

水旱轮作条件下不同类型土壤供钾能力及钾素动态变化研究*

占丽平¹ 李小坤^{1,2†} 鲁剑巍^{1,2} 丛日环^{1,2} 王瑾¹ 王箐¹ 廖志文¹

(1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

(2 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要 采用盆栽试验,研究了黑麦草-水稻轮作条件下不同类型土壤供钾能力及钾素动态变化,以期土壤供钾机制研究及合理的钾素调控提供依据。结果表明:不施钾条件下(NP处理),潮土上种植作物的生物量和吸钾量最高,黄褐土次之,红壤最低;施钾条件下(NPK处理),3种土壤上种植作物的生物量无显著差异,作物吸钾量为黄褐土>潮土>红壤。整个轮作期,红壤、黄褐土和潮土NPK处理的作物生物量较NP处理分别增加55.6%、45.2%和23.2%,作物吸钾量分别增加368.8%、166.8%和74.5%。轮作前季(黑麦草季),NP处理的3种土壤水溶性钾含量和交换性钾含量均降低,潮土非交换性钾含量明显降低,红壤和黄褐土非交换性钾含量在前期变化不大,中期有升高的趋势,后期显著降低;NPK处理的土壤钾含量均高于NP处理,且各种形态钾含量的变化趋势与NP处理基本相同。轮作后季(水稻季),NP处理的3种土壤水溶性钾含量变化不大,交换性钾含量呈先降低后升高的趋势,非交换性钾含量呈先升高后降低的趋势;NPK处理的土壤交换性钾含量在水稻生长前期明显升高,中期下降,后期有略微上升,水溶性钾和非交换性钾含量有先升高后降低的变化趋势。综上所述,在不施钾条件下,轮作期内各土壤钾素消耗量较大,水溶性钾和交换性钾含量降低,并促进了非交换性钾的释放;施钾能提高土壤水溶性钾和交换性钾含量,并向非交换性钾方向转化,施钾对黑麦草和水稻有显著增产效果,可以有效地提高土壤供钾水平。

关键词 土壤供钾能力;红壤;黄褐土;潮土;黑麦草;水稻

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

水旱轮作是我国重要的耕作制度。随着吸钾量大的高产作物品种的推广、复种指数的增加和农业集约化程度的提高,作物收获每年从农田中移走的钾量逐渐增加,而对钾肥的投入远不能维持钾素平衡,农田钾素输出与投入不平衡加剧;另一方面,水旱轮作区,水热资源丰富,钾素流失严重^[1]。土壤缺钾面积不断增加,土壤钾素耗竭日趋严重^[2]。土壤钾素的缺乏常常造成作物因生理失调而减产^[3],农田钾素亏缺已成为农业生产持续发展的限制因素之一^[4]。施用钾肥是缓解土壤钾素亏缺的重要途径^[5]。但是,我国钾肥资源匮乏^[6],目前我国本土钾肥供给远远不能满足需求^[7]。在钾肥资源短缺的形势下,需要高效利用钾素来充分发挥作物的产量潜力和进一步改善产品品质。因此开展水旱轮作条件下的土壤供钾能力研究对合理施用

钾肥和高产节源具有重要意义。

土壤中的钾有多种形态,一般将其分为四部分,第一部分是不易被植物吸收利用的钾,即结构钾,主要是长石和白云母中的钾;第二部分是交换性钾,包括黑云母中的钾和黏土矿物所固定的钾;第三部分是吸附于土壤胶体表面并能被溶液中的阳离子在短时间内代换的钾,即交换性钾;第四部分是土壤溶液中的钾,即水溶性钾^[8-9]。韩真^[10]研究了不同土壤类型钾形态与钾素供应情况,廖育林等^[11]通过大田试验研究了长期施钾对红壤水稻土钾素状况的影响。雷永振等^[12]研究表明,不施钾处理土壤中的速效钾含量明显降低,而施钾处理则有所增加;土壤缓效钾与速效钾的变化趋势相同,但缓效钾含量的变化没有速效钾明显。土壤中钾的固定与释放是影响整个平衡体系的关键,同时也

* 国家自然科学基金项目(41001178)、公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203013)、华中农业大学新晋博士科研启动专项(2009BQ080)和中央高校基本科研业务费专项资金联合资助

† 通讯作者, Tel: 027-61379276; E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 占丽平(1988—), 女, 湖南石门人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力。 E-mail: zhan.li.ping@163.com

收稿日期: 2012-04-01; 收到修改稿日期: 2012-09-08

是影响土壤供钾能力的原因。水旱轮作条件下,由于作物对钾素的吸收利用以及干湿交替、温度等外界环境条件的影响,土壤各种形态钾之间可以相互转化并处于动态平衡。研究钾在土壤中的形态变化有助于了解钾的土壤化学行为,从而指导合理施肥。本文采用盆栽试验,研究水旱轮作条件下不同类型土壤的供钾能力及不同形态钾素含量动态变化特征,以充分发挥土壤的供钾能力,为维持作物高产和土壤钾素可持续利用以及钾肥的合理施用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤为红壤(RS)、黄褐土(YCS)和潮土(FS)。其中,红壤采自湖北省赤壁市,由第四纪红壤母质发育而成,质地为壤土;黄褐土采自湖北省襄阳市,由第四纪黄土母质发育而成,质地为黏土;潮土采自湖北省赤壁市,由第四纪红壤母质发育而成,质地为砂土。采样深度为0~20 cm,风干后过2 mm筛,其基本理化性质如表1所示。供试作物

种为“超高”一年生黑麦草(*Lolium multiflorum* cv. Chaogao),杂交水稻两优036(*Oryza sativa* L. cv. Liangyou036)。

1.2 试验设计

试验为盆栽试验,水旱轮作。3种类型土壤,两个钾素水平:不施钾(NP)和施钾(NPK)各处理4次重复。

盆栽试验采用12 cm×15 cm(直径×高)塑料桶进行,每桶装风干土6 kg,将土壤与氮、磷、钾肥拌匀后装盆,中微量元素养分以营养液的方式施入。追施的氮肥以营养液的形式施入。轮作前季种植黑麦草,每kg土施N 0.24 g、P₂O₅ 0.15 g、K₂O 0.20 g、MgSO₄·7H₂O 0.25 g、CaCl₂ 0.10 g。肥料品种分别为分析纯尿素、NH₄H₂PO₄、KCl、MgSO₄·7H₂O和CaCl₂。微量元素肥料采用1 000倍阿农营养液配方^[13],每kg土加1.0 ml。氮肥总用量的55%作基肥,余下的均分为3份,在每次刈割后追施,磷、钾、钙、镁、微肥等均一次性基施。轮作后季种植水稻,每kg土施N 0.28 g、P₂O₅ 0.15 g和K₂O 0.20 g,氮肥总用量的25.0%作基肥,余下的均分为3次追施。肥料种类及中、微量元素肥料用量施用方法同黑麦草。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土壤类型 Soil type	pH	CEC (cmol kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	水溶性钾 Sol-K	交换性钾 Ex-K (mg kg ⁻¹)	非交换性钾 Nonex-K	全钾 Total-K	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
红壤 Red soil	4.7	15.7	7.7	15.5	66.6	43.5	13.0	51.8	894.0	54.2
黄褐土 Yellow cinnamon soil	7.0	19.9	15.1	8.8	119.7	553.2	15.6	90.9	884.1	25.0
潮土 luvo-aquic soil	8.3	5.1	9.4	40.5	60.7	503.5	18.5	524.1	462.9	13.0

黑麦草于2010年10月17日施基肥、播种,播种量为每盆25粒种子,15 d后定苗20棵,根据黑麦草的生长状况分别于2011年1月18日、3月17日、4月17日刈割并追肥,5月14日收获。水稻于2011年5月30日施基肥、播种,播种量为每盆3粒种子,15 d后定苗1棵,10月10日收获。黑麦草样品首先在105℃烘箱中杀青30 min,然后60℃烘48 h至恒重,称量干样质量。水稻样品分成稻草和稻谷两部分,分别烘干至恒重。将烘干的植物样磨碎,待测。

土壤样品的获取:采用长450 mm、直径为6 mm的圆柱形螺旋取样器垂直插入土壤,随机取点9个,混合均匀后风干、过筛。黑麦草季取土壤样品4次,具体取样时间为黑麦草播种后0 d(2010年10月17

日)、93 d(2011年1月20日)、151 d(2011年3月18日)和207 d(2011年5月14日)。水稻季取土样3次,具体取样时间为水稻播种后77 d(2011年8月16日)、107 d(2011年9月16日)、130 d(2011年10月10日)。水稻季获取土壤样品之前,控制浇水,使土壤有一定程度的落干,保证土样能够成功获取。

1.3 测试分析方法

植物样品经浓H₂SO₄-H₂O₂消化,用火焰光度法测定植物钾含量^[14]。

钾素吸收量(g pot⁻¹) = 作物干物质量(g pot⁻¹) × 相应植株的钾含量(g kg⁻¹) × 10⁻³

土壤pH采用电位法,用pH计测定(水土比2.5:1);土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土

壤机械组成用吸管法测定;土壤水溶性钾按 10:1 水土比用去离子水浸提、速效性钾按 10:1 水土比用 1.0 mol L⁻¹ 中性 NH₄OAc 浸提、酸溶性钾按 10:1 水土比用 1.0 mol L⁻¹ 的热 HNO₃ 浸提、全钾用 NaOH 熔融浸提,过滤后用火焰光度法测定^[14]。土壤交换性钾 = 速效性钾 - 水溶性钾;土壤非交换性钾 = 酸溶性钾 - 速效性钾。

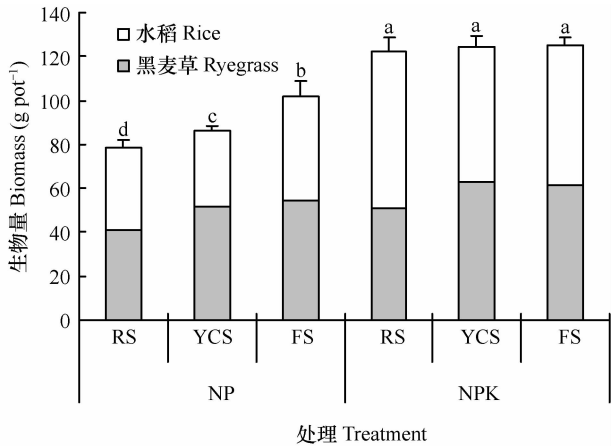
1.4 数据处理

试验数据统计分析和作图利用 SPSS Statistics 17.0 软件和 Microsoft Office 软件。试验数据的差异显著性水平($p < 0.05$)通过最小显著法(LSD)进行检验。

2 结果

2.1 水旱轮作条件下不同类型土壤的供钾能力

2.1.1 作物生物量 从图 1 可以看出,水旱轮作条件下,不施钾(NP)处理的潮土上种植作物的生物量最大,与黄褐土和红壤相比分别增加 18.1% 和 29.9%,说明在基础地力条件下,潮土的生产能力最高,黄褐土次之,红壤最差,这可能与土壤本身的供钾能力有关。潮土的水溶性钾含量和非交换性钾含量较高,随着作物吸钾,非交换性钾向水溶性钾和交换性钾转化,潮土的质地偏砂,养分释放速度较快,所以能获得较高的生物量,红壤的水溶性钾、交换性钾和非交换性钾的含量均较低,所以获得的生物量最低;黄褐土的水溶性钾含量较低,交换性钾和非交换性钾含量较高,其作物的生物量高于红壤,低于潮土。



1) RS: 红壤Red soil, YCS: 黄褐土Yellow cinnamon soil, FS: 潮土 Fluvo-aquic soil; 2) 不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平上差异显著,下同The different lower case letters indicate the significant differences at a $p < 0.05$ level. The same below

图 1 黑麦草-水稻轮作条件下不同类型土壤的作物生物量 Fig. 1 Crop biomass in different types of soil under ryegrass-rice rotation

3 种土壤施钾(NPK)处理的作物生物量均高于不施钾(NP)处理。与不施钾处理相比,红壤、黄褐土和潮土施钾处理黑麦草生物量分别增加 25.9%、22.0% 和 12.4%,水稻生物量分别增加 88.9%、81.8% 和 35.9%。钾肥的施用能显著提高作物的生物量。但 3 种土壤间作物的生物量无显著差异($p > 0.05$),说明在施钾条件下,3 种土壤的生产能力没有差异。轮作前季(黑麦草季)的施钾增产效果低于轮作后季(水稻季),说明黑麦草-水稻轮作方式下,3 种土壤在轮作前季种植黑麦草时供钾较充足,而后季种植水稻时供钾不足。所以在后季种植水稻时,需要补充足够用量的钾肥以保证作物的产量。

整个轮作期,红壤、黄褐土和潮土 NPK 处理的作物生物量较 NP 处理分别增加 55.6%、45.2% 和 23.2%。3 种土壤的施钾增产率大小顺序表现为红壤 > 黄褐土 > 潮土,3 种土壤的施钾效果有所不同,说明不同土壤施钾有效的临界指标是不同的。

2.1.2 作物钾素吸收量 不施钾条件下(图 2),潮土上种植作物的吸钾量较黄褐土和红壤分别增加 37.8% 和 263.5%,说明基础地力条件下,潮土的供钾能力最强,黄褐土次之,红壤最低。施钾条件下,黄褐土上种植作物的钾素吸收量最高,较潮土和红壤分别增加 5.9% 和 49.4%,而三者的生物量无显著差异,说明施钾条件下,黄褐土和潮土的供钾强度过高,且作物存在钾的奢侈吸收现象。

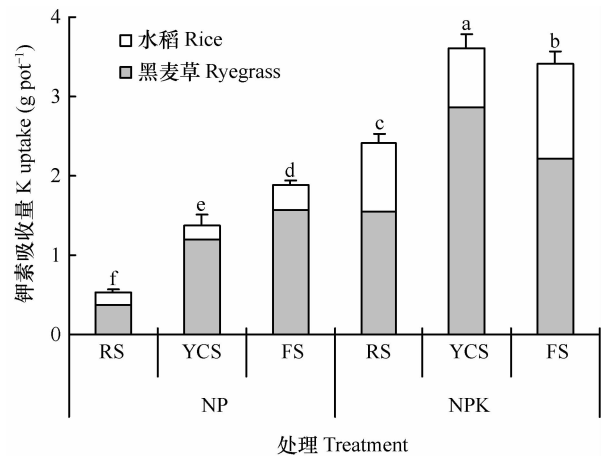


图 2 黑麦草-水稻轮作条件下不同类型土壤的钾素吸收量 Fig. 2 Crop K uptake in different types of soil under ryegrass-rice rotation

红壤、黄褐土和潮土 NPK 处理的作物钾素吸收量较 NP 处理分别增加 368.8%、166.8% 和 74.5%,说明外源钾的施入显著提高了土壤的供钾能力。

从图 2 还可看出,无论施钾与否,前季黑麦草的钾素吸收量均高于水稻,可能与黑麦草的钾含量高、吸钾强度大有关^[15],同时也说明水旱轮作条件下应注重钾的合理分配。

2.2 水旱轮作条件下土壤钾素变化

2.2.1 土壤水溶性钾

黑麦草-水稻轮作条件下,红壤、黄褐土和潮土 NP 处理的水溶性钾含量在黑麦草季均有降低的趋势(图 3),在水稻季前期(水稻播种后 0~76 d)有略微升高的趋势,后期(水稻播种后 77~130 d)有略微降低的趋势,变化不大,说明当土壤的水溶性钾含量降低至一定程度后不再降低或略有增加,这可能与土壤本身的水溶性钾含量和其他形态钾态素向水溶性钾的转化有关。红壤、黄褐土和潮土 NPK 处理水溶性钾含量在水稻季前期(水稻播种后 0~76 d)呈明显升高趋势,说明钾肥的施用显著提高了土壤的水溶性钾含量,施入的钾肥对土壤水溶性钾含量的影响大于水稻生长对钾素吸收的影响,后期由于水稻不断吸钾,水溶性钾含量有降低趋势。轮作结束时,NP 处理的红壤、黄褐土和潮土的水溶性钾含量与试验前土壤相比分别降低 10.7 mg kg⁻¹、3.4 mg kg⁻¹和 27.9 mg kg⁻¹,NPK 处

理的红壤、黄褐土和潮土的水溶性钾含量与试验前土壤相比分别降低 5.3 mg kg⁻¹、升高 3.2 mg kg⁻¹和降低 19.7 mg kg⁻¹。

图 3 看出,3 种类型土壤 NPK 处理的水溶性钾含量明显高于 NP 处理。无论施钾与否,土壤水溶性钾含量在作物生长过程中不是固定不变的,而是一个波动的过程。黑麦草季末期(黑麦草播种后 207 d),NPK 和 NP 处理红壤、黄褐土、潮土水溶性钾含量较前期(黑麦草播种后 0 d)分别降低 55.4 mg kg⁻¹、19.3 mg kg⁻¹、95.1 mg kg⁻¹和 9.4 mg kg⁻¹、4.4 mg kg⁻¹、27.5 mg kg⁻¹,说明随着黑麦草的生长,水溶性钾首先被作物吸收利用,其含量不断降低,不同土壤水溶性钾的变化特征有所不同,这可能与土壤本身的理化性质和供钾能力有关。各土壤 NPK 处理水溶性钾含量降低程度显著高于 NP 处理($p < 0.05$),这可能与 NPK 处理黑麦草吸钾量高有关,说明施钾能增加作物的钾素吸收,提高土壤的供钾能力。结果表明,土壤的水溶性钾含量不仅受外界因素的影响(施钾、作物生长、水作、旱作等),还受到土壤本身理化性质的影响(钾含量、钾素平衡、颗粒组成等)。

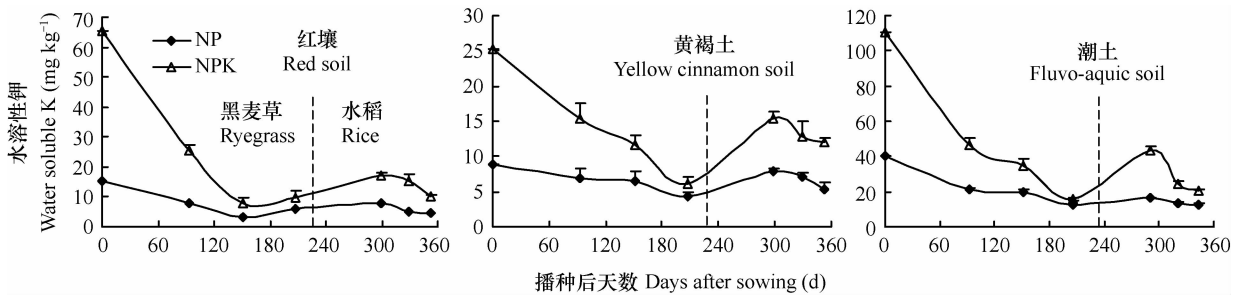


图 3 黑麦草-水稻轮作条件下土壤水溶性钾变化

Fig. 3 Dynamics of water soluble K in different types of soil under ryegrass-rice rotation

2.2.2 土壤交换性钾

图 4 表明,轮作前季(黑麦草季),无论 NPK 或 NP 处理,随着黑麦草的生长和吸钾强度的增加,交换性钾向水溶性钾转化并被吸收利用,各土壤交换性钾含量均显著降低($p < 0.05$),潮土 NPK 处理的交换性钾含量呈先略微升高(黑麦草播种后 0~93 d)后明显降低(黑麦草播种后 94~207 d)的变化趋势,这可能与潮土交换性钾含量较低和水溶性钾含量较高有关,黑麦草季前期作物首先吸收水溶性钾,所以施钾首先提高潮土交换性钾含量,随着水溶性钾的消耗,交换性钾向水溶性钾转化以供黑麦草的正常生长。

轮作后季(水稻季),红壤、黄褐土和潮土 NP 处理的交换性钾含量呈先降低(水稻播种后 0~

106 d)后升高(水稻播种后 107~130 d)的趋势,说明随着水稻的生长和吸钾强度的增加,NP 处理土壤的交换性钾含量逐渐降低;NPK 处理的土壤由于钾肥的施用,在水稻季前期(水稻播种后 0~76 d)有明显升高趋势,说明在水稻生长前期,施入的钾肥对土壤交换性钾含量的影响大于水稻生长对钾素吸收的影响;水稻季中期(水稻播种后 77~106 d),随着作物的生长,交换性钾向水溶性钾转化并被吸收利用,其含量明显降低;NP 和 NPK 处理的 3 种土壤交换性钾含量在水稻季末期(水稻播种后 107~130 d)有上升趋势,可能由于土壤中水稻可利用的交换性钾减少,打破钾素平衡,促进矿物钾或非交换性钾向交换性钾的转

化。轮作结束时,NP 处理的红壤、黄褐土和潮土
的交换性钾含量与试验前土壤相比分别降低
42.5 mg kg⁻¹、39.2 mg kg⁻¹和 46.6 mg kg⁻¹,

NPK 处理的红壤、黄褐土和潮土的交换性钾含量
与试验前土壤相比分别升高 0.7 mg kg⁻¹、升高
25.2 mg kg⁻¹和降低 31.1 mg kg⁻¹。

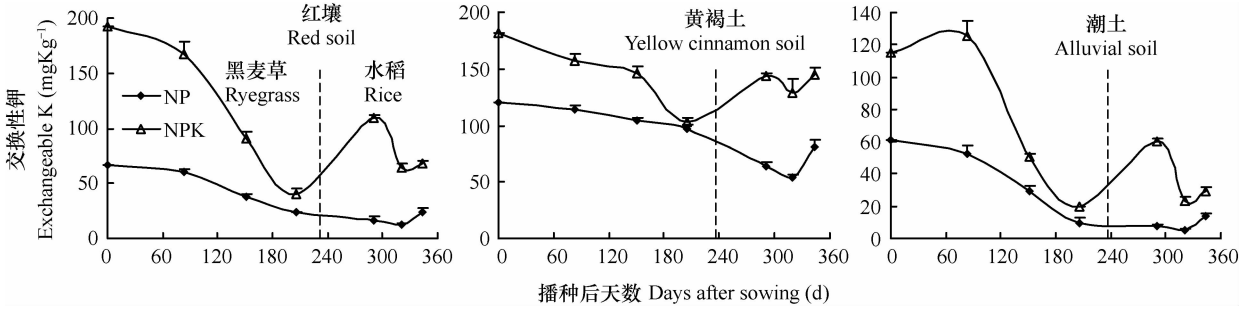


图 4 黑麦草-水稻轮作条件下土壤交换性钾变化

Fig. 4 Dynamics of exchangeable K in different types of soil under ryegrass-rice rotation

2.2.3 土壤非交换性钾 黑麦草-水稻轮作条件
下,红壤、黄褐土和潮土不同处理的非交换性钾含
量变化如图 5 所示。红壤和黄褐土 NP 处理的非交
换性钾含量在轮作前季(黑麦草季)前期(黑麦草播
种后 0~93 d)变化不大,中期(黑麦草播种后 94~
151 d)有升高的趋势,后期(黑麦草播种后 152~
207 d)有降低的趋势,潮土 NP 处理的非交换性钾含
量在轮作前季(黑麦草季)有降低的趋势;3 种土壤
NP 处理的非交换性钾含量在轮作后季(水稻季)有先
升高再降低的趋势;轮作结束时,NP 处理的红壤、黄褐
土和潮土的非交换性钾含量与试验前土壤相比分别降
低 14.3 mg kg⁻¹、77.3 mg kg⁻¹和 169.0 mg kg⁻¹。

壤、黄褐土和潮土的非交换性钾含量与试验前土壤
相比分别升高 3.6 mg kg⁻¹、降低 3.2 mg kg⁻¹和降
低 93.9 mg kg⁻¹。

轮作前季(黑麦草季)前期,红壤和黄褐土 NP 处
理的非交换性钾含量变化不大,说明前期土壤非交换
性钾对黑麦草的贡献很小;随着作物的生长,土壤矿物
态钾向非交换性钾转化使得黑麦草季中期土壤的
非交换性钾含量升高,黑麦草季后期非交换性钾又向
交换性钾转化以供作物的吸收利用因此有下降的趋
势。红壤和黄褐土 NPK 处理的非交换性钾含量呈先
升高后降低的趋势,说明除了土壤本身的钾素转化作
用外,施用的外源钾也分配于非交换态钾,施入的钾
肥对非交换性钾含量的影响大于作物的吸收,随着黑
麦草的生长吸钾,非交换性钾向速效钾释放以供作物
正常生长,黑麦草季后期黄褐土 NPK 处理土壤非交
换性钾含量较 NP 处理有所降低,说明黄褐土在施钾
条件下黑麦草的吸钾强度更大;潮土 NPK 和 NP 处理
非交换性钾含量呈明显降低趋势,说明对于潮土来
说非交换性钾对作物的贡献较大。

黑麦草季,红壤和黄褐土 NPK 处理的非交换性
钾含量有先升高后降低的趋势,潮土有降低的趋
势;水稻季,红壤和黄褐土 NPK 处理的非交换性钾
含量有先升高后降低的趋势;潮土在水稻季前期
(水稻播种后 0~76 d)变化不大,中期(水稻播种后
77~106 d)有升高的趋势,后期(水稻播种后 107~
130 d)有降低的趋势,轮作结束时,NPK 处理的红

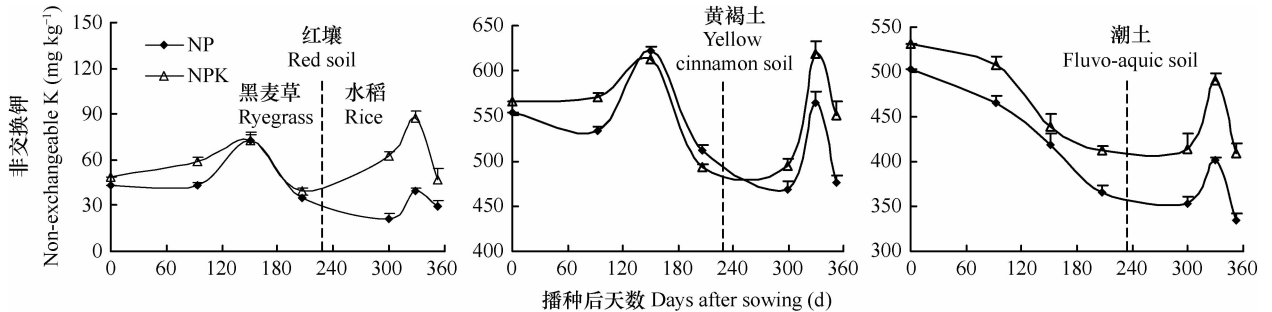


图 5 黑麦草-水稻轮作条件下土壤非交换性钾变化

Fig. 5 Dynamics of non-exchangeable K in different types of soil under ryegrass-rice rotation

轮作后季(水稻季),各土壤 NP 和 NPK 处理的非交换性钾含量有上升趋势,这可能是由于钾肥的施用以及温度升高促进了土壤矿物态钾向非交换态钾的转化,随着水稻生长的进行,又有降低的趋势,可能与作物钾素吸收和土壤中钾素平衡有关。

3 讨 论

黑麦草-水稻轮作条件下,3 种土壤的供钾能力有所差异,不施钾条件下,各土壤供钾能力顺序为潮土 > 黄褐土 > 红壤,施钾条件下各土壤供钾能力顺序为黄褐土 > 潮土 > 红壤,说明土壤类型不同,其供钾能力会有差异,外界因素如施肥等也会影响土壤的供钾能力。对于 3 种土壤,钾肥施用可以显著提高作物的生物量,尤其是在土壤钾素肥力较低的土壤上增产效果最显著,这与很多研究结果一致^[5,16-20]。3 种土壤的施钾增产效果有差异,顺序为红壤 > 黄褐土 > 潮土,且种植方式之间也有差异,黑麦草季(旱作)的施钾增产效果低于水稻季(水作),这与钾在作物上的产量效应受多种因素的影响有关。在氮、磷养分相同的基础上,钾肥在作物上的产量效应除受气候、灌水、作物等因素的影响外,土壤本身的性质及作物的种植方式对钾肥在作物上的产量效应也有重要的影响^[21]。其中,土壤质地是决定土壤速效钾含量的主要因素^[22]。潮土质地偏砂,养分释放速度较快,土壤钾素供应较快,所以施钾增产效果最低。因此,在水旱轮作中重视钾肥施用的同时,要根据土壤本身的性质来进行钾肥的合理分配,从而获得最佳产量效应。

整个轮作期,NPK 处理的作物吸钾量与 NP 处理相比显著增加。所以在实际生产中种植黑麦草和水稻时,不仅要施用氮磷肥,还要施钾肥,这样才能满足作物对钾素的需求,并且保持耕地的养分平衡,避免掠夺性种植^[23]。但钾肥也不能过量,否则会造成作物的钾素奢侈吸收,导致钾素资源的浪费。从研究结果还可以看出,黑麦草对钾素的需求量较水稻高,因此,在实际的轮作种植生产中,应该根据作物的实际需要来施用钾肥。施用钾肥是影响土壤钾素状况的外源因素之一,适量施钾能使土壤钾素明显增加^[24],黑麦草-水稻轮作条件下,NPK 处理的土壤钾含量高于 NP 处理,说明施钾能提高不同时期的土壤钾含量,改善土壤钾素状况,培肥地力,对可持续农业具有深远的意义。

土壤各形态钾之间可以相互转化,并处于一

个动态的平衡体系中。土壤的干湿状况和肥料施用等因素影响着这一平衡^[25]。作物首先吸收利用土壤中的水溶性钾和交换性钾,非交换性钾是作物吸收速效钾(水溶性钾和交换性钾)的最直接来源,土壤速效钾被作物吸收后土壤非交换性钾就会释放出来供作物吸收^[26]。3 种土壤各种形态钾的动态变化有相同的地方,也有不同的地方。不施钾条件下,试验后 3 种土壤的水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量与试验前土壤相比均下降,其中红壤的交换性钾含量降低最多,说明红壤的交换性钾对作物的贡献最大,黄褐土和潮土的非交换性钾含量降低最多,说明黄褐土和潮土的非交换性钾对作物的贡献最大。施钾条件下,3 种土壤的各种形态钾含量变化趋势有所不同,肥料施入土壤后,有一部分被作物吸收,一部分被土壤吸附固定,由于特定土壤中钾的吸附位点是一定的,不同吸附位点对钾离子的吸附能力不同^[27]。施钾后,土壤含钾量发生变化,土壤中的吸附位点变化,致使不同土壤对钾肥的保持能力不同,且作物对钾素的吸收量也不同,所以试验后土壤的各形态钾含量与试验前土壤相比有升高也有降低。黑麦草季和水稻季的各土壤钾素变化特征不同,说明种植方式(水作和旱作)对土壤各形态钾之间的转化具有明显影响^[28]。

水分直接影响土壤各形态钾之间的相互转化^[29]。长期以来,人们在测定土壤钾素含量时,一般先将土壤样品风干后再测定,干湿变化势必会引起土壤不同形态钾素之间的相互转化。Luebs 等^[30]研究表明,将田间采集的湿土进行干燥处理可以降低交换性钾,也可以增加交换性钾,湿土中的交换性钾与作物效应的相关性较在干土中高。但也有研究表明,土壤样品的风干处理对土壤交换性钾含量的影响不大^[31],能够反应出土壤钾素含量与施钾增产效果的关系。评估淹水条件下土壤真实有效养分是目前研究中的一个难题,准确测定其土壤有效钾素含量的方法还有待进一步研究。

水旱轮作条件下,钾肥的施用不仅可以在提高作物产量上发挥巨大潜力,还能提高土壤钾素含量,对保护耕地质量有积极的作用。红壤、黄褐土和潮土的钾素动态变化不同,说明不同的土壤其供钾能力及钾素保持能力不同。因此,未来应加强钾素在作物-土壤体系内的循环等问题的研究,摸清不同土壤的供钾能力及钾肥与其他肥料配合施用的有效施用条件,完善化肥的分配、管理体制,最大限

度地减少钾肥损失,提高利用率和经济效益,使有限的资源发挥最大可能的经济效益。

4 结 论

黑麦草-水稻轮作条件下,3 种土壤的供钾能力不同,NP 处理的各土壤供钾能力顺序为潮土 > 黄褐土 > 红壤,NPK 处理的各土壤供钾能力顺序为黄褐土 > 潮土 > 红壤。施钾对黑麦草和水稻有显著增产效果,可以有效提高土壤的供钾水平。整个轮作过程中,3 种土壤的水溶性钾、交换性钾和非交换性钾的动态变化有所差异,不施钾条件下,轮作期内各土壤钾素消耗量较大,水溶性钾和交换性钾含量降低,并促进了非交换性钾的释放,试验后 3 种土壤的水溶性钾、交换性钾和非交换性钾含量与试验前土壤相比均下降,其中红壤的交换性钾含量降低最多,黄褐土和潮土的非交换性钾含量降低最多。施钾条件下,土壤水溶性钾和交换性钾含量升高,并向非交换性钾方向转化,由于作物吸收和土壤钾素的吸附固定等因素,试验后土壤的各形态钾含量与试验前土壤相比有升高也有降低。

参 考 文 献

- [1] 王亚艺. 水稻-油菜轮作中钾肥效应及作物-土壤体系钾素动态变化研究. 武汉: 华中农业大学资源与环境学院, 2010. Wang Y Y. Study on the effect of potassium and the dynamic change of potassium in rice-rapeseed rotation system (In Chinese). Wuhan: College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, 2010
- [2] Ponnampeturna F N. The chemistry of submerged soils. *Adv Agron*, 1972, 24:29—96
- [3] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 等. 钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展. *生态环境*, 2003, 12(1): 115—118. Xiong M B, Lei X Z, Tian Y B, et al. Research progress of K^+ adsorbing-desorbing kinetics in soils (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 115—118
- [4] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展. *土壤*, 1999, 31(5): 244—254. Xie J C, Zhou J M. Advance of soil potassium research and K fertilizer application (In Chinese). *Soils*, 1999, 31(5): 244—254
- [5] 王亚艺, 鲁剑巍, 肖荣英, 等. 湖北省两个生态区水稻施钾效果及农田钾素平衡研究. *土壤*, 2010, 42(3): 473—478. Wang Y Y, Lu J W, Xiao R Y, et al. Study on effects of potassium (K) fertilizer on rice and K balance of paddy fields in different types of ecoregions of Hubei Province (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(3): 473—478
- [6] 郑诗璋, 胡红青, 庄光泉. 施用不同钾肥对土壤钾的转化和植物钾有效性影响机理的研究进展//李保国, 张福锁. *土壤*

科学与农业可持续发展. 北京: 中国农业出版社, 2008: 309—316. Zheng S Z, Hu H Q, Zhuang G Q. Advance in research on mechanisms of potassium transformation and plant availability under different potash fertilizer application in soil (In Chinese)//Li B G, Zhang F S. *Soil science and sustainable development of agriculture*. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 309—316

- [7] 李宗泰, 陈二影, 张美玲, 等. 施钾方式对棉花叶片抗氧化酶活性、产量及钾肥利用效率的影响. *作物学报*, 2012, 38(3): 1—9. Li Z T, Chen E Y, Zhang M L, et al. Effect of potassium application methods on antioxidant enzyme activities, yield and potassium use efficiency of cotton (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3): 1—9
- [8] Sparks D L. Potassium dynamics in soils//Stewart B A. *Advances in soil science*. New York: Springer Verlage New York Inc, 1987: 1—63
- [9] 谢建昌. 钾与中国农业. 南京: 河海大学出版社, 2000. Xie J C. Potassium and Chinese agriculture (In Chinese). Nanjing: Hohai University Press, 2000
- [10] 韩真. 葡萄砧木钾吸收动力学及不同土壤类型供钾能力研究. 山东: 山东农业大学园艺科学与工程学院, 2011. Han Z. K^+ uptake kinetics of grape rootstock and potassium supplying capability of different soils types (In Chinese). Shandong: College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, 2011
- [11] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1372—1379. Liao Y L, Zheng S X, Lu Y H, et al. Effects of long-term K fertilization on rice yield and soil K status in reddish paddy soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1372—1379
- [12] 雷永振, 邱卫文, 王祥珍, 等. 玉米钾肥长期定位试验作物产量和土壤钾素的变化. *辽宁农业科学*, 2003(4): 1—3. Lei Y Z, Qiu W W, Wang X Z, et al. Effect of application of K fertilizer on maize yield and soil potassium status in long-term stationary experiment (In Chinese). *Liaoning Agricultural Science*, 2003(4): 1—3
- [13] 西北农业大学. 农业化学研究法. 北京: 中国农业出版社, 2000. Northwestern Agricultural University. *Research methods of agricultural chemistry (In Chinese)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese)*. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [15] 史建文, 鲍士旦, 史瑞和. 耗竭条件下层间钾的释放及耗竭后土壤的固钾特性. *土壤学报*, 1994, 31(1): 42—48. Shi J W, Bao S D, Shi R H. Release of soil interlayer potassium under depletion condition and soil potassium fixation after depletion (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1): 42—48
- [16] 李卫国. 钾肥对水稻产量及其构成因素的影响. *山西大学学报: 自然科学版*, 2002, 25(3): 263—264. Li W G. The effects of K fertilization on rice yield and its component factors (In Chinese). *Journal of Shanxi University: Natural Science E-*

- dition, 2002, 25(3): 263—264
- [17] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早中晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1058—1065. Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Effects of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early-mid-and late-season rice in Hubei Province, China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1058—1065
- [18] 柳金来, 宋继娟, 周柏明, 等. 钾肥施用量与土壤肥力和植株养分及水稻产量的关系. 土壤肥料, 2003(2): 21—23. Liu J L, Song J J, Zhou B M, et al. Relation of applying potassium quantity with soil fertility and plant nutrition and rice output (In Chinese). Soils and Fertilizers, 2003(2): 21—23
- [19] 鲁剑巍, 陈防, 刘冬碧, 等. 施钾水平对油菜生物量积累和子粒产量的影响. 湖北农业科学, 2001(4): 49—51. Lu J W, Chen F, Liu D B, et al. Potassium fertilizer on rape biomass accumulation and seed yield (In Chinese). Hubei Agricultural Sciences, 2001(4): 49—51
- [20] 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
- [21] 王寅, 李小坤, 李雅颖, 等. 红壤不同地力条件下直播油菜对施肥的响应. 土壤学报, 2012, 49(1): 319—330. Wang Y, Li X K, Li Y Y, et al. Responses of direct-seeding rapeseed to fertilization in fields of red soil different in fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 121—129
- [22] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 水田土壤肥力现状及变化规律分析——以湖北省为例. 土壤学报, 2012, 49(2): 319—330. Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Status quo and variation of soil fertility in paddy field—A case study of Hubei Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 319—330
- [23] 李小坤, 鲁剑巍, 李文西, 等. 苏丹草-黑麦草轮作制中钾肥施用对其产量及养分吸收的影响. 草业科学, 2007, 24(7): 72—75. Li X K, Lu J W, Li W X, et al. Effect of different potassium fertilizers on the yield and nutrients uptake of sudangrass-ryegrass rotate crop system (In Chinese). Pratacultural Science, 2007, 24(7): 72—75
- [24] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响. 土壤, 2011, 43(3): 336—342. Gong W, Yan X Y, Wang J Y. Effect of long-term fertilization on soil fertility (In Chinese). Soils, 2011, 43(3): 336—342
- [25] 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. 土壤, 1993, 25(2): 64—67. Zhu Y G, Luo J X. Potassium fixation and affecting factors of different soils in south China (In Chinese). Soils, 1993, 25(2): 64—67
- [26] 李小坤, 鲁剑巍, 吴礼树, 等. 油菜-水稻轮作下根区与非根区红壤性水稻土钾素变化研究. 土壤学报, 2010, 47(3): 508—514. Li X K, Lu J W, Wu L S, et al. Dynamics of potassium in root-zone and non-root-zone red paddy soil under rapeseed-rice rotation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 508—514
- [27] 谭得水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾及小麦秸秆还田对北方典型土壤固钾能力的影响. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2072—2079. Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on potassium fixation capacity of selected soils from northern China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2072—2079
- [28] 李小坤, 鲁剑巍, 周六凤, 等. 不同种植条件下红壤性水稻土根区与非根区土壤钾素变化特征. 土壤通报, 2009, 40(6): 1371—1375. Li X K, Lu J W, Zhou L F, et al. Variation characteristics of potassium in root zone and non-root zone of red paddy soils with different planting pattern (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6): 1371—1375
- [29] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 907—913. Cong R H, Li X K, Lu J W. Advances in research on influence factors of soil potassium transformation (In Chinese). Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(6): 907—913
- [30] Luebs R E, Stanford G, Scott A D. Relation of available potassium to soil moisture. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20: 45—50
- [31] Large R L. The fixation and release of native and applied potassium from soil as affected by drying, chopping, and mineralogy. Columbus, OH: The Ohio State University, 1970

POTASSIUM SUPPLY CAPACITY OF AND POTASSIUM DYNAMICS IN DIFFERENT TYPES OF SOILS UNDER PADDY RICE-RYEGRASS ROTATION

Zhan Liping¹ Li Xiaokun^{1,2†} Lu Jianwei^{1,2} Cong Rihuan^{1,2} Wang Jin¹ Wang Zheng¹ Liao Zhiwen¹

(1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2 Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract A pot experiment was carried out using different types of soils to study their potassium (K) supply capacities and K dynamics under a ryegrass-rice rotation system, with a view to providing scientific basis for the research on mechanism of soil supplying K and reasonable K control. Results show that both aboveground biomass and K uptake of the crops in the group without K treatment (NP) were the highest in fluvo-aquic soil (FS), which was followed by yellow cin-

namon soil (YCS), then red soil (RS), while in the group with K, fertilization, no significant difference ($P > 0.05$) between the soils was observed in aboveground biomass and a decreasing order of $YCS > FS > RS$ was in terms of K uptake. Treatment NPK was 55.6%, 45.2% and 23.2% higher than treatment NP for red soil, yellow cinnamon soil and fluvo-aquic soil, respectively, in biomass and 368.8%, 166.8% and 74.5%, higher, respectively in K uptake. In the ryegrass growth season, the concentrations of water soluble K and exchangeable K in treatment NP decreased in all the soils. The concentration of non-exchangeable K decreased significantly in fluvo-aquic, but remained almost unchanged in the early season, rose in the middle season and dropped in the late season in yellow cinnamon soil and red soil. Soil K was much higher in treatment NPK than in treatment NP, but varied in a similar pattern in all the three soils, regardless of treatments and K forms. During the rice growing period, in treatment NP, water soluble K in all the soils did not change much soil exchangeable K declined first and then rose, but non-exchangeable K showed a reverse trend, while in treatment NPK, soil exchangeable K rose significantly in the early, and declined in the middle and then turned slightly back again in the late period, whereas soil water soluble K and non-exchangeable K showed a rising and then falling trend. To sum up, In treatment NP, K consumption was higher in all the soils and in all the periods of the rotation, thus decreasing both soil water soluble K and exchangeable K and in turn triggering release of non-exchangeable K. Application of K fertilizer increases the concentrations of water soluble K and exchangeable K and the ratio of K transformed into non-exchangeable K, thus effectively improving K supply capacity of the soil, and eventually increasing the yield of ryegrass and rice significantly.

Key words Potassium supply capacity; Red soil; Yellow cinnamon soil; Fluvo-aquic soil; Ryegrass; Rice

(责任编辑:卢 萍)