

网络出版时间:2016-02-02 09:37

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.03.016

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160202.0937.032.html>

长期秸秆还田对农田土壤钾素形态及空间分布的影响

李秀双, 师江澜, 王淑娟, 田霄鸿

(西北农林科技大学 资源环境学院 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**研究连续多年秸秆还田对土壤钾素形态及空间分布(层化现象)的影响。**【方法】**以关中平原冬小麦-夏玉米轮作体系中连续 13 年秸秆还田粮田土壤为对象,并以临近葡萄园土壤为对照。比较 2 种土壤不同土层(0~5, 5~15, 15~30 cm)速效钾及其 3 种组分(水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾)、非交换性钾、矿物钾、全钾含量的变化,并分析了土壤中各形态钾的层化比率和相关性。**【结果】**经过 13 年秸秆还田,粮田土壤 0~5 cm 土层速效钾及其各组分平均含量均有提高;在 5~15 和 15~30 cm 土层中,与葡萄园土壤相比,粮田土壤速效钾及其各组分平均含量均降低。粮田土壤速效钾及其各组分的层化比率总体高于葡萄园土壤。与葡萄园土壤相比,粮田土壤非交换性钾含量明显降低。粮田土壤与葡萄园土壤矿物钾和全钾含量差异不大。粮田土壤速效钾与其各组分、非交换性钾、全钾相关性达显著或极显著水平,但与矿物钾相关性不显著;葡萄园土壤速效钾与其各组分和非交换性钾相关性达极显著水平,但与矿物钾、全钾相关性不显著。**【结论】**整体看,秸秆还田在维持土壤钾有效成分与全钾之间的显著相关关系和协调土壤各形态钾的含量及空间分布方面,均有一定的积极作用。但无论是秸秆还田还是施用化学钾肥,对粮田和葡萄园土壤矿物钾及全钾含量和空间分布的影响均不显著。

【关键词】 秸秆还田; 土壤钾素; 钾素形态; 钾素空间分布

【中图分类号】 S141.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)03-0109-09

Effect of long-term straw returning on form and spatial distribution of potassium in agricultural soil

LI Xiu-shuang, SHI Jiang-lan, WANG Shu-juan, TIAN Xiao-hong

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrient and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This study evaluated the effect of long-term straw returning on form and spatial distribution (stratification) of potassium in agricultural soil. **【Method】** Soil samples were collected from soil in winter wheat-summer maize rotation field with 13-year straw returning in Guanzhong Plain, and vineyard soil nearby was used as control. Changes in readily available K and its three components (water soluble K, non-specifically adsorptive K, and specifically adsorptive K), non-exchangeable K, mineral K and total K in different layers (0-5, 5-15, and 15-30 cm) were investigated and stratification ratio and correlation between different K forms were analyzed. **【Results】** All components of soil readily available K were significantly increased in 0-5 cm soil layer in the grain field soil after 13-years straw returning. However, readily available K contents at 5-15 and 15-30 cm soil layers were lower than that of vineyard soil. Stratification ratios of readily available K and its components in grain field soil were higher than in vineyard soil. Compared with vineyard soil, the content of non-exchangeable K in grain field soil decreased. The con-

【收稿日期】 2014-07-03

【基金项目】 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11); 国家自然科学基金项目(41371288); 中央高校基本科研创新项目(QN2013075)

【作者简介】 李秀双(1989-), 男, 安徽六安人, 硕士, 主要从事废弃物资源农业循环利用研究。E-mail: lixiushuang@hotmail.com

【通信作者】 田霄鸿(1967-), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 主要从事废弃物资源农业循环利用研究。E-mail: txhong@hotmail.com

tents of mineral K and total K were similar in grain field soil and vineyard soil. Readily available K had significant or extremely significant correlation with its components, non exchangeable K and total K, but had no significant correlation with mineral K in grain field soil. Readily available K in vineyard soil had extremely significant correlation with its components and non-exchangeable K, but no significant correlation with mineral K and total K. 【Conclusion】 Straw returning was preferable to maintain the significant correlation between components with total available K in soil and coordinate the contents and spatial distribution of soil K in different forms. But it had no significant effect on the content and spatial distribution of soil mineral K and total K.

Key words: straw returning; soil potassium; potassium form; spatial distribution of potassium

农田土壤中钾的丰缺及生物有效性与作物钾素营养状况密切相关,直接影响作物生长发育、产量形成和农产品品质。当前我国北方粮食主产区基本上不施钾肥或施钾量很低,但复种指数很高,氮磷肥用量居高不下,作物持续高产使得土壤钾素被不断携出,农田土壤钾素年复一年处于入不敷出的亏缺状态,导致原本富钾土壤地区也因缺钾减产和施钾肥增产的情况不断增多^[1-6]。在粮食生产中,如何合理利用秸秆等农业废弃物中富含的钾素,强化它们在农业生产体系内部的循环,维持土壤钾素肥力的可持续性,已成为目前粮田土壤钾素管理的核心问题。作物秸秆 K 含量高达 1.3% 左右,秸秆还田在培肥土壤、提高土壤环境质量的同时,更是一项补充土壤钾素、缓解土壤钾素产投不平衡的有效手段。然而,秸秆还田技术普遍与机械化措施相配套,生产中常采用少耕、旋耕等作业环节,耕作层较浅,使得秸秆中还入土壤的养分出现明显的层化现象,土壤钾素在表层富集,若层化比率不断提高,长期下去将不利于作物根系对钾素的吸收利用^[7-9]。

不同类型土壤由于本身理化性质、钾素含量水平、供钾能力、种植制度及生产力水平存在差异,施用钾肥或秸秆还田对作物产量、土壤钾含量和钾平衡的影响也不尽相同^[10]。大量试验证明,不同土壤上施用钾肥或秸秆还田在促进作物生长、提高产量和品质及土壤钾素肥力方面有积极作用^[11-15],对提高农业经济效益和维持土壤钾素收支平衡有重要意义,但针对于某一地区土壤中不同形态钾在土层中分布特点以及生物有效性的研究较少。金继运等^[16-17]和黄绍文等^[18]基于前人研究结果,将土壤中交换性钾进一步分为特殊吸附钾和非特殊吸附钾,如此一来,土壤速效钾就分为水溶性钾、特殊吸附钾和非特殊吸附钾 3 种形态。本研究通过采集陕西关中平原长期实行秸秆还田的冬小麦夏玉米轮作土壤,依据上述土壤钾素分级方法,分析比较粮田土壤

与对照的葡萄园土壤中各形态钾素含量、层化比率及钾素形态间的相关性,旨在揭示秸秆还田后土壤钾素空间分布及有效性特征,为研究秸秆还田对土壤钾素状况的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样区概况及田间管理办法

采样地点位于陕西省关中平原东部的渭南市临渭区高产创建综合试验示范区。该区域属暖温带半湿润大陆性季风气候区,年均降雨量 543 mm。年均气温 13.6℃,年日照时数 2 277 h,无霜期 219 d。土壤为由黄土母质发育的地带性塋土(土垫旱耕人为土)。土壤质地为壤土。土壤基础理化性质为:体积质量 1.2 g/cm³,pH 7.9,有机质 16.8 g/kg,全氮 1.04 g/kg,速效磷 28.2 mg/kg。

据大量走访调查发现,采样区当地主要有 2 种土地利用方式:一种是冬小麦/夏玉米一年二熟轮作制(麦玉轮作),另一种是以鲜食葡萄为主的水果生产。麦玉轮作体系中,粮田于小麦种植期平均基施底肥纯 N 180~240 kg/hm²、P₂O₅ 150~180 kg/hm²,另于小麦生长后期,叶面喷施 KH₂PO₄ 约 1.5 kg/hm²、尿素约 7.5 kg/hm²,以提高千粒质量。玉米种植时施纯 N 200~250 kg/hm²、P₂O₅ 90~120 kg/hm²,其中全部磷肥结合播种一次性施入。另外,当地从 1999 年开始全面推行秸秆还田技术,截至采样时已有 13 年的秸秆全量还田历史。采样地块平均 3~5 年深松 1 次,深度为 25 cm。其余为每年浅耕,耕层深度为 12 cm。其他灌水、农药等田间管理均按照当地农户习惯管理方法。

葡萄园每年秋季一次性施入腐熟有机肥平均约 75 000 kg/hm²,并结合施入腐殖酸肥 750~1 500 kg/hm²,另分别于催芽期、膨果期、采后期施肥,共施用纯 N > 300 kg/hm²、P₂O₅ > 550 kg/hm²、K₂O > 600 kg/hm²。果园中不存在秸秆还田措施。

1.2 土壤样品采集

土壤样品采集于 2012 年 6 月 8—9 日进行(作物生长季,未收获)。共选择 3 个自然村:下吉镇的磔吴村(村 1;E109°30′、N34°41′)、官底镇的赵家村(村 2;E109°27′、N34°44′)和下吉镇的西关村(村 3;E109°30′、N34°42′)。每村选典型的粮田田块 5 个,另选临近的 5 个葡萄园田块为对照。在每个田块中随机选取 5 个样点采集土样,每个样点分为 0~5, 5~15,15~30 cm 3 个土层。采样完毕后将同一农户、同一土层的 5 个点土壤样品混合均匀构成 1 个分析样品。经自然风干,磨细过 1 mm 土筛,用于速效钾及不同形态钾含量测定;部分土样再过 0.15 mm 筛,用于测定全钾含量。

1.3 测定项目与方

土壤速效钾(Readily available K, RAK)含量用 1 mol/L NH₄OAc 浸提、火焰光度计法测定。全钾(Total K, TK)含量用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定。

各形态钾含量的测定及计算方法为:水溶性钾(Water soluble K, WSK)=蒸馏水浸提钾;非特殊吸附钾(Non-specifically absorptive K, NSAK)=0.5 mol/L 醋酸镁浸提钾—水溶性钾;特殊吸附钾(Specifically absorptive K, SAK)=1 mol/L 醋酸铵浸提钾—醋酸镁浸提钾;非交换性钾(Non-exchangeable K, NEK)=1 mol/L 硝酸浸提钾—1

mol/L 醋酸铵浸提钾;矿物钾(Structural K, SK)=全钾—硝酸浸提钾。除用硝酸浸提钾时需要煮沸外,其余测定操作温度均为 25℃,液土体积质量比为 10:1,浸提液中各形态钾含量均采用火焰光度计(6410 型)测定。

1.4 层化比率的计算

土壤层化比率(Stratification ratio, SR)是土壤表层与底层土壤特征值的比值。本试验参考前人研究,将层化比率的概念应用于研究土壤钾素肥力方面,得到土壤钾层化比率(Soil potassium stratification ratio),主要用来解释钾素的层化和表面富集现象。层化比率的定义与采样层次的选择有关,具体计算方法如下:SR1:0~5 cm 土层与 5~15 cm 土层土壤某形态钾素含量的比值;SR2:0~5 cm 土层与 15~30 cm 土层土壤某形态钾素含量的比值。

1.5 数据处理

试验数据采用 LSD 法即最小显著差数法分析,DPS v7.05 专业版统计软件进行差异显著性检验。Excel 2007 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤速效钾与全钾含量
不同土地利用方式下各土层土壤速效钾及全钾含量见表 1。

表 1 不同土地利用方式下各土层土壤速效钾及全钾含量

Table 1 Contents of readily available K and total K in different soil layers under different land use patterns

地点 Site	土层深度/cm Soil depth	速效钾/(mg·kg ⁻¹) RAK		全钾/(g·kg ⁻¹) TK	
		粮田 Grain field	葡萄园 Vineyard	粮田 Grain field	葡萄园 Vineyard
村 1 Village 1	0~5	285.5 a	248.3 a	22.0 a	20.6 a
	5~15	162.9 b	164.9 b	20.8 a	21.6 a
	15~30	100.4 c	72.9 c	21.0 a	21.8 a
村 2 Village 2	0~5	215.3 a	166.4 a	21.5 a	21.2 a
	5~15	114.0 b	160.2 a	21.7 a	22.5 a
	15~30	72.5 c	117.9 a	20.3 a	22.2 a
村 3 Village 3	0~5	334.8 a	295.6 a	22.0 b	22.7 a
	5~15	219.6 b	261.1 a	22.6 a	22.7 a
	15~30	114.8 c	216.5 b	21.9 b	21.9 a
均值 Average	0~5	278.6 a	236.8 a	21.8 a	21.5 a
	5~15	165.5 b	195.4 a	21.7 a	22.3 a
	15~30	95.9 c	135.8 b	21.1 a	22.0 a

注:村 1. 磔吴村;村 2. 赵家村;村 3. 西关村。同列数据后标不同小写字母表示在 $P\leq 0.05$ 水平差异显著。下表同。
Note: Village 1. Diewu Village; Village 2. Zhaojia Village; Village 3. Xiguan Village. Different lowercase letters mean significant difference at $P\leq 0.05$. The same below.

表 1 显示,粮田土壤 0~5 cm 土层中速效钾含量均高于 200 mg/kg,平均为 278.6 mg/kg,速效钾含量较高。但在 5~15,15~30 cm 土层中,平均速效钾含量依次降低,分别为 165.5 和 95.9 mg/kg,

与 0~5 cm 土层相比分别降低了 40.6%和 65.6%,下降幅度较大。3 个土层土壤速效钾平均含量表现为 0~5 cm>5~15 cm>15~30 cm,且差异显著。葡萄园土壤中则表现出不同特点,首先是 0~5 cm

土层中速效钾平均含量较粮田土壤降低了 41.8 mg/kg;其次在 5~15,15~30 cm 土层中,虽速效钾平均含量也出现依次降低,分别为 195.4,135.8 mg/kg,但均大于粮田土壤,与 0~5 cm 土层相比分别降低了 17.5%和 42.7%,降低幅度较小。本研究中 3 个村粮田土壤速效钾含量虽存在差异,但总体表现为村 3>村 1>村 2,此外葡萄园土壤速效钾变化基本与之相同,反映了地块间的肥力差异。

粮田土壤在 3 个土层中全钾含量为 20.3~22.6 g/kg,但在 3 个土层中差异基本不显著($P>0.05$)。葡萄园土壤全钾含量特点类似于粮田土壤,3 个土层全钾含量为 20.6~22.7 g/kg,与粮田土壤差别不大,3 个土层间差异也不显著。

2.2 不同土地利用方式下土壤各形态钾素含量和分布状况

由表 2、表 3 可知,在 0~5 cm 土层,粮田土壤

水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾 3 种形态平均含量分别为 70.6,72.9 和 135.0 mg/kg;在 5~15 和 15~30 cm 土层中,以上 3 种形态钾含量随着土层深度增加呈降低趋势,表现为 0~5 cm>5~15 cm>15~30 cm。水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾含量在 3 个土层间总体差异显著。葡萄园土壤中这 3 种形态钾含量变化与粮田土壤相似。除了 0~5 cm 土层葡萄园土壤 3 种形态钾平均含量均低于粮田土壤外,在其余 2 个土层表现则相反。水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾平均含量在葡萄园 3 个土层中均表现为 0~5 cm>5~15 cm>15~30 cm。除了村 1,其余 2 个村葡萄园土壤该 3 种形态钾含量在各土层间差异不显著。另外,在 2 种土壤各土层中,该 3 种形态钾含量总体表现为特殊吸附钾>非特殊吸附钾>水溶性钾。

表 2 粮田土壤各形态钾素的分布状况

Table 2 Distribution of different soil K forms in grain field soil

地点 Site	土层深度/cm Soil depth	水溶性钾/ (mg·kg ⁻¹) WSK	非特殊吸附钾/ (mg·kg ⁻¹) NSAK	特殊吸附钾/ (mg·kg ⁻¹) SAK	非交换性钾/ (mg·kg ⁻¹) NEK	矿物钾/ (g·kg ⁻¹) SK
村 1 Village 1	0~5	65.3 a	69.3 a	151.0 a	1 142.9 a	20.6 a
	5~15	25.6 b	27.4 b	109.9 b	1 010.7 b	19.7 a
	15~30	13.1 c	9.1 c	78.2 c	944.1 c	20.0 a
村 2 Village 2	0~5	48.8 a	49.3 a	117.2 a	1 254.8 a	20.0 a
	5~15	20.4 b	13.4 b	80.3 b	1 166.3 a	20.4 a
	15~30	9.3 c	6.4 b	56.8 c	1 095.1 b	19.1 a
村 3 Village 3	0~5	97.7 a	100.2 a	136.9 a	1 245.8 a	20.4 c
	5~15	49.2 b	44.7 b	125.7 a	1 154.4 a	21.1 a
	15~30	25.0 b	9.9 c	79.9 b	1 106.2 a	20.6 b
均值 Average	0~5	70.6 a	72.9 a	135.0 a	1 214.5 a	20.3 a
	5~15	31.7 b	28.5 b	105.3 b	1 110.5 ab	20.4 a
	15~30	15.8 b	8.4 c	71.7 c	1 048.4 b	19.9 a

表 3 葡萄园土壤各形态钾素的分布状况

Table 3 Distribution of different soil K forms in vineyard soil

地点 Site	土层深度/cm Soil depth	水溶性钾/ (mg·kg ⁻¹) WSK	非特殊吸附钾/ (mg·kg ⁻¹) NSAK	特殊吸附钾/ (mg·kg ⁻¹) SAK	非交换性钾/ (mg·kg ⁻¹) NEK	矿物钾/ (g·kg ⁻¹) SK
村 1 Village 1	0~5	83.5 a	76.8 a	87.9 a	1 148.6 a	19.2 a
	5~15	35.6 b	43.1 b	86.2 a	1 046.0 a	20.4 a
	15~30	11.0 c	9.9 c	52.0 b	932.6 b	20.8 a
村 2 Village 2	0~5	25.6 a	41.2 a	99.6 a	1 267.9 a	19.7 a
	5~15	22.7 a	34.2 a	103.4 a	1 201.2 a	21.1 a
	15~30	12.7 a	16.5 a	88.7 a	1 297.9 a	20.8 a
村 3 Village 3	0~5	72.9 a	90.2 a	132.5 a	1 470.2 a	20.9 a
	5~15	59.8 a	72.1 a	129.3 a	1 453.3 a	20.9 a
	15~30	46.1 a	49.6 a	120.8 a	1 460.7 a	20.2 a
均值 Average	0~5	60.7 a	69.4 a	106.7 a	1 295.6 a	19.9 a
	5~15	39.3 b	49.8 b	106.3 a	1 233.5 a	20.8 a
	15~30	23.3 b	25.3 b	87.2 a	1 230.4 a	20.6 a

由表 2 和表 3 还可知,粮田土壤中非交换性钾含量在 3 土层中为 944.1~1 254.8 mg/kg,潜在供

钾能力很高;非交换性钾平均含量在 3 个土层间表现为 0~5 cm>5~15 cm>15~30 cm。葡萄园土

壤中非交换性钾含量比较高,其在 3 个土层间总体表现为 0~5 cm>5~15 cm>15~30 cm。粮田 3 个土层中的非交换性钾含量总体均低于葡萄园。粮田、葡萄园土壤非交换性钾含量均随着土层深度的增加总体逐渐降低。粮田土壤矿物钾含量为 19.1~21.1 g/kg,在 3 个土层差异基本不显著。葡萄园土壤矿物钾含量与粮田土壤差别不大,且在各土层间差异也不显著。

2.3 不同土地利用方式下土壤各形态钾层化比率

从图 1 可见,粮田土壤速效钾 SR1、SR2 平均值分别为 1.7 和 2.9,且 SR1 明显小于 SR2。葡萄园土壤中速效钾 SR1、SR2 平均值分别为 1.2 和 1.7,SR1<SR2,但二者均低于粮田土壤。3 个村粮田土壤速效钾层化比率表现相对均一,但葡萄园土壤中村 1 速效钾 SR1、SR2 均高于村 2 和村 3。粮田土壤全钾的 SR1、SR2 均在 1.0 左右,平均值均为 1.0,略高

于葡萄园土壤(0.97,0.98),SR1 与 SR2 差异不大。

由图 2 可见,粮田土壤速效钾 3 种组分中,非特殊吸附钾 SR1、SR2 平均值最高,分别为 2.6 和 8.6,特殊吸附钾 SR1、SR2 平均值最低,分别为 1.4 和 2.7,且 SR1 值普遍小于 SR2。与粮田土壤相比,葡萄园土壤的 3 种速效钾组分 SR1、SR2 值均明显较低,且 SR1<SR2。2 种土壤中 SR1、SR2 均总体表现为非特殊吸附钾>水溶性钾>特殊吸附钾。另外,3 个村粮田土壤中 3 种速效钾组分的 SR1、SR2 值相对均一,在葡萄园土壤中村 1 水溶性钾和非特殊吸附钾 SR1、SR2 同样明显高于其他 2 个村。

由图 2 还可知,粮田土壤非交换性钾 SR1、SR2 值普遍很低,平均值为 1.0~1.2,且 SR1 平均值略小于 SR2;矿物钾 SR1、SR2 值均在 1.0 左右,SR1 与 SR2 值基本一致。葡萄园土壤非交换性钾和矿物钾 SR1、SR2 值变化与粮田土壤基本相同。

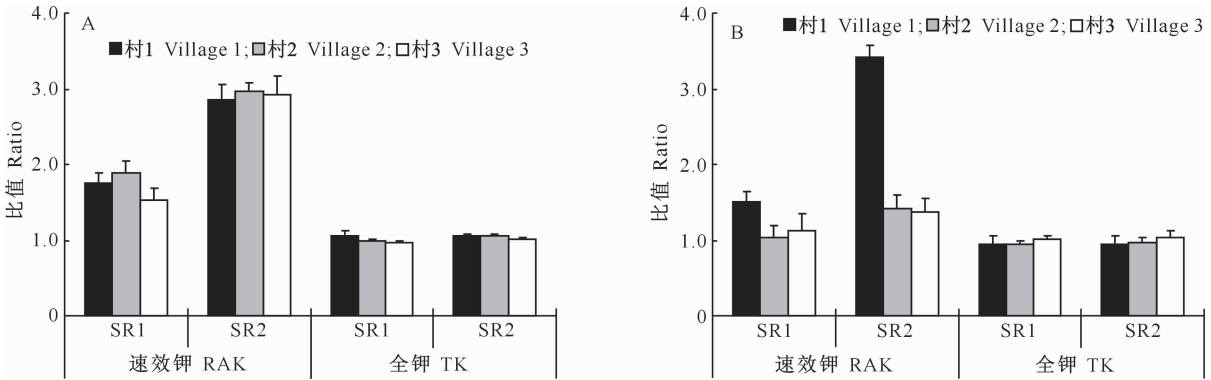


图 1 粮田(A)和葡萄园(B)土壤中速效钾及全钾层化比率

Fig. 1 Stratification ratios of readily available K and total K in grain field (A) and vineyard (B) soil

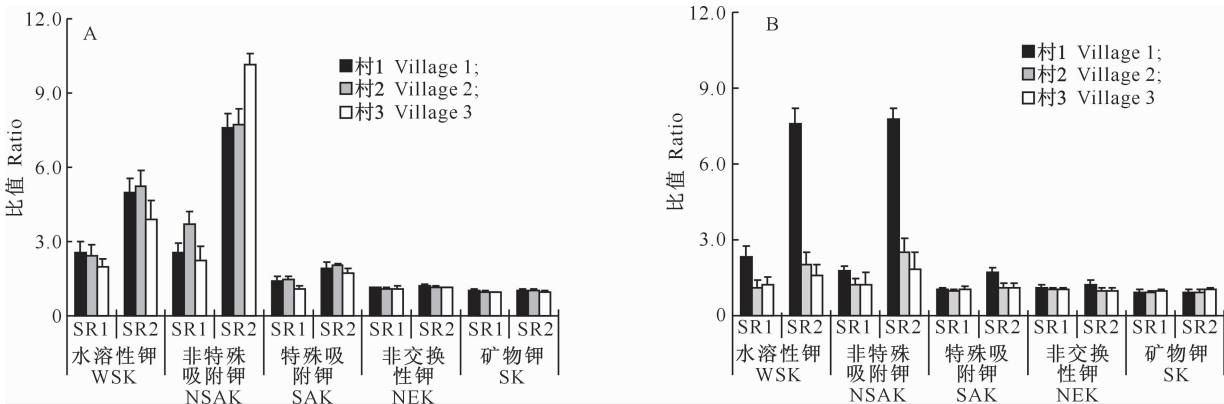


图 2 粮田(A)和葡萄园(B)土壤中各形态钾素的层化比率

Fig. 2 Stratification ratios of different potassium forms in grain field (A) and vineyard (B) soil

2.4 不同土地利用方式下土壤各形态钾之间相关性分析

由表 4 看出,粮田土壤中速效钾与其各组分(水溶性、非特殊吸附钾和特殊吸附钾)两两之间均有极

显著正相关性($r=0.75\sim0.96$);非交换性钾除与特殊吸附钾之间相关性不显著($r=0.25$)外,与速效钾及水溶性钾、非特殊吸附钾相关性均达显著水平;矿物钾与速效钾各组分以及非交换性钾之间相关性均

不显著;全钾与各形态钾之间均呈显著正相关,且与速效钾($r=0.55$)和矿物钾相关性($r=0.97$)达极显著水平。

表 4 粮田土壤速效钾及各形态钾的相关分析
Table 4 Correlation of readily available K and other forms K in grain field soil

指标 Index	速效钾 RAK	水溶性钾 WSK	非特殊吸附钾 NSAK	特殊吸附钾 SAK	非交换性钾 NEK	矿物钾 SK	全钾 TK
速效钾 RAK	1	0.96**	0.96**	0.90**	0.43*	0.39	0.55**
水溶性钾 WSK		1	0.94**	0.76**	0.48*	0.35	0.52*
非特殊吸附钾 NSAK			1	0.75**	0.49*	0.32	0.49*
特殊吸附钾 SAK				1	0.25	0.41	0.50*
非交换性钾 NEK					1	0.33	0.53*
矿物钾 SK						1	0.97**
全钾 TK							1

注: *、** 分别表示相关性达显著($P\leq 0.05$)或极显著水平($P\leq 0.01$)。下表同。
Note: * and ** mean significant difference at $P\leq 0.05$ and $P\leq 0.01$, respectively. The same below.

表 5 显示,葡萄园土壤中,除非交换性钾与水溶性钾之间相关性未达到极显著水平($r=0.37$)外,非交换性钾与速效钾及其各组分之间均呈极显著正相关($r=0.48\sim 0.74$);全钾除与矿物钾之间呈极显著相关($r=0.96$)外,与速效钾及其各组分、非交换性钾相关性均不显著。

表 5 葡萄园土壤速效钾及各形态钾的相关分析
Table 5 Correlation of readily available K and other forms K in vineyard soil

指标 Index	速效钾 RAK	水溶性钾 WSK	非特殊吸附钾 NSAK	特殊吸附钾 SAK	非交换性钾 NEK	矿物钾 SK	全钾 TK
速效钾 RAK	1	0.93**	0.98**	0.81**	0.57**	0.12	0.34
水溶性钾 WSK		1	0.95**	0.54**	0.37*	0.13	0.30
非特殊吸附钾 NSAK			1	0.70**	0.48**	0.13	0.33
特殊吸附钾 SAK				1	0.74**	0.06	0.28
非交换性钾 NEK					1	-0.08	0.18
矿物钾 SK						1	0.96**
全钾 TK							1

3 讨 论

秸秆还田对农田土壤养分状况的影响已有大量报道。秸秆还田条件下土壤速效钾含量的提高与有机质及土壤团聚体数量的增加密切相关^[1,19]。近些年来,由于农业生产中秸秆还田措施的大面积应用,秸秆还田对补充土壤速效钾的积极作用不断得到证实^[1,10,13-14,20-21]。本研究结果表明,在长期秸秆还田基础上,与葡萄园土壤相比,农田土壤 0~5 cm 土层速效钾含量平均高出 41.8 mg/kg;但在 5 cm 土层以下,农田土壤中速效钾含量下降幅度较大,速效钾含量总体均低于葡萄园土壤。这是由于长期秸秆还田后,农田表土中有机质和土壤团聚体数量增加,形成更多速效钾吸附位点,同时表土也接收更多秸秆钾素,因此表层土壤速效钾有较高累积量。此外,粮田复种指数及产量水平高,作物根系的吸收作用强,下层土壤中钾素消耗强度大^[22]。

本研究中,由于 2 种土壤中均施用有机肥,且用量很高,但与葡萄园土壤相比,粮田土壤中仅非交换性钾含量在各土层中均有降低,土壤矿物钾以及全

钾含量则未表现明显差异。外源钾肥的投入,一般能促进耕层土壤速效钾素向非交换性钾的转化^[23-25]。而本研究中,粮田土壤与葡萄园土壤相比接受的外源钾肥较少,因而非交换性钾累积较少。此外,农田下层土壤中的湿热条件以及植物根系活动,尤其集约化粮田耗钾强度高,更利于非交换性钾的有效性转化和吸收^[26-27]。本研究中采样区土壤矿物钾含量占土壤全钾的 93% 左右,但因其释放非常缓慢,不能与其他形态的钾素建立平衡关系,因而与全钾含量均未表现出典型规律^[17,25,28]。

土壤养分随土层深度变化表现出的分层化现象在许多自然生态系统中十分普遍。有研究认为,土壤碳、氮层化比率可能可以作为独立于土壤类型和气候区域以外评价土壤动态质量的指标^[29-35]。层化比率这一概念在对保护性耕作和退耕修复条件下土壤养分性质的研究中应用广泛。因耕作对土壤产生物理扰动以及影响土壤矿化和水分运动,从而影响土壤养分的分布。因而,除外源肥料的投入外,耕作方式也是影响土壤钾素含量与分布的重要原因^[27,36]。本研究中,经过长期秸秆还田以及与其配

套的少耕、浅耕方式的连续作用,粮田土壤速效钾3个组分的层化比率均表现为 $SR1 < SR2$,且 $SR1$ 、 $SR2$ 均远大于1.0,高于葡萄园土壤,其层化和表聚现象比葡萄园土壤明显。粮田和葡萄园土壤非交换性钾和矿物钾的 $SR1$ 、 $SR2$ 均在1.0左右,层化特点未表现出显著差异。说明秸秆还田及少耕、浅耕条件下所引起钾素的土表富集作用,主要由速效态成分体现。此外,粮田和葡萄园土壤速效钾各组分层化比率($SR1$ 、 $SR2$)均表现为非特殊吸附钾 $>$ 水溶性钾 $>$ 特殊吸附钾,这是由土壤本身矿物学特性决定的。葡萄园土壤除层化现象不及粮田土壤明显外,村1水溶性钾、非特殊吸附钾层化比率表现异常,可以推知葡萄园土壤中高量施用化学钾肥对协调土壤速效态钾素的空间分布效果不及秸秆还田。因此,农田管理中,为提高土壤钾素含量及利用率,仅依靠秸秆还田及其配套的机械化旋耕,并不科学。从保证作物根系钾素供应、提高钾肥利用率以及协调土壤有效钾的空间分布方面看,深耕依然是重要的农艺措施。

土壤钾的生物有效性取决于其存在形态和分布状况,外源性钾影响土壤钾素的固定和释放,从而影响土壤体系中钾形态间相互转化的动态平衡^[36-39]。由于土壤钾素的有效性主要由速效态组分体现,其生物活性最大;非交换性钾具有一定的生物有效性,但需要通过速效钾的间接作用;矿物钾数量庞大,但因释放很慢,因而其生物有效性最低。本研究中,农田土壤经过13年的秸秆连续还田,速效钾各组分之间正相关性均达极显著水平;非交换性钾与速效钾各组分(特殊吸附钾除外)之间均呈显著正相关,但未达极显著水平;矿物钾除与全钾呈极显著正相关外,与其他有效形态钾之间相关性均不显著;全钾与其他各形态钾之间均呈显著或极显著正相关。葡萄园土壤中,非交换性钾与速效钾各组分之间的正相关性基本达极显著水平;全钾除与矿物钾极显著相关外,与非交换性钾和各有效态钾相关性均不显著。可能是由于葡萄园土壤中常年高量施用速效态钾肥,打破了土壤各形态钾之间转化的平衡所致。因此,在农业肥料管理中,为提高钾肥利用率和协调土壤钾素形态之间的转化平衡,除了提倡秸秆还田和施用有机肥之外,还需要考虑适当减少化学钾肥的投入。

4 结 论

经13年秸秆还田连续作用,引起粮田土壤钾素

极明显的层化现象,即0~5 cm土层速效钾各组分含量均大幅度提高,5 cm土层以下土壤速效钾则消耗严重。长期秸秆还田增大了农田土壤速效钾的层化比率,加剧了土壤速效钾素的表聚现象。然而长期秸秆还田并不能缓解土壤非交换性钾释放,农田土壤非交换性钾呈明显亏损。但无论是秸秆还田条件下的农田还是高量施钾的葡萄园,2种土地利用方式对土壤矿物钾和全钾含量及空间分布的影响均不显著。秸秆还田在维持土壤钾素有效成分与全钾之间的显著相关关系,协调土壤各形态钾的含量及空间分布方面,均有一定的重要意义。

[参考文献]

- [1] 邢素丽,刘孟朝,韩保文. 12年连续施用秸秆和钾肥对土壤钾素含量和分布的影响[J]. 土壤通报,2007,38(3):486-490.
Xing S L, Liu M Z, Han B W. Effects of 12-Year continuous application of straw and K fertilizer on soil potassium concentration and distribution in fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(3): 486-490. (in Chinese)
- [2] 刘荣乐,金继运,吴荣贵,等. 我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2):123-132.
Liu R L, Jin J Y, Wu R G, et al. Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in northern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 123-132. (in Chinese)
- [3] 王宜伦,苗玉红,谭金芳,等. 不同施钾量对砂质潮土冬小麦产量、钾效率及土壤钾素平衡的影响[J]. 土壤通报,2010,41(1):160-163.
Wang Y L, Miao Y H, Tan J F, et al. Effects of different potassium fertilizer application rates on yield, K-efficiency of winter wheat and soil available K balance in sandy Chao soil fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(1): 160-163. (in Chinese)
- [4] Wang H J, Huang B, Shi X Z, et al. Major nutrient balances in small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81: 203-218.
- [5] Liu X M, Zhang W W, Zhang M H, et al. Spatio-temporal variations of soil nutrients by an altered land tenure system in China[J]. Geoderma, 2009, 152: 23-34.
- [6] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88: 341-349.
- [7] Brye K B, Cordell M L, Longer D E, et al. Residue management practice effects on soil surface properties in a young wheat-soybean double-crop system[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2007, 29: 121-150.
- [8] Franzluebbers A J, Schoenberg H H, Endale D M. Surface-soil

- responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96: 303-315.
- [9] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 133-139.
- 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 crop yield and soil K under different planting systems [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133-139. (in Chinese)
- [10] 葛伟健, 常艳丽, 刘俊梅, 等. 塿土区期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 629-636.
- Ge W J, Chang Y L, Liu J M, et al. Potassium balance and pool as influenced by long-term fertilization under continuous winter wheat-summer maize cropping system in amaural loess soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 629-636. (in Chinese)
- [11] 熊明彪, 舒 芬, 宋光煜, 等. 施钾对紫色土稻麦产量及土壤钾素状况的影响 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 274-279.
- Xiong M B, Shu F, Song G Y, et al. Effects of long-term potassium application on yield and soil potassium in rice-wheat cropping system in purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 274-279. (in Chinese)
- [12] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾对东北春玉米产量和土壤钾素状况的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2234-2240.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term application of K fertilizer on spring maize yield and soil K in northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2234-2240. (in Chinese)
- [13] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(5): 886-893.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 886-893. (in Chinese)
- [14] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 106-112.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of north central China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 106-112. (in Chinese)
- [15] 王宏庭, 金继运, 王 斌, 等. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 801-808.
- Wang H T, Jin J Y, Wang B, et al. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to Cinnam on soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 801-808. (in Chinese)
- [16] 金继运. 土壤钾素研究进展 [J]. *土壤学报*, 1993, 30(1): 94-101.
- Jin J Y. Advances in soil potassium research [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(1): 94-101. (in Chinese)
- [17] 金继运, 高广领, 王泽良, 等. 不同土壤钾素释放动力学及其供钾特征的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1994(1): 39-48.
- Jin J Y, Gao G L, Wang Z L, et al. Kinetics of native potassium release and potassium supplying characteristics in selected soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994(1): 39-48. (in Chinese)
- [18] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物有效性的研究进展 [J]. *土壤肥料*, 1995(5): 23-29.
- Huang S W, Jin J Y. Advances in forms and plant availability of soil potassium research [J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 1995(5): 23-29. (in Chinese)
- [19] 高亚军, 朱培立, 王志明. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对磷、钾和 pH 的影响 [J]. *土壤*, 2000(5): 257-261.
- Gao Y J, Zhu P L, Wang Z M. Effects of long-term different soil management on phosphorus, potassium and pH in rice-wheat rotation system [J]. *Soils*, 2000(5): 257-261. (in Chinese)
- [20] 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, 31(5): 244-254.
- Xie J C, Zhou J M. Advances in soil potassium research and K fertilizer application in our country [J]. *Soils*, 1999, 31(5): 244-254. (in Chinese)
- [21] 谢建昌. 钾与中国农业 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2000: 85-89.
- Xie J C. Potassium in Chinese agriculture [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2000: 85-89. (in Chinese)
- [22] Jalali M, Zarabi M. Kinetics of nonexchangeable-potassium release and plant response in some calcareous soils [J]. *Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169: 194-204.
- [23] 黄绍文, 金继运, 左余宝, 等. 黄淮海平原玉田县和陵县试区粮田土壤养分平衡现状评价 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 137-143.
- Huang S W, Jin J Y, Zuo Y B, et al. Evaluation of agricultural soil nutrient balance for Yutian County and Lingxian experimental area in Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 137-143. (in Chinese)
- [24] Ogaard A F, Krogstad T. Release of interlayer potassium in Norwegian grassland soils [J]. *Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168: 80-88.
- [25] 董玉良, 劳秀荣, 毕建杰, 等. 麦玉米轮作体系中秸秆钾对土壤钾库平衡的影响 [J]. *西北农业学报*, 2005, 14(3): 173-176.
- Dong Y L, Lao X R, Bi J J, et al. Effect of straw potassium on balance of soil K in wheat-maize rotation system [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(3): 173-176. (in Chinese)

- [26] 封克,殷士学,张山泉. 矿物钾在作物营养中的意义 [J]. 土壤通报,1992,23(2):58-60.
Feng K, Yin S X, Zhang S Q. Significance of mineral potassium for crop nutrition [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1992, 23(2): 58-60. (in Chinese)
- [27] 徐晓燕,马毅杰. 土壤矿物钾的释放及其在植物营养中的意义 [J]. 土壤通报,2001,32(4):173-176.
Xu X Y, Ma Y J. K⁻ release from potassium-containing minerals in soil and its significance for plant nutrition [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(4): 173-176. (in Chinese)
- [28] Sparks D L. Potassium dynamics in soils [J]. Advances in Soil Science, 1987, 6: 1-63.
- [29] Franzluebbers. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 95-106.
- [30] M Diaz-Zorita, J H Grove. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic paleudalfs [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66: 165-174.
- [31] Moreno F, Murillo J M, Pelegrin F, et al. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃ [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85: 86-93.
- [32] Sa J C M, Lal R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103: 46-56.
- [33] Hernanz J L, Sanchez-Giron V, Navarrete L. Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 133(1/2): 114-122.
- [34] 李涛,潘志华,安萍莉,等. 北方农牧交错带(武川县)土壤微生物数量分布及层化比率研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 99-102.
- Li T, Pan Z H, An P L, et al. Distribution character of soil microbial numbers and soil microbial stratification ratio at crossing belt (Wuchuan County) of agriculture and animal husbandry [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 99-102. (in Chinese)
- [35] 王少昆,赵学勇,左小安,等. 科尔沁沙质草甸土壤微生物数量的垂直分布及季节动态 [J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 610-615.
Wang S K, Zhao X Y, Zuo X A, et al. Vertical distribution and seasonal dynamics of soil microbial number in sandy grassland of Horqin [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 610-615. (in Chinese)
- [36] 徐菁,姜玲岩. 太湖地区稻田耕作方法的研究: V. 免耕稻田供钾能力 [J]. 江苏农业科学, 1984(12): 28-29.
Xu J, Jiang L Y. Research on tillage method in rice field in Taihu Lake region: V. Supply ability of soil potassium in no-till rice field [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 1984(12): 28-29. (in Chinese)
- [37] Bates T E, Scott A D. Changes in exchangeable potassium observed on drying soil after treatment with organic compounds: I Release [J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 28: 769-772.
- [38] 李芳林,郝明德,李燕敏,等. 黄土高原旱区长期施肥条件下土壤钾素形态空间分布特征及有效性研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 127-142.
Li F L, Hao M D, Li Y M, et al. Research on characteristics of spatial distribution and availability of soil potassium forms under long-term fertilization in the dryland of the Loess Plateau [J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 127-142. (in Chinese)
- [39] Tan D S, Jin J Y, Jiang L H, et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China [J]. Agriculture & Ecosystems and Environment, 2012, 148: 65-71.