

DOI: 10.11766/trxb201711050396

长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响*

柳开楼^{1, 3} 黄晶^{1, 2} 张会民^{1, 2†} 李冬初^{1, 2} 韩天富¹ 蔡泽江^{1, 2}
王伯仁^{1, 2} 黄庆海³

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

(2 祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 湖南祁阳 426182)

(3 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 江西进贤 331717)

摘要 基于祁阳红壤旱地长期施肥定位试验, 选取CK (不施肥)、NP (氮磷肥配施)、NPK (氮磷钾肥配施)、NPKM (氮磷钾肥和猪粪配施)和NPKS (氮磷钾肥和秸秆半量还田)处理, 于试验26年 (2016年)玉米收获后采集不同施肥处理原状土壤 (全土), 分析土壤团聚体组分中全钾、非交换性钾和交换性钾含量变化, 并进一步探讨土壤团聚体组分钾对全土钾的贡献率及其与作物吸钾量的相关关系。结果表明: (1) 在所有处理中, NPKM处理下>2 mm、1~2 mm和0.5~1 mm的团聚体组分比例最高, 但0.053~0.25 mm和<0.053 mm的团聚体组分比例则显著低于其他处理, 而NPKS处理下>2 mm、1~2 mm和0.5~1 mm的团聚体组分比例则无显著增加。(2) 与NPK处理相比, NPKM处理各团聚体组分中非交换性钾和交换性含量分别增加24.37%~49.04%和82.02%~176.3%, 且NPKM处理下较大的团聚体组分 (>0.5 mm) 中全钾、交换性钾和非交换性钾对全土全钾、交换性钾和非交换性钾的贡献率显著增加 (增幅分别为6.25%~31.97%、5.72%~43.16%和6.33%~41.98%), 而在较小粒级团聚体组分 (<0.25 mm) 中则呈下降趋势 (降幅分别为14.37%~21.44%、17.04%~33.66%和34.40%~43.84%)。(3) NPKS处理各团聚体组分的非交换性钾和交换性钾含量以及各团聚体组分钾对全土钾的贡献率均与NPK处理无显著差异。(4) 线性回归分析表明, 当>0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率增加1%时, 作物吸钾量相应增加9.92~11.89 kg hm⁻²。长期化肥配施猪粪可显著改善红壤旱地的团聚体组分, 进而提高团聚体组分钾对全土钾的贡献能力, 促进作物对钾素的吸收。

关键词 土壤钾; 团聚体; 红壤; 长期试验; 猪粪

中图分类号 S156.6 **文献标识码** A

红壤旱地是中国南方丘陵区主要的耕地资源, 面积为 1.13×10^6 km², 占全国土地面积的11%。该地区水热资源丰富, 生产潜力巨大, 是我国重要的粮、油、果、茶等生产基地^[1]。然而,

在红壤发育过程中, 高温高湿的气候环境导致土壤钾素大量淋失^[2], 进而使得钾素匮乏成为该地区农业可持续发展的主要限制因子之一。因此, 开展红壤旱地钾素高效利用的研究显得十分必

* 国家自然科学基金项目 (41671301, 41371293) 和国家重点研发计划项目 (2016YFD0300901) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41671301 and 41371293) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300901)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhanghuimin@caas.cn

作者简介: 柳开楼 (1984—), 男, 河南滑县人, 博士研究生, 主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail: liukailou@163.com

收稿日期: 2017-11-05; 收到修改稿日期: 2017-12-13; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-12-25

要。红壤旱地的黏土矿物主要为1:1型的高岭石,含钾矿物(水云母)较少^[3],且作物对钾素不断消耗进一步加剧土壤含钾矿物的释放,从而降低土壤的供钾能力。长期施用钾肥在保持土壤供钾能力的同时可减缓或阻止水云母向过渡矿物(含钾量低于水云母)转化,或者使过渡矿物向水云母转化^[4]。因此,施用钾肥是提高土壤供钾能力的重要途径之一^[5-6],但不同施肥方式对土壤钾素的影响存在显著差异。岳龙凯等^[7]研究表明,氮磷钾肥或增施有机肥均显著提高红壤旱地的钾素有效性。长期施有机肥可提高土壤对钾素的吸附能力,且用量越高,土壤对钾素的吸附能力越强^[8]。但由于作物巨大的吸钾能力,低量有机肥处理仍会导致土壤钾库不断耗竭^[9]。与动物源有机肥不同,虽然秸秆还田可以显著提高土壤交换性钾含量^[10],进而有效补充土壤钾库,但是,作物秸秆的钾肥替代效果受土壤初始条件的影响较大,当土壤交换性钾含量较高时,作物秸秆对钾肥的替代效果不显著^[11]。同时,作为衡量土壤养分存储和供应能力的重要指标,团聚体各组分养分分配显著影响作物的养分吸收^[12-13]。然而,目前,有关团聚体组分中的养分研究主要集中在碳、氮、磷^[12-16]和铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)等重金属^[17],关于钾素在土壤团聚体各组分中,尤其是不同施肥措施下的分配规律尚不明确。而研究不同施肥措施下土壤团聚体组分中钾素的分配对于指导土壤结构改良、红壤钾库管理和钾肥合理施用具有重要意义。因此,本研究利用祁阳红壤旱地长期施肥定位试验(始于1990年),选取CK(不施肥)、NP(氮磷肥配施)、NPK(氮磷钾肥配施)、NPKM(氮磷钾肥和猪粪配施)和NPKS(氮磷钾肥和秸秆半量还田)处理。于试验26年时(2016年)采集原状土壤(全土),分析不同处理团聚体组分中全钾、非交换性钾和交换性钾的含量变化,并进一步探讨土壤团聚体组分钾对全土钾的贡献率及其与作物吸钾量的相关关系,以期红壤旱地的钾肥管理提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

祁阳红壤肥力长期试验位于湖南省祁阳县中国

农业科学院红壤实验站内(111°52'E, 26°45'N)。海拔高度约为120 m,年平均温度18.0 °C,年降水量1 255 mm,年蒸发量1 470 mm,无霜期约为300 d,年均日照时数1 610 h,土壤母质为第四纪红壤。土壤初始(1990年)理化性质为:土壤pH为5.7,有机碳7.89 g kg⁻¹,全氮1.07 g kg⁻¹,全磷0.45 g kg⁻¹,全钾13.7 g kg⁻¹,交换性钾104 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究选取不同的施钾处理,具体为:CK(不施肥),NP(N和P₂O₅的年用量分别为300 kg hm⁻²和70 kg hm⁻²);NPK(NP处理基础上每年增施K₂O 87 kg hm⁻²);NPKM(NPK处理基础上每年配施鲜猪粪29.4 t hm⁻²)和NPKS(NPK处理的基础上将前茬作物秸秆1/2还田)。在试验设计之初,该地区的有机肥资源主要为畜禽粪便和作物秸秆,而作物秸秆除了还田之外,还可用作家用燃料和牲畜饲料等,所以将秸秆作为有机肥时,本试验设置了秸秆半量还田处理。每个处理2次重复,小区面积198 m²,种植方式为小麦/玉米轮作。除了NPKS处理之外,其他处理的秸秆全部移除。玉米季和小麦季的肥料用量各占全年施肥量的70%和30%,所有肥料均在小麦和玉米播种前一次性施用。氮肥、磷肥和钾肥种类分别为尿素(含N 46.2%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%)。田间管理同农民习惯一致。

1.3 作物吸钾量测定

在2016年小麦季和玉米季成熟期(5月上旬和8月中旬),每个小区分别采集5穴植株样,分成秸秆和籽粒,烘干后研磨,测定秸秆和籽粒的钾含量^[18],并根据干物重计算小麦和玉米的吸钾量。

1.4 土壤样品采集和团聚体分级

在2016年玉米收获后采集原状土壤样品,每个小区随机采集5个点,每个点使用铁锹采集20 cm深、5 cm宽和5 cm长的原状土壤样品,放入塑料盒中带回实验室进行团聚体分级。

土壤团聚体的分级采用干筛与湿筛相结合的方法。干筛参照中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室方法^[19],土样风干后用不锈钢套筛振荡进行干筛,分别得到>10 mm、5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm和<0.25 mm的七级机械稳定性土壤团聚体。根据干筛获得的各级团聚体百分比,配成质量为200.00 g(精确至0.01 g)的土样用于湿筛分析。湿筛参

照Elliott^[20]的方法：土样放置于孔径为2 mm的不锈钢筛上，室温下蒸馏水浸泡10 min，然后分别通过2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm和0.053 mm的不锈钢筛，竖直上下振荡50次，收集各级土筛上的土壤，获得>2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm和0.053~0.25 mm的水稳性土壤团聚体，<0.053 mm的团聚体通过将溶液沉降、离心获得。将各级筛层中的土粒转移至烧杯中，自然晾干后测定土壤全钾、非交换性钾和交换性钾含量，部分烘干称重计算各粒径团聚体组分的比例。本试验条件下，干筛与湿筛相结合法中团聚体各组分土壤钾素的回收率在95%左右。

1.5 土壤钾测定方法及计算

土壤全钾测定用氢氧化钠熔融浸提，交换性钾采用1 mol L⁻¹ NH₄OAc浸提，非交换性钾采用1 mol L⁻¹ HNO₃煮沸法浸提量减去交换性钾含量，所有浸提液或消煮待测液中的钾含量均用火焰光度法测定^[18]。

采用> 0.25 mm团聚体组分和团聚体破坏率来衡量团聚体稳定性。具体计算公式如下：

$$P_{SA>0.25mm} = \sum_{i>0.25mm} P_{SAi} \quad (1)$$

$$P_{SA>0.25mm} = \sum_{i>0.25mm} P_{SAi} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中， $P_{SA>0.25mm}$ 表示大于0.25 mm团聚体组分的比例，%； P_{SAi} 表示*i*级团聚体组分的比例，%；*i*表示团聚体组分的粒径，mm；PAD表示团聚体破坏率，%； $DP_{SA>0.25mm}$ 表示干筛分级中大于0.25 mm团聚体组分的比例，%； $WP_{SA>0.25mm}$ 表示湿筛分级中大于0.25 mm团聚体组分的比例，%。

借鉴江春玉等^[15]的方法，团聚体组分钾对全土钾的贡献率及其稳定性（以> 0.25 mm团聚体组分的贡献率来表示）的计算公式如下：

$$C(TK)_{SAi} = \frac{TK_{SAi} \times P_{SAi}}{\sum_i (TK_{SAi} \times P_{SAi})} \quad (3)$$

$$C(NEK)_{SAi} = \frac{NEK_{SAi} \times P_{SAi}}{\sum_i (NEK_{SAi} \times P_{SAi})} \quad (4)$$

$$C(EK)_{SAi} = \frac{EK_{SAi} \times P_{SAi}}{\sum_i (EK_{SAi} \times P_{SAi})} \quad (5)$$

式(3)~式(5)中： $C(TK)_{SAi}$ 、 $C(NEK)_{SAi}$ 和 $C(EK)_{SAi}$ 表示*i*级团聚体组分中钾素对全土全钾、非交换性钾和交换性钾的贡献率，%； TK_{SAi} 、 NEK_{SAi} 和 EK_{SAi} 分别表示*i*级团聚体组分全钾、非交换性钾和交换性钾的含量，mg kg⁻¹。

$$C(TK)_{SA>0.25mm} = \sum_{i>0.25mm} C(TK)_{SAi} \quad (6)$$

$$C(NEK)_{SA>0.25mm} = \sum_{i>0.25mm} C(NEK)_{SAi} \quad (7)$$

$$C(EK)_{SA>0.25mm} = \sum_{i>0.25mm} C(EK)_{SAi} \quad (8)$$

式(6)~式(8)中： $C(TK)_{SA>0.25mm}$ 、 $C(NEK)_{SA>0.25mm}$ 和 $C(EK)_{SA>0.25mm}$ 表示大于0.25 mm团聚体组分全钾、非交换性钾和交换性钾对全土全钾、非交换性钾和交换性钾的贡献率，%。

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理，SPSS 19.0进行统计分析，采用单因素方差分析(One-way ANOVA)测验处理间差异显著性($p < 0.05$)，采用Origin 8.1进行制图。

2 结 果

2.1 长期不同施肥下红壤旱地团聚体的分布特征

不同施肥措施显著改变红壤旱地的团聚体组分和比例(表1)。在所有处理中，配施猪粪处理(NPKM)下，>2 mm、1~2 mm和0.5~1 mm的团聚体组分比例最高，分别较CK处理增加了94.76%、64.72%和31.43%，较NPK处理增加了13.63%、16.12%和35.23%；但0.053~0.25 mm和<0.053 mm的团聚体组分比例则显著低于其他处理。秸秆半量还田处理(NPKS)下，>2 mm和1~2 mm的团聚体组分比例显著高于CK处理，与NP处理不存在显著差异；但与NPK处理相比，NPKS下，>2 mm和1~2 mm的团聚体组分比例则分别降低了11.91%和15.75%。这说明，长期施用猪粪对红壤旱地大团聚体的影响程度明显高于秸秆半量还田。

表1 长期不同施肥处理下红壤旱地团聚体各组分比例

Table 1 The distribution of soil aggregates in the upland red soil under long-term fertilization relative to treatment

处理 Treatments	湿筛方法中土壤团聚体组分的比例 Fractionation of soil aggregates using the wet sieve method (%)					
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
CK	18.71 ± 3.39c	7.88 ± 0.62d	9.84 ± 0.91b	13.97 ± 0.79a	19.99 ± 0.31a	29.61 ± 1.77a
NP	28.88 ± 1.99ab	7.42 ± 0.69cd	8.40 ± 1.10b	11.22 ± 1.24b	11.61 ± 0.73c	32.47 ± 1.17a
NPK	32.06 ± 5.46ab	11.18 ± 0.66b	9.57 ± 0.87b	12.33 ± 1.18ab	15.52 ± 2.82b	19.34 ± 6.19b
NPKM	36.43 ± 2.63a	12.98 ± 0.58a	12.94 ± 0.62a	12.84 ± 0.62ab	11.65 ± 0.55c	13.16 ± 2.46c
NPKS	28.25 ± 3.63b	9.42 ± 1.16c	9.36 ± 1.52b	12.09 ± 0.67ab	11.27 ± 1.06c	29.62 ± 2.12a

注: CK: 不施肥, NP: 氮磷配施, NPK: 氮磷钾配施, NPKM: 氮磷钾肥和猪粪配施, NPKS: 氮磷钾肥和秸秆半量还田。不同小写字母表示同一团聚体组分中不同处理存在显著差异 ($p < 0.05$)。下同Note: CK: No fertilizer, NP: Chemical nitrogen and phosphorus fertilizers, NPK: NP and potassium fertilizers, NPKM: NPK plus pig manure, and NPKS: NPK plus return of half of the straw harvest. Different lower case letters indicate significant differences between different treatments with the same fraction of soil aggregates at $p < 5\%$ level. The same below

2.2 长期不同施肥下红壤旱地团聚体的稳定性

长期不同施肥显著影响红壤旱地团聚体的稳定性(表2)。除了NPKS之外, NP、NPK和NPKM处理的>0.25 mm干筛团聚体组分比例均显著高于CK处理, 但各施肥处理之间无显著差异 ($p > 0.05$)。在>0.25 mm湿筛团聚体组分比例中, NPK、NPKM和NPKS处理均显著高于CK处理, 且NPKM处理最高, 而NP与CK处理间则无显

著差异。通过>0.25 mm干筛和湿筛团聚体比例计算的团聚体破坏度表明: 与CK处理相比, NPK、NPKM和NPKS的团聚体破坏度均显著降低, 其中, NPKM处理的团聚体破坏度显著低于NPK和NPKS处理, 而NPKS处理的团聚体破坏度与NPK和NP处理则不存在显著差异。表明长期猪粪还田更利于红壤旱地团聚体的稳定。

表2 长期不同施肥处理下红壤旱地团聚体稳定性变化

Table 2 Change in soil aggregate stability in the upland red soil under long-term fertilization relative to treatment

处理 Treatments	>0.25 mm干筛团聚体比例 Fraction of soil aggregates (>0.25 mm) (dry sieve) (%)	>0.25 mm湿筛团聚体比例 Fraction of soil aggregates (>0.25 mm) (wet sieve) (%)	团聚体破坏度 Destruction degree of soil aggregates (%)
CK	92.04 ± 0.30b	50.40 ± 1.72d	45.24 ± 1.91a
NP	95.66 ± 1.27a	55.92 ± 1.68cd	41.55 ± 1.31ab
NPK	95.13 ± 2.29a	65.14 ± 6.28b	31.60 ± 5.05c
NPKM	94.57 ± 0.20a	75.19 ± 2.37a	20.50 ± 2.36d
NPKS	93.95 ± 0.33ab	59.11 ± 1.20bc	37.08 ± 1.45bc

2.3 长期不同施肥下红壤旱地团聚体组分中钾含量变化

全钾、非交换性钾和交换性钾含量在不同团聚体组分中差异较小, 但对施肥措施响应显著(图1)。对于全钾含量, 所有团聚体组分大体呈现出NP、NPK和NPKM处理大于CK和NPKS处理, 这说明与NP和NPK处理相比, NPKM处理下团聚体组分全钾含量无明显的提升作用, 且NPKS处理还

显著降低了各团聚体组分中的全钾含量。对于非交换性钾和交换性钾含量, 与CK处理相比, 不施钾处理(NP)下各团聚体组分的非交换性钾和交换性钾含量无显著增加, 施钾处理(NPK、NPKM和NPKS)均呈现出显著增加趋势, 其中, NPKM处理显著高于其他处理。与NPK处理相比, NPKM处理>2 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.053 ~ 0.25 mm和<0.053 mm团聚体组分

中非交换性钾含量分别增加了24.37%、35.04%、42.65%、44.13%、49.04%和29.38%，交换性钾含量分别增加了176.3%、102.0%、103.0%、97.54%、93.25%和82.02%。上述结果表明，长期施用猪粪在显著增加土壤较大粒径团聚体组分的同

时，也提高了团聚体组分中交换性钾和非交换性钾含量。但NPKS处理各团聚体组分的非交换性钾和交换性钾含量则显著低于NPKM处理，说明秸秆半量还田对土壤较大粒径团聚体组分中非交换性钾和交换性钾含量的提升作用弱于长期配施猪粪处理。

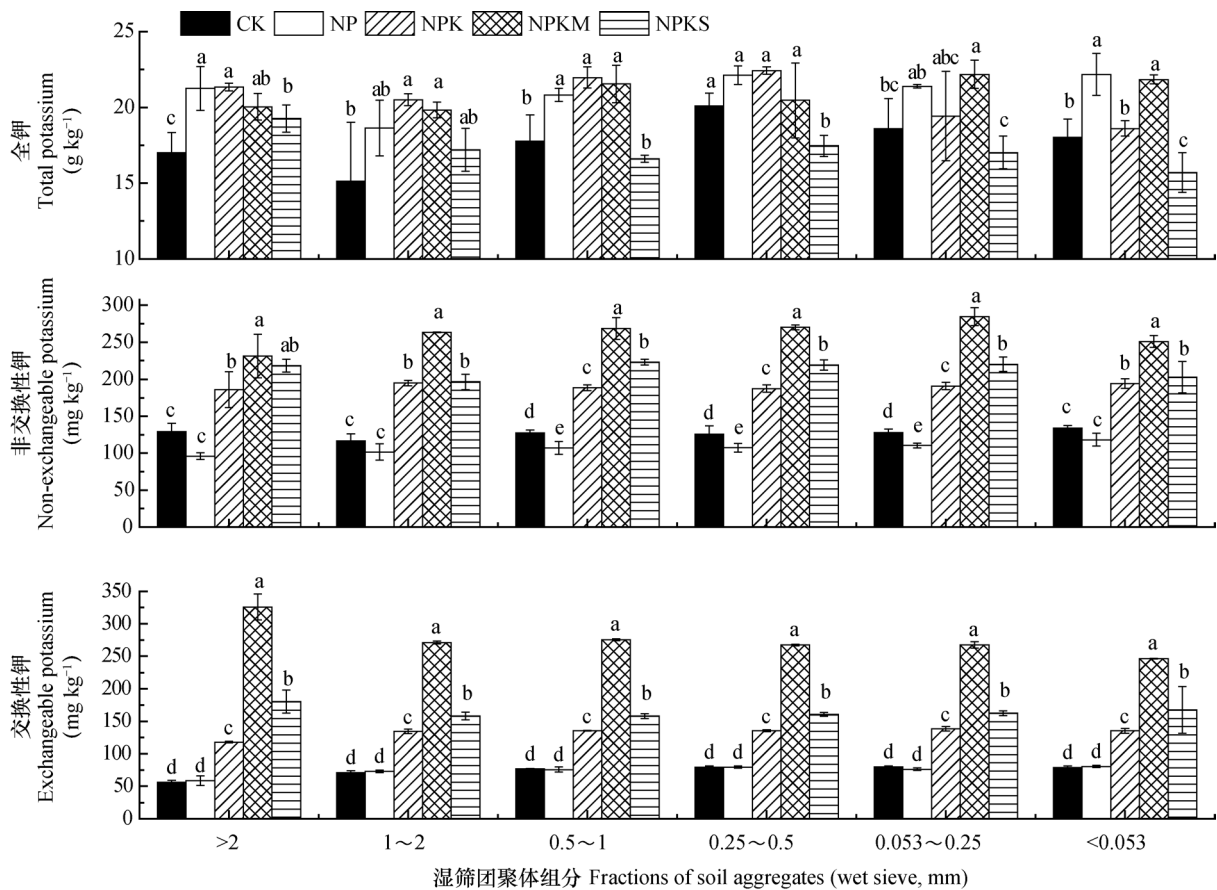


图1 长期不同施肥处理下红壤旱地团聚体中全钾、非交换性钾和交换性钾含量

Fig. 1 Total, non-exchangeable and exchangeable potassium concentrations in soil aggregates of the upland red soil under long-term fertilization relative to treatment

2.4 长期不同施肥下红壤旱地各团聚体组分钾对全土钾的贡献

在红壤旱地各团聚体组分钾对全土钾的贡献率中，>2 mm和<0.053 mm团聚体组分的贡献率明显高于其余团聚体组分（图2）。与CK处理相比，NPKM处理显著增加了>2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率，其中，对全土全钾的贡献率分别增加了98.78%、85.46%和39.07%，对全土非交换性钾的贡献率分别增加了76.56%、88.30%和40.16%，对全土交换性钾的贡献率分别增加了192.1%、61.63%和21.97%；同时，NPKM处理>2 mm、1~2 mm、

0.5~1 mm团聚体组分中全钾、交换性钾和非交换性钾对全土全钾、非交换性钾和交换性钾的贡献率也分别较NPK处理增加了6.25%~31.97%、5.72%~43.16%和41.98%~24.30%。但是，与CK和NPK处理相比，NPKM处理中0.053~0.25 mm和<0.053 mm的团聚体组分钾对全土钾的贡献率则显著降低。因此，与不施肥或化肥处理相比，化肥配施猪粪处理下较大粒径的团聚体组分钾对全土钾的贡献率增加，而在较小粒径团聚体组分中则呈下降趋势。

NPKS处理下各团聚体组分钾对全土钾的贡献率的影响明显弱于NPKM处理，NPKS处理>2 mm

和1~2 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率与NPK处理相当, 但<0.053 mm团聚体组分全钾、交换性钾和非交换性钾对全土全钾、非交换性钾和交换性钾的贡献率则较NPK处理增加了51.94%、43.94%

和46.12%。除了>2 mm团聚体组分呈现出NP处理显著高于CK之外, 其余团聚体组分钾对全土钾的贡献率均呈现出施钾处理之间(NP与CK处理)无显著差异。

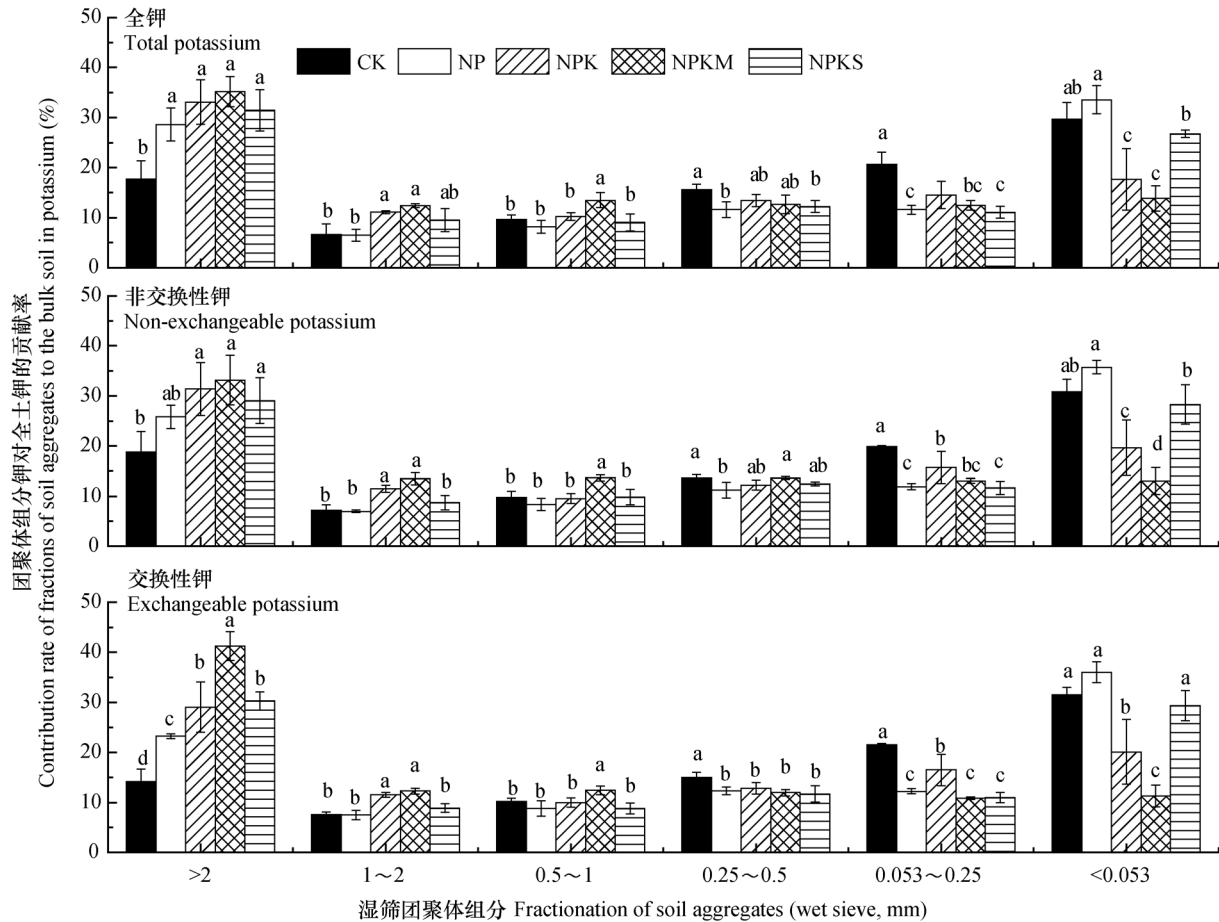


图2 长期不同施肥处理下红壤旱地各团聚体组分钾对全土钾的贡献率变化

Fig. 2 Change in contribution rate of different fractions of soil aggregates to the bulk soil in potassium in the upland red soil under long-term fertilization relative to treatment

2.5 红壤旱地>0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率及与作物吸钾量的关系

在土壤团聚体组分中, >0.25 mm团聚体组分的比例是反映土壤团聚体稳定性的重要指标, 因此, 本研究进一步计算了红壤旱地>0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率。施钾可以显著提高红壤旱地>0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率(表3)。在所有处理中, 施钾处理(NPK、NPKM和NPKS)的>0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率均显著高于不施钾处理(CK和NP)。NPKM处理>0.25 mm团聚体组分全钾、非交换性

钾和交换性钾对全土全钾、非交换性钾和交换性钾的贡献率分别较CK处理增加了48.44%、49.96%和66.23%, 分别较NPK处理增加了8.65%、22.86%和14.39%。与NPK处理相比, NPKS处理中>0.25 mm团聚体组分交换性钾和非交换性钾对全土交换性钾和非交换性钾的贡献率无显著增加, 但>0.25 mm团聚体组分全钾对全土全钾贡献率则显著降低了8.39%。因此, 与秸秆半量还田相比, 长期猪粪还田更利于增加红壤旱地>0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率。

表3 长期施钾下红壤旱地 > 0.25 mm 团聚体组分钾对全土钾的贡献率

Table 3 Contribution rate of the fraction (> 0.25 mm) of soil aggregates to the bulk soil in potassium in the upland red soil under long-term fertilization (%)

处理 Treatments	全钾 Total potassium	非交换性钾 Non-exchangeable potassium	交换性钾 Exchangeable potassium
CK	49.65 ± 1.47d	49.30 ± 2.20c	46.85 ± 1.21c
NP	54.85 ± 3.44d	52.38 ± 1.77c	51.77 ± 2.56c
NPK	67.83 ± 4.25b	64.63 ± 6.44b	63.39 ± 5.85b
NPKM	73.70 ± 2.26a	73.93 ± 3.08a	77.88 ± 2.22a
NPKS	62.14 ± 0.77c	60.04 ± 2.79b	59.68 ± 2.69b

在红壤旱地上，>0.25 mm 团聚体组分钾对全土钾的贡献率与小麦玉米总吸钾量之间存在显著的正相关关系（图3），且两者的关系可以用线性方程进行拟合。全钾、非交换性钾和交换性钾的拟合方程分别为 $y = -523.2 + 11.89x$ ($R^2 = 0.8304$, $p < 0.05$)、 $y = -499.9 + 11.82x$ ($R^2 = 0.8592$,

$p < 0.05$) 和 $y = -384.4 + 9.92x$ ($R^2 = 0.9044$, $p < 0.05$)。通过方程可知，当 > 0.25 mm 团聚体组分钾对全土钾的贡献率增加1%时，作物吸钾量可以增加 9.92 ~ 11.89 kg hm⁻²。因此，提高团聚体组分钾对全土钾的贡献率是促进作物吸钾的重要途径。

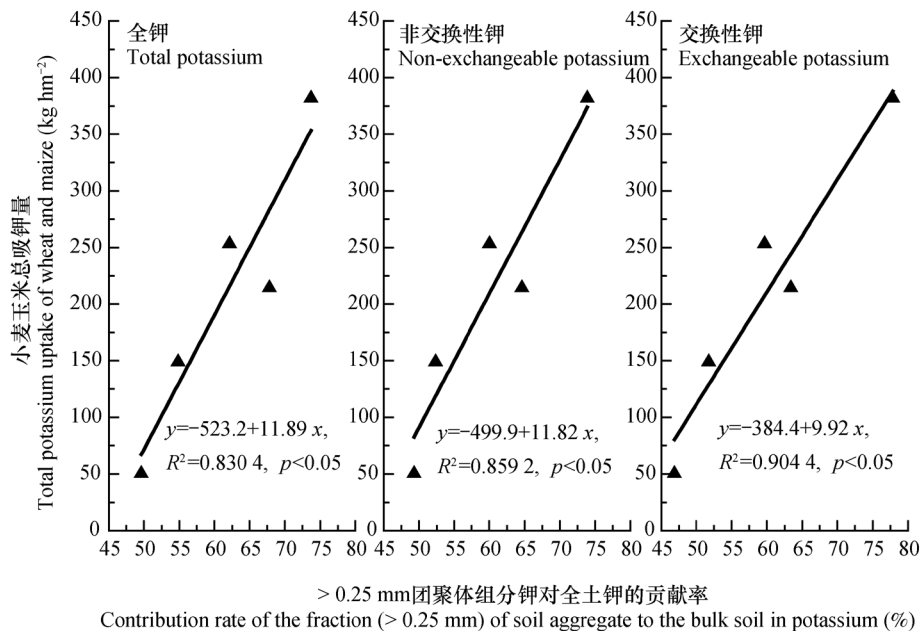


图3 红壤旱地 > 0.25 mm 团聚体组分钾对全土钾的贡献率与作物吸钾量的相关关系

Fig. 3 Relationship between crop potassium uptake and contribution rate of the fraction (> 0.25 mm) of soil aggregates to the bulk soil in potassium in the upland red soil

3 讨论

在红壤旱地上，酸、黏、瘦是限制该地区土壤生产力的突出问题^[21]，施用有机肥是红壤改良和培肥的重要途径之一^[22-23]。受该地区有机肥资源种类的影响，长期以来红壤旱地上施用的有机肥主

要为猪粪和作物秸秆。因此，比较猪粪和秸秆还田的土壤培肥效果对于指导红壤地区有机肥施用策略具有重要的指导意义。本研究结果表明，长期化肥配施猪粪处理显著改善红壤旱地的团聚体结构，其 > 2 mm、1 ~ 2 mm 和 0.5 ~ 1 mm 的团聚体组分比例较不施肥和化肥处理显著增加，而 0.053 ~ 0.25 mm

和 <0.053 mm的团聚体组分比例则显著降低,这与前人研究结果一致^[13, 24-26]。秸秆半量还田处理对土壤团聚体组分的影响程度以及团聚体的稳定性明显低于猪粪配施处理。这一方面与本研究中秸秆半量还田处理的有机碳投入量较少有关:本长期试验秸秆半量还田处理的年均有机碳投入量为 37.39 t hm^{-2} ,显著低于猪粪配施处理的有机碳投入量(136.2 t hm^{-2}),且猪粪配施处理的固碳效率显著高于秸秆半量还田处理^[27]。另一方面,与动物源有机肥相比,红壤旱地上秸秆类有机物料分解释放 CO_2 量显著较高^[27]。此外,秸秆半量还田下土壤酸化趋势明显,猪粪配施处理则未酸化^[28],而土壤pH的降低会通过影响黏土矿物来进一步影响土壤团聚体结构^[29-30]。上述结果与有机质促进土壤团聚体形成的理论^[31-32]相一致,长期投入有机肥可将土壤中微团聚体胶结成大团聚体,且大量处于分解状态的植物根系和微生物菌丝也进一步通过缠绕作用直接形成大团聚体。

在红壤旱地上,不同团聚体组分中的全钾、非交换性钾和交换性钾含量差异较小,原因是钾主要集中分布在土壤黏粒中^[33],而团聚体组分是由黏粒与胶结物质(有机物和铁铝氧化物)等形成的^[31-32]。但是,施肥可显著影响团聚体组分中的非交换性钾和交换性钾含量,尤其是猪粪配施处理,其各团聚体组分中非交换性钾和交换性钾含量均显著高于化肥处理。表明化肥配施猪粪是提高红壤旱地团聚体组分钾素供应能力的重要施肥措施,这与化肥配施猪粪提高土壤团聚体组分碳、氮、磷含量的结果相似^[12-16]。原因可能与猪粪带入较多的钾素有关,且猪粪配施化肥增加了土壤团聚体组分的有机胶结物质,改善了土壤结构^[12-13],从而减少了各团聚体组分中的钾素淋溶。与化肥处理相比,秸秆半量还田下土壤团聚体组分中非交换性钾和交换性钾含量则无显著提升,这可能与秸秆半量还田的钾素投入量明显低于猪粪配施处理有关^[6-7]。此外,秸秆半量还田处理的作物吸钾量明显高于化肥处理^[34],从而导致其土壤团聚体组分的钾素进一步耗竭。

不同团聚体组分钾对全土钾的贡献率存在较大差异,其中 >2 mm和 <0.053 mm的团聚体组分钾对全土钾的贡献率最高,其余团聚体组分则较低。这主要是与 >2 mm和 <0.053 mm团聚体组分的比例

较高有关。同时,由于化肥配施猪粪处理显著增加了 >2 mm、 $1\sim 2$ mm、 $0.5\sim 1$ mm团聚体组分,降低了 $0.053\sim 0.25$ mm和 <0.053 mm团聚体组分的比例,且猪粪带入较多的钾素^[7],以及显著影响土壤团聚体组分中的有机胶结物质^[24-25]。因此,与其他处理相比,化肥配施猪粪处理的钾素供应能力主要体现在 >2 mm、 $1\sim 2$ mm和 $0.5\sim 1$ mm团聚体组分。然而,与化肥处理相比,秸秆半量还田处理下各团聚体组分钾对全土钾的贡献率无显著增加,这可能与本研究的秸秆投入量较少和秸秆半量还田对团聚体组分的影响较弱有关。与不施肥和化肥处理相比,化肥和猪粪配施处理下较大粒径团聚体组分钾对全土钾的贡献率增加,而在较小粒径团聚体组分中则呈下降趋势,这一方面与施有机肥对大团聚体组分的影响程度高于微团聚体组分有关^[12-16],另一方面也可能与土壤各团聚体组分中钾的吸附解吸平衡有关,具体原因有待进一步研究。而在红壤旱地的微团聚体组分中,黏土矿物和大分子有机物的亲和性存在差异,与长期施化肥处理相比,长期施有机肥处理的土壤微团聚体组分中黏土矿物和大分子有机物呈现更高的分散性^[35],可能导致其对钾素的贡献率也存在差异。此外,红壤微团聚体组分的主要胶结物质为铁铝氧化物,从而导致其吸附的钾离子较少。同时,虽然不同施肥处理的有机碳和钾素输入量不同可能造成团聚体组分和钾素分配存在差异,但是,本研究在量化不同施肥处理对土壤团聚体组分中钾素分配规律的基础上,也充分证明,通过土壤结构改良能够进一步调控土壤团聚体组分中的钾素分配,从而为钾肥的高效利用提供技术支撑。

在所有处理中,化肥配施猪粪处理更利于增加红壤旱地 >0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率,且增幅显著高于秸秆半量还田处理。因此,与 >0.25 mm土壤团聚体的作用类似^[36],红壤旱地上 >0.25 mm团聚体组分的供钾能力也显著影响作物的钾素需求,本研究发现,当红壤旱地 >0.25 mm团聚体组分钾对全土钾的贡献率增加1%时,作物吸钾量增加 $9.92\sim 11.89 \text{ kg hm}^{-2}$,这说明通过施用有机肥可调控土壤团聚体组分,即增加 >0.25 mm团聚体组分可有效提升土壤供钾能力,从而有利于指导农民从改善土壤结构的角度优化钾肥施用技术。

4 结 论

长期化肥配施猪粪可显著改善红壤旱地的团聚体结构, 其较大粒径团聚体组分比例显著高于施化肥处理, 而在化肥基础上进行秸秆半量还田则不会显著影响土壤团聚体组分。与化肥处理相比, 长期化肥配施猪粪处理显著增加团聚体组分中非交换性钾和交换性钾的含量, 且 $>2\text{ mm}$ 、 $1\sim 2\text{ mm}$ 、 $0.5\sim 1\text{ mm}$ 团聚体组分钾对全土钾的贡献率也显著提高, 但秸秆半量还田处理下团聚体组分中钾素含量及团聚体组分钾对全土钾的贡献率均显著低于猪粪配施处理。说明化肥配施猪粪是提高红壤旱地团聚体组分钾素供应能力的重要施肥措施, 而通过调控红壤旱地 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体组分钾对全土钾的贡献率可显著提升土壤的供钾能力。

参 考 文 献

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 2014, 33 (24) : 7615—7622
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures (In Chinese). *Acta Ecologia Sinica*, 2014, 33 (24) : 7615—7622
- [2] Li Z, Veide B, Li D. Loss of K—bearing clay minerals in flood—irrigated rice—growing soils in Jiangxi Province, China. *Clays and Clay Minerals*, 2003, 51 (1) : 75—82
- [3] 朱永官, 罗家贤. 我国南方一些土壤的钾素状况及其含钾矿物. 土壤学报, 1994, 31 (4) : 430—438
Zhu Y G, Luo J X. Potassium status and contents of K—bearing minerals of some soils in southern China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31 (4) : 430—438
- [4] 张会民, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥条件下土壤钾素固定影响因素分析. 科学通报, 2009, 54 (17) : 2574—2580
Zhang H M, Xu M G, Zhang W J, et al. Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15—year long—term fertilization (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (17) : 2574—2580
- [5] Zhang H M, Yang X Y, He X H, et al. Effect of long—term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat—maize rotation in China. *Pedosphere*, 2011, 21 (2) : 154—163
- [6] 韩天富, 王伯仁, 张会民, 等. 长期施肥及石灰后效对不同生育期玉米根际钾素的影响. 土壤学报, 2017, 54 (6) : 1497—1507
Han T F, Wang B R, Zhang H M, et al. Effect of long—term fertilization and residual effect of liming on potassium in rhizosphere of maize relative to growth stage of the crop (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6) : 1497—1507
- [7] 岳龙凯, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 长期施肥红壤钾有效性研究. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6) : 1543—1550
Yue L K, Cai Z J, Xu M G, et al. Potassium availability in red soil under long—term fertilization (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6) : 1543—1550
- [8] 李娜, 韩立思, 吴正超, 等. 长期定位施肥对棕壤钾素吸附解吸动力学特征的影响. 中国农业科学, 2012, 45 (21) : 4396—4402
Li N, Han L S, Wu Z C, et al. Kinetics of K^+ adsorption and desorption of brown soil under long—term fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (21) : 4396—4402
- [9] 龙光强, 孙波. 基于钾平衡和氮淋失风险的红壤猪粪安全用量. 农业工程学报, 2011, 27 (11) : 300—305
Long G Q, Sun B. Safety amount of pig manure application based on potassium balance and nitrate leaching risk on red soil (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (11) : 300—305
- [10] Zhao S, He P, Qiu S, et al. Long—term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north—central China. *Field Crops Research*, 2014, 169: 116—122
- [11] Sui N, Zhou Z, Yu C, et al. Yield and potassium use efficiency of cotton with wheat straw incorporation and potassium fertilization on soils with various conditions in the wheat—cotton rotation system. *Field Crops Research*, 2015, 172: 132—144
- [12] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响. 土壤学报, 2017, 54 (5) : 1240—1250
Wang J W, Wang Y L, Yao Y, et al. Effects of long—term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5) : 1240—1250
- [13] Huang S, Peng X X, Huang Q R, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by

- long-term fertilization in a red soil of subtropical China. *Geoderma*, 2010, 154 (3): 364—369
- [14] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响. *土壤学报*, 2010, 47 (4): 715—722
Jiang C L, He Y Q, Liu X L, et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (4): 715—722
- [15] 江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 138—149
Jiang C Y, Liu P, Liu M, et al. Dynamics of aggregates composition and C, N distribution in rhizosphere of rice plants in red paddy soils different in soil fertility (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 138—149
- [16] 郭万伟, 肖和艾, 吴金水, 等. 红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点. *土壤学报*, 2009, 46 (1): 85—92
Guo W W, Xiao H A, Wu J S, et al. Distribution of phosphorus in water-stable aggregates in upland and paddy red earths (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (1): 85—92
- [17] 路雨楠, 徐殿斗, 成杭新, 等. 土壤团聚体中重金属富集特征研究进展. *土壤通报*, 2014, 45 (4): 1008—1013
Lu Y N, Xu D D, Cheng H X, et al. Recent advances in studying characteristics of heavy metals enriched in soil aggregates (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45 (4): 1008—1013
- [18] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese)*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [19] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. *土壤物理性质测定法*. 北京: 科学出版社, 1978
Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Analytical methods of soil physical properties (In Chinese)*. Beijing: Science Press, 1978
- [20] Elliott E. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3): 627—633
- [21] 孙波, 董元华, 徐明岗, 等. 加强红壤退化分区治理, 促进东南红壤丘陵区现代高效生态农业发展. *土壤*, 2015, 47 (2): 204—209
Sun B, Dong Y H, Xu M G, et al. Promote development of modern high-efficient ecological agriculture based on divisional remediation of red soil degradation in hilly region of southeastern China (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (2): 204—209
- [22] 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. *Pedosphere*, 2009, 19 (2): 199—207
- [23] Zhang W J, Xu M G, Wang B R, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84 (1): 59—69
- [24] Zhou H, Peng X H, Perfect E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. *Geoderma*, 2013, 195: 23—30
- [25] Peng X H, Zhu Q H, Xie Z B, et al. The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol. *Catena*, 2016, 138: 30—37
- [26] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响. *土壤*, 2011, 43 (5): 720—728
Liu Z L, Yu W T, Zhou H, et al. Effects of long-term fertilization on aggregate size distribution and nutrient content (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (5): 720—728
- [27] 张旭博, 徐明岗, 张文菊, 等. 添加有机物料后红壤 CO₂ 释放特征与微生物生物量动态. *中国农业科学*, 2011, 44 (24): 5013—5020
Zhang X B, Xu M G, Zhang W J, et al. Characteristics of CO₂ emission and microbial biomass dynamics after adding various organic materials in red soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (24): 5013—5020
- [28] Cai Z, Wang B, Xu M, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (2): 260—270
- [29] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响. *热带亚热带土壤科学*, 1997, 6 (3): 198—202
Zhang M K, He Z L. Effect of parent materials on formation of soil aggregates (In Chinese). *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997, 6 (3): 198—

- 202
- [30] 戎秋涛, 杨春茂, 徐文彬. 模拟酸雨对浙东北红壤中盐基离子和铝的淋失影响研究. 环境科学学报, 1997, 17 (1): 32—38
Rong Q T, Yang C M, Xu W B. Leaching of cation ions and aluminum in red soils from Zhejiang Province by simulated acid rain (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17 (1): 32—38
- [31] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregates stabilization in Ultisols from subtropical China. Geoderma, 2001, 99: 123—145
- [32] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型. 应用生态学报, 2002, 13 (11): 1495—1498
Shi Y, Chen X, Shen S M. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (11): 1495—1498
- [33] Ajiboye A G, Ogunwale A J. Forms and distribution of potassium in particle size fractions on talc overburden soils in Nigeria. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59 (2): 247—258
- [34] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 中国土壤肥力演变. 第2版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014
Xu M G, Zhang W J, Huang S M. The evolution of soil fertility in China (In Chinese). 2nd ed. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2014
- [35] 褚冰杰, 余光辉, 刘飞飞, 等. 土壤微团聚体中矿物—有机复合体特征. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1451—1458
Chu B J, Yu G H, Liu F F, et al. Characterization of mineral—organic complex in soil microaggregates with synchrotron radiation infrared micro—imaging method (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (6): 1451—1458
- [36] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响. 土壤学报, 1997, 34 (4): 359—366
Zhang M K, He Z L, Chen G C, et al. Formation of water—stable aggregates in red soils as affected by land use (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34 (4): 359—366

Effect of Long-term Fertilization on Aggregation Characteristics and Distribution of Potassium Fractions in Red Soil

LIU Kailou^{1, 3} HUANG Jing^{1, 2} ZHANG Huimin^{1, 2†} LI Dongchu^{1, 2} HAN Tianfu¹ CAI Zejiang^{1, 2}
WANG Boren^{1, 2} HUANG Qinghai³

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China)

(2 National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China)

(3 Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract 【Objective】 Fertilization greatly influences soil structure and nutrients accumulation in soil aggregates. However, it is still unclear how aggregate-associated potassium (K) changes in distribution in red soil. Therefore, effects of long-term fertilization on aggregate composition and fractions of K therein in red soil were investigated based on a long-term fertilization field experiment in the subtropical area of China, in an attempt to provide certain theoretical basis for amelioration of red soil and improvement of K fertilization efficiency in that region. 【Method】 From the long-term fertilization experiment at Qiyang County of Hunan Province, China (since 1990), five treatments were selected, including CK (no fertilizer), NP (application of chemical nitrogen and phosphorus in combination), NPK (application of NP and potassium in combination), NPKM (application of NPK plus pig manure), and NPKS (application of NPK

plus return of half of the straw harvested). Undisturbed soil samples were collected separately from the 0 ~ 20 cm layers of the five treatment plots in a 26-year-old (1990—2016) field of the experiment after the crop of corn was harvested, for fractionation of soil aggregates and analysis of total K (TK), non-exchangeable K (NEK) and exchangeable K (EK) therein, Then relationships of the K in the aggregates of different fractions with crop K uptake were explored. 【 Results 】 Results show: (1) Among the treatments, Treatment NPKM was the highest in proportion of aggregates of > 2 mm, 1 ~ 2 mm and 0.5 ~ 1 mm in particle size, but the lowest in proportion of aggregates of 0.053 ~ 0.25 mm and < 0.053 mm. However, Treatment NPKS did not affect proportions of aggregates of > 2 mm, 1 ~ 2 mm and 0.5 ~ 1 mm. (2) Compared with Treatment NPK, Treatment NPKM was 24.37% ~ 49.04% and 82.02% ~ 176.3%, higher respectively in NEK and EK content in soil aggregates. The contribution rate of the fraction (>0.5 mm) of aggregates to the bulk soil (CRAB) in TK, EK, and NEK increased by 6.25% ~ 31.97%, 5.72% ~ 43.16% and 6.33% ~ 41.98%, respectively, while that of the fraction (< 0.25 mm) decreased by 14.37% ~ 21.44%, 17.04% ~ 33.66% and 34.40% ~ 43.84%, respectively in Treatment NPKM. (3) No significant difference was observed between Treatment NPKS and Treatment NPK in EK and NEK content in aggregates of the same fraction and in contribution rate of the EK and NEK in each fraction of aggregates to the total K in CRAB. And (4) Linear regression analysis shows that when the contribution rate of the fractions (>0.25 mm) of aggregates increased by 1%, K uptake of the crop increased by 9.92 ~ 11.89 kg hm⁻². 【 Conclusion 】 Long-term application of chemical NPK fertilizers and pig manure in combination may significantly improve formation of soil aggregates in upland red soil and hence increases contribution rate of the aggregates to the bulk soil in K and consequently crop uptake of K.

Key words Soil potassium; Aggregate; Red soil; Long-term experiment; Pig manure

(责任编辑: 陈荣府)