雄, 张恒, 等. 贵州山地烤烟种植制度对黄壤农田肥力的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 56-62.
Zhu J W, Shi J X, Zhang H, et al. Responses of soil fertility to different cropping patterns in yellow soil farmland in mountain of Guizhou [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(3): 56-62.
- [24] Shen J, Tang C, Rengel Z, et al. Root-induced acidification and excess cation uptake by N_2 -fixing *Lupinus albus* grown in phosphorus-deficient soil [J]. Plant and Soil, 2004, 260: 69-77.
- [25] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1900-1908.
Zhang L Y, Zhao X Q, Shen R F. Soil acidification and its ecological effects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6): 1900-1908.
- [26] 高祥照, 马文奇, 崔勇, 等. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况 [J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 363-369.
Gao X Z, Ma W Q, Cui Y, et al. Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2000, 6(4): 363-369.
- [27] Evangelou V P, Blevins R L. Effect of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium quantity-intensity relationships [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(4): 1047-1054.
- [28] 朱永官, 罗家贤. 我国南方某些土壤对钾素的固定及其影响因素 [J]. 土壤, 1993, 25(2): 64-67.
Zhu Y G, Luo J X. Potassium fixation in some soils in south China and its influencing factors [J]. Soils, 1993, 25(2): 64-67.
- [29] 殷志遥, 黄丽, 薛斌, 等. 连续秸秆还田对水稻土中钾素形态的影响 [J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 351-358.
Yin Z Y, Huang L, Xue B, et al. Effect of continuous straw incorporation on forms of potassium in the paddy soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 351-358.