

# 灰漠土小麦-玉米-棉花轮作体系钾平衡与钾肥利用率<sup>\*</sup>

王西和<sup>1</sup> 吕金岭<sup>2</sup> 刘 骅<sup>1†</sup>

(1 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091)

(2 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

**摘 要** 研究了干旱区灰漠土农田典型作物长期定位方式下不同施肥处理对钾平衡及其钾形态和利用率的影响。实验包括9个处理, 分别为不施肥 (CK)、氮磷钾不均衡配施 (N、NP、NK和PK) 以及均衡施肥与秸秆或有机肥配施 (NPK、NPKS、NPKM和1.5 NPKM)。结果表明, 均衡施肥的产量显著高于不均衡施肥处理 (NP除外) ( $p < 0.05$ )。其中NP处理的产量与其他均衡施肥产量并无明显差异 ( $p > 0.05$ ), 说明钾不是灰漠土农田亏缺养分。钾平衡法发现, 均衡施肥中NPKS表现出钾的盈余, 而其余均衡施肥处理表现出钾的亏缺, 24 a亏缺量达到268至2 966 kg hm<sup>-2</sup>。所有施肥处理中, NPKM和1.5NPKM拥有最高的钾表观利用率, 分别达到81.2%和38.9%, 显著高于其他处理 ( $p < 0.05$ ), 说明配施有机肥可以显著提高灰漠土钾肥利用率。长期定位试验后, 不同处理的钾素形态变化显著, 尤其有机肥添加处理的非交换性钾、非特殊吸附性钾、水溶性钾和交换性钾显著高于其他处理 ( $p < 0.05$ ), 进一步说明配施有机肥或秸秆维持灰漠土农田钾素肥力方面的重要性。总而言之, 当前灰漠土农田常规施肥方式下的钾亏缺正在逐步加大, 补充更多的钾肥以及配合使用有机肥或秸秆应当被重视。

**关键词** 长期施肥; 钾平衡; 钾肥利用率; 钾素形态; 灰漠土农田

**中图分类号** S158.2; S158.3 **文献标识码** A

土壤的空间异质性以及土壤矿质元素区域分布的差异性, 导致不同土壤矿质养分的分布呈现地域性的特点, 其中钾素的区域差异性显得尤为明显<sup>[1-4]</sup>。钾素作为植物营养的三大营养元素之一, 对作物的高产、优质和抗逆性有着举足轻重的作用<sup>[5-7]</sup>。近些年来随着作物品种的改善、氮磷肥的大量施用以及农业管理措施的不断完善, 作物产量有了显著的提高, 也导致了更多的养分被作物吸收<sup>[8-9]</sup>。北方土壤普遍钾含量丰富, 人们施肥的时

候更多的关注氮磷的施用, 有些区域甚至只施氮磷肥<sup>[10-11]</sup>。这在短期内不会对作物产量产生明显的影响, 但从长远角度来看, 土壤钾素由于不能得到有效补充, 单纯依靠矿化或者少量环境钾的补充不足弥补农田土壤钾素的亏缺。相关研究表明, 我国钾素多年来一直处于亏缺水平, 钾的亏缺范围由南到北, 由东到西正在逐渐扩大<sup>[12-13]</sup>。北方的一些高钾土壤, 随着复种指数的不断增加, 也正变得亏缺, 钾的限制因子作用正在逐步加大<sup>[14]</sup>。不同土

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (41461066)、公益性行业 (农业) 科研专项经费 (201203030-08-04) 和国家灰漠土肥力与肥料效益监测站资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41461066), the National Department Public (Agriculture) Benefit Research Foundation of China (No. 201203030-08-04), and the National Grey Desert Soil Fertility and Fertilizer Benefit Station

<sup>†</sup> 通讯作者Corresponding author: 刘 骅 (1961—), 女, 安徽人, 研究员, 主要从事土壤改良方面研究。E-mail: liuhualh@sohu.com

作者简介: 王西和 (1981—), 男, 安徽阜阳人, 助理研究员, 主要从事农田养分循环方面研究。E-mail: wxh810701@163.com。

收稿日期: 2015-03-12; 收到修改稿日期: 2015-07-22

壤上施用钾肥对作物产量、土壤钾含量以及钾平衡的影响差异可能与土壤本身钾素水平、供钾能力、作物体系以及作物产量水平有关<sup>[15-16]</sup>。因此不同地域以及不同养分管理下钾素的平衡和利用率研究显得尤为重要。

灰漠土是我国荒漠地区主要土壤类型之一，代表着欧亚大陆腹地、温带内陆区域，同时又是西北干旱地区具有代表性的一类土壤<sup>[17]</sup>。小麦-棉花-玉米是该区域主要的种植作物。灰漠土土壤含钾丰富，供钾能力较强<sup>[18]</sup>。施氮磷而少施钾或者不施钾成为当地主要特点之一，有机肥添加和秸秆还田在该地区推广应用实施中出现的问题较多，解决的办法有限。近些年来，滴灌覆膜等先进农业方式的推广，更是改变了钾的输入输出情况。基于此环境条件下的作物产量、钾平衡以及土壤钾库的影响的研究报道还比较少。为此，本文利用新疆乌鲁木齐“国家灰漠土肥力与肥料效益监测站”的长期肥料定位试验，探讨长期不同施肥处理条件下钾素的输入输出平衡状况，为钾素的合理投入、维持土壤钾素肥力、提高土壤生产力提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

国家灰漠土肥力与肥效监测站位于新疆乌鲁木齐市以北25 km的新疆农业科学院“国家现代农业科技示范园区”内（43° 95′ 26″N，87° 46′ 45″E），地形地势东高西低，南高北低，坡度1/100~1/70，海拔高度600 m，地下水位30 m以下，来自天山北麓的雪水和地下水，年供水量在450万m<sup>3</sup>。常年降水量310 mm、蒸发量2 570 mm，年平均气温7.7℃，年平均日照时数2 594 h，无霜期156 d。该地区光、热资源丰富，适于多种粮、棉作物和瓜果、蔬菜的生长。

### 1.2 试验设计

供试土壤为灰漠土，主要发育在黄土状母质上。长期定位肥料试验始于1990年，并在1988年—1989年进行2年匀地。匀地后耕层（0~20 cm）土壤基本性状：有机质含量15.2 g kg<sup>-1</sup>，全氮0.868 g kg<sup>-1</sup>，全磷0.667 g kg<sup>-1</sup>，全钾19.8 g kg<sup>-1</sup>，碱解氮55.2 mg kg<sup>-1</sup>，速效磷3.4 mg kg<sup>-1</sup>，速效钾288 mg kg<sup>-1</sup>，缓效钾1 764 mg kg<sup>-1</sup>，pH 8.1，CEC

16.2 cmol kg<sup>-1</sup>，容重1.25 g cm<sup>-3</sup>。每年一季作物，以新疆北疆主要作物玉米、小麦、棉花轮作为一个轮作周期。

选择试验中的9个处理：包括不施肥（CK）；施氮（N）；氮磷（NP）；氮钾（NK）；磷钾（PK）；氮磷钾（NPK）；常量氮磷钾+常量有机肥（NPKM）；增量氮磷钾+增量有机肥（1.5NPKM）；氮磷钾（4/5）+秸秆还田（NPKS）。小区面积468 m<sup>2</sup>，不设重复，小区间隔采用预制钢筋水泥板埋深70 cm，地表露出10 cm加筑土埂，避免了漏水渗肥现象。N、P、K化肥分别用尿素、磷酸二铵、三料磷和硫酸钾质量比N：P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>：K<sub>2</sub>O=1：0.6：0.2；有机肥为羊粪，平均含N 8.0 g kg<sup>-1</sup>，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2.3 g kg<sup>-1</sup>，K<sub>2</sub>O 3.0 g kg<sup>-1</sup>；秸秆还田用的是当年作物的秸秆（表1）。总氮量60%的氮肥及全部磷、钾肥作基肥，在播种前将基肥均匀撒施地表，深翻后播种；40%的氮肥作追肥，冬小麦、玉米和春小麦各追肥一次，冬小麦追肥在春季第一次灌水时完成，春小麦在拔节期、玉米在大喇叭口期一次沟施。棉花全部的磷、钾肥和40%的氮肥基施，60%的氮肥在棉花主要生育期作追肥随水滴施，追施氮肥分配比例为：苗期20%、蕾期20%、花期40%、铃期40%。有机肥（羊粪）每年施用一次，于每年作物收获后均匀撒施深耕，秸秆是利用当季作物收获后的全部秸秆粉碎撒施后深耕。

### 1.3 样品采集

在玉米和小麦收获前取样，进行考种和经济性状测定，同时取植株分析样，冬小麦、春小麦和玉米植株按每小区三点，冬小麦、春小麦每点不低于50株，玉米不低于20株取样。籽粒、茎秆样品经风干粉碎后留作分析和保存之用。

棉花产量按小区实产计算，棉花生物学性状在吐絮后，各小区按“S”型取7个点，每个样点面积0.16 m<sup>2</sup>，分别调查株高、铃数、单铃重、衣分、生物量等，并取10株棉花进行养分测定；土壤样品的采集方法同棉花样品区7点，用土钻按0~20 cm、20~40 cm进行分层取样，同一层土样混匀后风干测定土壤养分。

在每季作物收获后取土壤样品，每小区取样10个点混合成一个样，取样深度0~20 cm，取样后立即风干保存，并取部分土样磨细过1 mm和0.25 mm筛，供测试分析用。

表1 灰漠土定位试验施肥量

Table 1 The fertilizer use amount of grey desert soil experiment ( kg hm<sup>-2</sup> )

| 处理Treatment | 有机肥Manure<br>( t hm <sup>-2</sup> ) | 秸秆<br>Straw<br>( t hm <sup>-2</sup> ) | 矿质肥料 Mineral fertilizer         |                                                 |                                                 |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|             |                                     |                                       | N                               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                   | K <sub>2</sub> O                                |
|             |                                     |                                       | Urea<br>( kg hm <sup>-2</sup> ) | Phosphorus pentoxide<br>( kg hm <sup>-2</sup> ) | Potassium superoxide<br>( kg hm <sup>-2</sup> ) |
| CK          | 0                                   | 0                                     | 0                               | 0                                               | 0                                               |
| N           | 0                                   | 0                                     | 241.5                           | 0                                               | 0                                               |
| NK          | 0                                   | 0                                     | 241.5                           | 0                                               | 61.9                                            |
| PK          | 0                                   | 0                                     | 0                               | 138                                             | 61.9                                            |
| NP          | 0                                   | 0                                     | 241.5                           | 138                                             | 0                                               |
| NPK         | 0                                   | 0                                     | 241.5                           | 138                                             | 61.9                                            |
| NPKS        | 0                                   | 4.5 ~ 9.0                             | 216.7                           | 116.6                                           | 52                                              |
| NPKM        | 30                                  | 0                                     | 84.9                            | 51.4                                            | 12.4                                            |
| 1.5NPKM     | 60                                  | 0                                     | 151.8                           | 90.4                                            | 19                                              |

1.4 分析方法

试验数据采集方法：数据采集按照国家土壤肥力与肥料效益监测站网制定的统一方法进行。土壤钾素测试方法：全钾用NaOH熔融火焰光度法；速效钾用1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OAC浸提—火焰光度法<sup>[19]</sup>。

植株全钾测试方法：H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消化，火焰光度法测钾。土壤钾形态分级：水溶性钾用蒸馏水浸提；非交换性钾为1 mol L<sup>-1</sup> 硝酸浸提与1 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提之差。交换性钾为1 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提与水溶性钾之差；非特殊吸附钾为0.5 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提与1 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提之差；特殊吸附钾为1 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提与0.5 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提之差值；全钾用HF-HClO<sub>4</sub>熔融。各级钾的浸提液均用火焰光度计测定<sup>[20-21]</sup>。

1.5 数据处理

钾表观平衡和回收率（RE）：钾的表观平衡为投入的钾与作物携出钾量之差<sup>[22]</sup>，产量数据是24 a（1990年—2013年）的总量，具体的计算方法为：

$K = ( \text{化肥钾} + \text{有机肥或者秸秆钾} + \text{降雨钾} + \text{种子钾} ) - ( \text{作物地上部钾携出量} )$ ，式中的灌溉水和降雨钾为2010—2013年的测定值1.67 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>，鉴于之前未收集降雨样品，所以其平均值代表24a钾素湿沉降及灌溉水平均值。小麦、棉花和玉米播量分别为 345 kg hm<sup>-2</sup>、45 kg hm<sup>-2</sup>和 52.5

kg hm<sup>-2</sup>。

根据24年的钾肥使用量和作物的钾素收获量，钾素的表观利用率使用下式计算：

$RE ( \% ) = ( \text{施钾处理钾携出量} - \text{对照处理钾携出量} ) \times 100 / \text{钾投入量}$

1.6 数据处理

实验数据用Excel，Spass 进行相关统计分析，使用Origin 8 做图。

2 结 果

2.1 产量

玉米、棉花和小麦24 a的平均产量显示，NP及其均衡施肥处理的产量显著高于其他非均衡施肥处理。与NPK和NP相比，NK和PK处理的产量显著较低，说明灰漠土农田氮磷是限制性元素。NP与NPK产量方面并未表现出显著差异（ $p > 0.05$ ），说明灰漠土不缺钾素（图1）。NP和NPK的产量均呈显著的增长趋势，然而对于NPK处理来说，其玉米和冬小麦的产量增长趋势更为明显。所有处理中，配施有机肥处理的产量增长最快，说明均衡施肥尤其是有机肥配施化肥处理更有助于作物产量的增加。不同施肥处理的变异系数（CV）差别明显，NPNS处理玉米产量的变异系数最小，NPKM和1.5NPKM处理棉花和冬麦的变异系数最小；而对

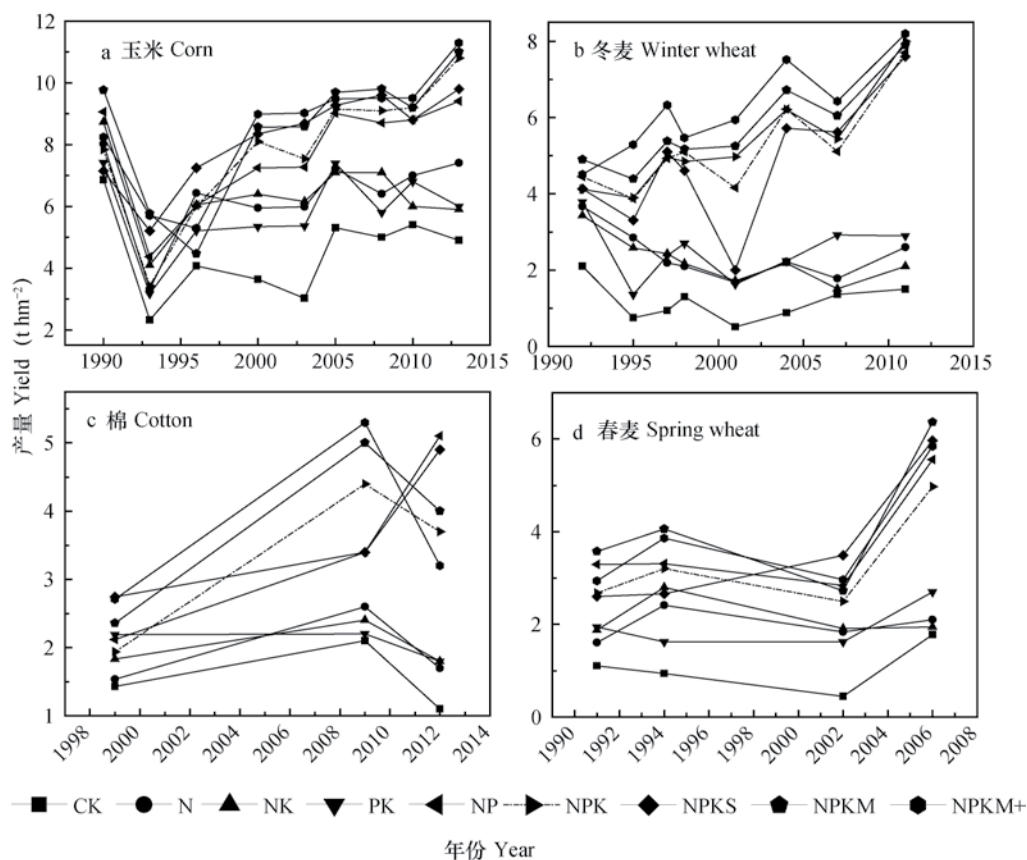


图1 不同施肥处理玉米、冬麦、棉花和春麦产量动态变化趋势

Fig. 1 Dynamic trends of maize, winter wheat, cotton and spring wheat in yield relative to fertilizer treatment

于春麦来说,除了NPKS处理外,其余均衡施肥处理的CV值均较小(表2)。说明均衡施肥中,尤其是配施有机肥处理产量的稳定性较好。

## 2.2 作物籽粒和秸秆含钾量

从表3中可以看出各处理中,玉米籽粒钾素含量范围介于4.9‰~5.6‰之间,冬麦的籽粒钾素含量介于2.2‰~2.7‰之间,春麦籽粒钾素含量介于2.7‰~3.5‰之间,棉花籽粒钾素含量介于9‰~11.2‰之间。所有处理中,不施钾处理(CK、N和NP)的钾素含量显著低于施钾处理( $p < 0.05$ )。均衡施肥中,除了1.5NPKM处理籽粒均表现较高的含钾量外,其余处理钾素含量并未达到显著不同。相比籽粒钾含量,不同处理的秸秆钾量差异明显,玉米秸秆钾素含量介于14‰~28.8‰,冬麦秸秆钾素含量介于5.4‰~1.6‰,春麦秸秆钾素含量介于9.8‰~14.3‰,棉花秸秆钾素含量介于16.6‰~25.2‰。其中不施钾处理秸秆含钾量显著低于其他处理( $p < 0.05$ ),均衡施肥中,配施有

机肥处理(NPKM和1.5NPKM)的秸秆钾含量显著高于其他处理( $p < 0.05$ )。

## 2.3 钾表观平衡和回收率

从表4中可以看出,通过对各个处理钾素的输入输出进行定量分析,结果发现不同处理的钾素输入输出量存在较大差异,施钾处理和配施有机肥或者秸秆处理的钾素输入量较高,尤其1.5NPKM和NPKS处理24 a的钾素输入量分别达到4 464 kg hm<sup>-2</sup>和3 245 kg hm<sup>-2</sup>。不同处理的钾素输出量也存在明显差异,1.5NPKM和NPKM处理的钾素输出量最高,分别达到4 732 kg hm<sup>-2</sup>和4 864 kg hm<sup>-2</sup>,显著高于其他处理( $p < 0.05$ )。NPK、NPKS和NP处理的钾素携出量要高于不均衡处理,这主要是因为含氮磷的处理产量相对较高,所以整体吸钾量也相对较高。计算钾素输入输出平衡后发现,除了NPKS处理外,其他几乎所有处理表现出钾素输入的消极平衡,其钾素的亏缺量介于267.9 kg hm<sup>-2</sup>至2 965.7 kg hm<sup>-2</sup>之间,其中NP和NPKM的亏缺量尤其明显。不均衡施钾处理(NK和PK)和高量

表2 不同施肥处理玉米、小麦和棉花产量及其产量变异系数

| Table 2 Yields of maize, wheat and cotton and CV relative to fertilizer treatment |                        |          |                        |          |                        |          |                        |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| 处理                                                                                | 玉米                     |          | 冬麦                     |          | 春麦                     |          | 棉花                     |          |
| Treatment                                                                         | Maize                  | CV ( % ) | Winter wheat           | CV ( % ) | Spring wheat           | CV ( % ) | Cotton                 | CV ( % ) |
|                                                                                   | ( t hm <sup>-2</sup> ) |          | ( t hm <sup>-2</sup> ) |          | ( t hm <sup>-2</sup> ) |          | ( t hm <sup>-2</sup> ) |          |
| CK                                                                                | 4.5c                   | 33.1     | 1.2d                   | 43       | 1.1b                   | 73.8     | 1.6b                   | 33       |
| PK                                                                                | 5.8c                   | 24.2     | 2.4c                   | 30.9     | 2.0b                   | 22.1     | 1.9b                   | 11.4     |
| N                                                                                 | 6.4b                   | 25.1     | 2.3c                   | 29.7     | 2.1b                   | 29.1     | 2.0b                   | 29       |
| NK                                                                                | 6.4b                   | 22       | 2.5c                   | 27.1     | 2.0b                   | 12       | 2.1b                   | 29.8     |
| NP                                                                                | 7.8a                   | 22.3     | 5.2a                   | 23.8     | 3.8a                   | 25.5     | 3.6a                   | 31.3     |
| NPK                                                                               | 7.9a                   | 26.2     | 5.3a                   | 23.9     | 3.3a                   | 15.2     | 3.3a                   | 38       |
| NPKS                                                                              | 8.2a                   | 17.8     | 4.8b                   | 35.5     | 3.7a                   | 30.4     | 3.7a                   | 29.9     |
| NPKM                                                                              | 8.5a                   | 24.4     | 5.7a                   | 20.4     | 4.2a                   | 20.3     | 3.8a                   | 25.6     |
| 1.5NPKM                                                                           | 8.6a                   | 23.2     | 6.2a                   | 21.2     | 3.9a                   | 22.1     | 3.7a                   | 24.2     |

注：CV表示变异系数，表示不同施肥处理产量的年际稳定性。不同字母代表差异达到0.05的极显著水平

Note: CV stands for coefficients of variance, indicating yield stability relative to fertilizer treatment. Different letters in the same column mean significant difference between treatments at the 0.05 probability level

表3 不同作物籽粒和秸秆平均钾含量（1990—2013）

| Table 3 The average potassium of grain and straw of different crops ( 1990—2013, g kg <sup>-1</sup> ) |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 处理                                                                                                    | 玉米                     |                        | 冬麦                     |                        | 春麦                     |                        | 棉花                     |                        |
|                                                                                                       | Maize                  |                        | Winter wheat           |                        | Spring wheat           |                        | Cotton                 |                        |
|                                                                                                       | 籽粒 Grain               | 秸秆 Straw               | 籽粒 Grain               | 秸秆 Straw               | 籽粒 Grain               | 秸秆 Straw               | 籽粒 Grain               | 秸秆 Straw               |
|                                                                                                       | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) | ( g kg <sup>-1</sup> ) |
| CK                                                                                                    | 5.3b                   | 14.1d                  | 2.4b                   | 5.4d                   | 2.7c                   | 9.8d                   | 10.4b                  | 16.6c                  |
| N                                                                                                     | 5.0c                   | 15.6d                  | 2.2c                   | 8.8c                   | 3.1b                   | 11.0c                  | 10.8ab                 | 17.7c                  |
| NK                                                                                                    | 5.1c                   | 17.1c                  | 2.4b                   | 9.0c                   | 2.7c                   | 13.8a                  | 10.9ab                 | 17.0c                  |
| PK                                                                                                    | 5.8a                   | 19.5c                  | 2.7a                   | 6.1d                   | 3.1b                   | 10.6c                  | 10.7ab                 | 19.3b                  |
| NP                                                                                                    | 5.3b                   | 16.6cd                 | 2.4b                   | 9.1c                   | 3.0b                   | 11.2c                  | 9.7c                   | 17.4                   |
| NPK                                                                                                   | 4.9c                   | 17.9c                  | 2.7a                   | 11.5a                  | 3.0b                   | 12.6b                  | 9.0d                   | 19.1b                  |
| NPKS                                                                                                  | 5.6a                   | 18.1c                  | 2.3b                   | 9.4c                   | 2.7c                   | 12.1b                  | 11.2a                  | 17.9c                  |
| NPKM                                                                                                  | 5.2b                   | 25.85b                 | 2.6a                   | 10.5b                  | 3.2ab                  | 13.7a                  | 9.1d                   | 24.3a                  |
| 1.5NPKM                                                                                               | 5.3b                   | 28.8a                  | 2.7a                   | 11.6a                  | 3.5a                   | 14.3a                  | 11.2a                  | 25.2a                  |

注：不同字母代表差异达到0.05的及显著水平

Note: Different letters in the same column mean significant difference between treatments at the 0.05 probability level

有机肥处理（1.5NPKM）表现出钾素轻微负平衡。NPKS处理表现出钾盈余，其盈余量为7.3 kg hm<sup>-2</sup>。从作物钾的表现利用率来看，NPKM拥有最高的钾利用率数值，达到81.2%。其次为1.5NPKM和NPK处理，数值分别达到38.9%和

25%。其余处理的钾利用率介于7%至11%之间（表5）。

2.4 土壤不同形态钾含量

从图2中可以看出，24 a之后不同施肥处理土壤速效钾含量差别明显，不施钾肥处理土壤速效钾

表4 不同处理土壤钾表现平衡状况 (1990—2013)

| 处理<br>Treatment | 钾投入K input    |                            |                                                            |         | 钾携出量K output |             |                    |                    |           |          |                  |
|-----------------|---------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|---------|--------------|-------------|--------------------|--------------------|-----------|----------|------------------|
|                 | 化肥钾<br>Potash | 有机肥或秸秆<br>Manure and straw | 灌溉水和降雨<br>1) Irrigation and<br>precipitation <sup>1)</sup> | 种子 Seed | 总量<br>Total  | 玉米<br>Maize | 冬麦<br>Winter wheat | 春麦<br>Spring wheat | 棉花 Cotton | 总量 Total | 钾平衡 K<br>Balance |
| CK              | 0             |                            | 40                                                         | 8.1     | 48           | 1 037       | 100                | 72                 | 207       | 1 416    | -1 368           |
| N               | 0             |                            | 40                                                         | 8.1     | 48           | 1 478       | 244                | 201                | 277       | 2 200    | -2 152           |
| NK              | 1 486         |                            | 40                                                         | 8.1     | 1 534        | 1 609       | 239                | 234                | 261       | 2 343    | -808.9           |
| PK              | 1 486         |                            | 40                                                         | 8.1     | 1 534        | 1 721       | 232                | 146                | 269       | 2 367    | -833.1           |
| NP              | 0             |                            | 40                                                         | 8.1     | 48           | 1 811       | 531                | 315                | 357       | 3 014    | -2 966           |
| NPK             | 1 486         |                            | 40                                                         | 8.1     | 1 534        | 1 945       | 682                | 332                | 421       | 3 380    | -1 847           |
| NPKS            | 1 330         | 1 868                      | 40                                                         | 8.1     | 3 245        | 2 015       | 505                | 328                | 390       | 3 238    | 7.3              |
| NPKM            | 298           | 1 980                      | 40                                                         | 8.1     | 2 326        | 3 135       | 705                | 486                | 539       | 4 864    | -2 538           |
| 1.5NPKM         | 456           | 3 960                      | 40                                                         | 8.1     | 4 464        | 2 942       | 737                | 449                | 604       | 4 732    | -267.9           |

注: 1) 灌溉水和降雨的钾数值来自于2010—2013年的检测平均值, 代表24 a的平均钾含量。不同字母代表差异达到0.05的及显著水平。

Note: 1) Potassium contents in irrigation water and rain water were the means of 2010 ~ 2013, representing the mean K content of the 24 years. Different letters in the same column indicate significant difference between treatments at the 0.05 probability level

表5 不同处理钾表观利用率（1990—2013）

Table 5 Apparent K recovery rate (RE) relative to fertilizer treatment (1990—2013)

| 处理 Treatment | 钾投入量                           | 钾携出量                             | 钾表观利用率 |
|--------------|--------------------------------|----------------------------------|--------|
|              | K input (kg hm <sup>-2</sup> ) | K removal (kg hm <sup>-2</sup> ) |        |
| CK           | 0                              | 1 416                            |        |
| N            | 0                              | 2 200                            |        |
| NK           | 1 486                          | 2 343                            | 10     |
| PK           | 1 486                          | 2 367                            | 11     |
| NP           | 0                              | 3 014                            |        |
| NPK          | 1 486                          | 3 380                            | 25     |
| NPKS         | 3 197                          | 3 238                            | 7      |
| NPKM         | 2 278                          | 4 864                            | 81     |
| 1.5NPKM      | 4 416                          | 4 732                            | 39     |

注：钾表观利用率（%）=（施钾处理作物携出钾量—不施钾处理作物携出钾量）×100/该处理施钾量；其中 NK 处理对应的对照为 N；PK 为 CK；其他处理为 NP。

Note: Apparent K recovery rate for a specific treatment ( % ) = ( K removal with crop in treatments with K addition—K removal with crops in treatments without K addition ) × 100/ K applied in the treatment; Treatment NK had Treatment N for comparison, Treatment PK had CK for comparison and the other treatments all had Treatment NP for comparison

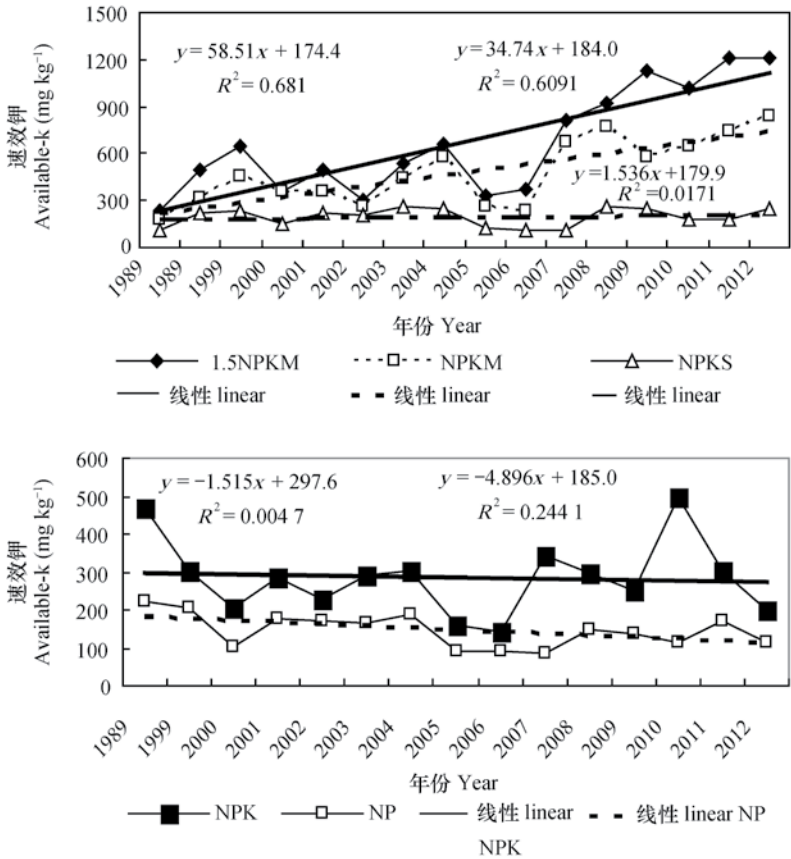


图2 不同施肥处理速效钾年际变化

Fig. 2 Annual variation of available K in the soil relative to fertilizer treatment

含量相对较低, 均衡施肥处理土壤速效钾含量相对较高, 其中有机肥配施处理土壤速效钾数值显著高于其他处理 ( $p < 0.05$ )。

对不同施肥处理土壤钾素形态对比发现, 不同施肥处理的矿物钾含量差别明显, 其中NP处理的矿物钾含量最低, 达到了  $11.3 \text{ g kg}^{-1}$ 。NPKS和NK含量较高, 分别达到了  $16.9 \text{ g kg}^{-1}$ 和  $16.5 \text{ g kg}^{-1}$ 。NPK、NPKM和1.5NPKM处理的矿物钾含量相对

较低, 分别为  $15 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $15.1 \text{ g kg}^{-1}$ 和  $15.3 \text{ g kg}^{-1}$ 。其他钾素形态中, 1.5NPKM有最高的非交换性钾含量, 达到  $2188 \text{ mg kg}^{-1}$ , 显著高于其他处理 ( $p < 0.05$ )。NPKM和NPK也表现出较高的交换性钾含量, 分别达到  $1816 \text{ mg kg}^{-1}$ 和  $1935 \text{ mg kg}^{-1}$ 。有机肥添加处理的非吸附性钾和交换性钾显著高于其他处理 ( $p < 0.05$ ), 分别为  $146.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $144.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 和  $119 \text{ mg kg}^{-1}$ 与  $123 \text{ mg kg}^{-1}$  (表6)。

表6 长期定位施肥灰漠土不同施肥处理钾素形态 (2013)

Table 6 The potassium forms of different treatments in the long-term experiment (2013)

| 处理<br>Treatment | 矿物钾<br>Mineral K<br>( $\text{g kg}^{-1}$ ) | 非交换性钾<br>Non-exchangeable K<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | 特殊吸附钾<br>Specifically absorbed K<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | 非特殊吸附钾<br>Non-specifically absorbed K<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | 水溶性钾<br>Water soluble K<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | 交换性钾<br>Exchangeable K<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| CK              | 15.1c                                      | 1532d                                                  | 17.0b                                                       | 9.3d                                                             | 73.3d                                              | 26.2c                                             |
| N               | 15.2c                                      | 1556d                                                  | 27.7a                                                       | 6.2d                                                             | 82.4d                                              | 33.9c                                             |
| NK              | 16.5a                                      | 1679c                                                  | 18.4b                                                       | -73.0f                                                           | 209.7a                                             | -54.5d                                            |
| PK              | 16.2b                                      | 1320e                                                  | 9.7c                                                        | 24.3c                                                            | 76.3d                                              | 34.0c                                             |
| NP              | 11.3d                                      | 1519d                                                  | 24.8a                                                       | 3.3d                                                             | 64.2de                                             | 28.1c                                             |
| NPK             | 15c                                        | 1935b                                                  | 12.3bc                                                      | -12.4e                                                           | 161.2b                                             | 64.7b                                             |
| NPKS            | 16.9a                                      | 1489d                                                  | 0.5d                                                        | 69.7b                                                            | 52.0e                                              | 70.2b                                             |
| NPKM            | 15.1c                                      | 1816b                                                  | -21.4e                                                      | 144.4a                                                           | 136.9c                                             | 123.0a                                            |
| 1.5NPKM         | 15.3c                                      | 2188a                                                  | -27.9e                                                      | 146.9a                                                           | 212.7a                                             | 119.0a                                            |

### 3 讨论

灰漠土24 a的肥料定位轮作试验, 各处理的产量差别明显。尤其是均衡施肥处理的产量显著高于不均衡施肥处理。然而, 不施钾肥处理 (NP) 的产量与其他均衡施肥处理并未表现出明显的差异, 说明钾肥处理对作物的增产效果不明显, 24 a的轮作不施钾肥处理的土壤本底钾含量仍可以保证作物的基本钾需求。对比NPK和NP土壤的速效钾含量 (图2), 可以看出这两个处理的土壤速效钾含量均有显著下降趋势, 而NP处理的速效钾下降速度更快。NPKS、NPKM和1.5NPKM的速效钾含量线性分析显示, 这几个处理的土壤速效钾含量均有增长趋势, 其中配施有机肥处理的速效钾含量增速更为明显, 说明配施有机肥可以显著改善土壤速效钾含量。然而秸秆还田处理虽然有大量的秸秆钾补充, 然而土壤速效钾含量并未显著增加, 这可能是

由于秸秆钾释放至土壤的速率较慢, 缓慢释放过程中被作物阶段性的吸收。这不同于配施有机肥处理, 有机肥速效钾更容易短时间内释放, 有可能造成短时间内钾含量急剧上升。我们的研究结果与葛玮键<sup>[12]</sup>与Steiner等<sup>[13]</sup>的研究结果类似。说明秸秆还田处理对于土壤速效钾含量的提升效果并不明显。

农田养分收支平衡的定期计算是检查土壤肥力状况和预测土壤养分水平发展趋势的方法之一<sup>[22, 24]</sup>。本研究的结果显示, NK和PK处理的土壤钾基本到达平衡状态, 并未表现出明显的负平衡, 主要由于这两个处理作物产量不高, 带走的钾量相对较低。NPKS处理的钾平衡处于盈余状态, 这与钾的充分投入有关, 即钾输入略微超过了钾的输出。而对于NP处理, 其钾的亏缺量最大, 主要是因为NP处理的产量相对较高, 作物带走了大量的钾, 而土壤的外源钾未得到及时的补充, 出现了一个只出不入

的局面。NPK和NPKM的钾处于亏缺状态,这说明当前 $61.9 \text{ kg hm}^{-2}$ 的钾投入量不足以满足钾的平衡需求,土壤的钾素呈消耗状态。水稻土和紫色土也有类似的结果,典型的施钾量也未能满足农田钾的平衡需求<sup>[25-26]</sup>。从产量数据可以看出,NP处理和NPK处理无论玉米还是小麦,其产量均未显著的差异,而且产量均呈增长趋势。相对于NPK处理而言,NP处理的增长速度相对较低。对于秸秆或者有机肥和化肥配施处理的产量也同样显示出增长趋势,配施有机肥处理的产量增速相对更快,这说明有机肥可以有效的提高灰漠土作物的产量。

配施有机肥处理的钾肥表观利用率明显更高,尤其对于NPKM处理的钾肥利用率可以达到81.2%。而NPK和NPKS处理的钾肥利用率只有25%和7%。说明有机肥释放的钾可以得到作物的高效吸收,而单施化肥由于钾的释放速率较快,反而造成了较低的钾利用率。对于秸秆还田处理,其更低的钾利用率,主要是由于秸秆钾的有效性以及释放速率有关。总而言之,配施有机肥处理可以提升灰漠土钾的利用率,提升土壤肥力。

不同施肥处理的钾素形态差异显著。对于矿物钾而言,NP的矿物钾含量显著低于其他处理( $p < 0.05$ ),究其原因主要是由于长期不添加钾肥,依靠于土壤本底钾,必然会导致土壤钾的消耗,越来越多的矿物钾释放并被吸收,使得土壤钾维持在一个负平衡局面。NPKS处理的土壤矿物钾含量比较高,主要是由于秸秆钾释放缓慢,导致土壤钾的不断累积,而且NPKS处理的钾素输入量显著高于其他处理,作物可以从钾素输入中获取足够的钾,降低了对土壤矿物钾的消耗。同样,除了NPKS处理外,NK和PK处理的矿物钾含量显著高于其他处理,这主要由于作物产量低,吸收钾的含量相对较少以及钾肥的投入降低了对土壤矿物钾的消耗。有机肥配施处理的非交换性钾、水溶性钾和交换性钾显著高于其他处理,这主要是由于土壤有机质含量的提升,更多的土壤溶液累积在地表,减少了钾的淋溶损失,从而有效地保证了耕层土壤速效钾的含量。

## 4 结 论

24 a的长期定位肥料试验,NP处理的产量并未显著降低,这主要是由于灰漠土本底富含钾,需

要更长时间的定位,才能凸显钾的匮乏,影响到作物的产量。均衡施肥除了NPKS之外,其余处理均出现了不同程度的钾亏缺,说明当前的施钾量没有达到一种平衡状态。而所有施肥中,NPKM和1.5NPKM处理的钾肥利用率最高,说明配施有机肥处理可以有效提升钾的吸收利用率。此外,所有处理中,配施有机肥处理表土的速效钾含量较高,秸秆还田处理的矿物钾含量最高,说明配施有机肥或者秸秆还田处理可以提升灰漠土土壤的钾肥力。总而言之,当前灰漠土农田钾肥施用量整体显现一个人不敷出的局面,维持钾肥力平衡需要加大钾肥使用量,而均衡施肥中配施有机肥或者秸秆添加可以提高钾肥利用率,值得推荐。

## 参 考 文 献

- [1] Adesanwo O O, Odu U V, Thompson O F. Dynamics of potassium in representative soil series of southwestern nigeria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44 (22): 3259—3266
- [2] Rayment G. Total Potassium to Exchangeable potassium ratios as a guide to sustainable soil potassium supply. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013: 44 (1-4), 113—119.
- [3] 刘会玲, 陈亚恒, 段毅力, 等. 土壤钾素研究进展. 河北农业大学学报, 2002, 25: 66—68  
Liu H L, Chen Y H, Duan Y L, et al. The advance of soil potassium (In Chinese). *Journal of Agricultural University of Heibei*. 2002, 25: 66—68
- [4] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 等. 我国北方土壤—作物系统内钾素平衡及钾肥肥效研究1. 主要种植制下的土壤钾素平衡与调控. 土壤肥料, 2000 (1): 16—21  
Liu R L, Jin J Y, Wu R G, et al. The research about potassium balance and potash fertilizer effect in the soil-crop systems in north China (In Chinese). *Soil Fertilizer*, 2000 (1): 16—21.
- [5] Li X K, Zhan L P, Lu J W, et al. Potassium mobilization and transformation in red paddy soil as affected by rice. *Agronomy Journal*, 2014, 106 (3): 1011—1017
- [6] Singh V K, Dwivedi B S, Buresh R J, et al. Potassium Fertilization in Rice-Wheat System across Northern India: Crop Performance and Soil Nutrients. *Agronomy Journal*, 2013: 105 (2), 471—481
- [7] 朱青, 王兆骞, 陈正刚, 等. 中国西南地区坡地钾素平衡及管理措施探讨. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (6): 772—777  
Zhu Q, Wang Z Q, Chen Z G, et al. Potassium balance

- and management on sloping land in southwest China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12 (6): 772—777
- [ 8 ] 刘枫, 吴传洲, 朱克保, 等. 沿江平原稻麦轮作系统维持钾素平衡和作物高产的钾肥运筹研究. *土壤*, 2014, 46 (2): 232—238
- Liu F, Wu C Z, Zhu K B, et al. Study on potassium strategy to maintain crop high yield and potassium balance in cropland under rice-wheat rotation systems (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (2): 232—238
- [ 9 ] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (5): 1110—1118
- Xie J G, Hou Y P, Yin C X, et al. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield nutrient absorption and soil potassium balance (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (5): 1110—1118
- [ 10 ] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 等. 我国北方土壤-作物系统内钾素平衡及钾肥肥效研究 II. 主要作物的钾肥增产效果. *土壤肥料*, 2000 (1): 9—11
- Liu R L, Jin J Y, Wu R G, et al. The research about potassium balance and potash fertilizer effect in the soil-crop systems in north China (In Chinese). *Soil Fertilizer*, 2000 (1): 9—11
- [ 11 ] 孙丽敏, 李春杰, 何萍, 等. 长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (5): 1096—1102
- Sun L M, Li C J, He P, et al. Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (5): 1096—1102
- [ 12 ] 王火焰, 朱树国, 周健民, 等. 常规方法准确测定土壤有效钾素变化可能性的探讨. *土壤通报*, 2006, 37 (5): 954—960
- Wang H Y, Zhu S G, Zhou J M, et al. A discussion on the possibility of accurate quantifying the variation of available K in the soils by common methods (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (5): 954—960
- [ 13 ] 孙海霞, 王火焰, 周健民, 等. 长期定位试验土壤钾素肥力变化及其对不同测钾方法的响应. *土壤*, 2009, 41 (2): 212—217
- Sun H X, Wang H Y, Zhou J M, et al. Change of soil potassium fertility in long-term located field experiment and comparison of different methods to measure potassium change in soil (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (2): 212—217
- [ 14 ] 谭德水. 长期施钾对北方典型土壤钾素及作物产量、品质的影响. 北京: 中国农业科学院, 2007
- Tan D S. Effect of Long-term application of potassium on soil K, crop yield and quality in selected soils from north China (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007
- [ 15 ] Srinivasarao C, Kundu S, Ramachandrapa B K, et al. Potassium release characteristics, potassium balance, and finger millet (*Eleusine coracana* G.) yield sustainability in a 27-year long experiment on an Alfisol in the semi-arid tropical India. *Plant and Soil*, 2014, 374 (1/2): 315—330.
- [ 16 ] 李贵宝. 不同土壤施用钾肥对小麦生长和土壤钾含量的影响. *土壤肥料*, 1996: 34—36
- Li G B. The effect of different soil potassium application amount for the wheat growth and soil potassium (In Chinese). *Soil Fertilizer*, 1996: 134—36
- [ 17 ] 刘骅, 王讲利, 谭新霞, 等. 长期定位施肥对灰漠土磷肥肥效与形态的影响. *新疆农业科学*, 2003, 40 (2): 111—115
- Liu H, Wang J L, Tan X X, et al. The Effect of long-term fertilization on phosphor efficiency and modality (In Chinese). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2003, 40 (2): 111—115
- [ 18 ] 刘骅, 王西和, 郑惠琴, 等. 长期定位施肥对灰漠土钾素形态的影响. *新疆农业科学*, 2008, 45 (3): 423—427
- Liu H, Wang X H, Zheng H Q, et al. Effects of long-term located fertilization on the grey desert soil potassium Forms (In Chinese). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45 (3): 423—427
- [ 19 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005: 80—140
- Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2005: 80—140
- [ 20 ] Helmke P A, Sparks D L. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. // Sparks D L. *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*. SSSA Book Ser. 5.W1: SSSA, Madison, 1996: 551—574
- [ 21 ] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 1999: 8—80
- Huang C Y. *Pedology* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1999: 8—80
- [ 22 ] 葛玮健, 常艳丽, 刘俊梅, 等. 壤土区长期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响. *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 a loess soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18 (3): 629—636
- [23] Steiner F, Pivetta L A, Castoldi G, et al. Phosphorus and potassium balance in soil under crop rotation and fertilization. Semina-Ciencias Agrarias, 2012, 33 (6): 2173—2186
- [24] Orlovius K. Influence of long-term k-fertilizer treatments on euf-K soil fractions and crop yields in the federal-republic-of-germany. Plant and Soil, 1985, 83 (1): 175—182
- [25] 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. 土壤学报, 2003, 40 (2): 274—279
- [26] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥对水稻土和紫色土钾素容量和强度关系的影响. 土壤学报, 2009, 46 (4): 640—645
- Zhang H M, Xu M G, Lv J L, et al. Effect of long-term fertilization on potassium quantity-intensity relationship in paddy and purple soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (4): 640—645

## Potassium Balance and Use Efficiency in Grey Desert Soil under Continuous Wheat-maize-cotton Crop Rotation System

WANG Xihe<sup>1</sup> LÜ Jinling<sup>2</sup> LIU Hua<sup>1†</sup>

(1 Institute of Soil and Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091 China)

(2 Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** Effects of long-term fertilization on balance, forms and use efficiency of potassium in oasis grey desert soil under a typical crop rotation system as affected by fertilization treatment were studied in an arid area. The long term fertilization experiment was designed to have 9 treatments, i.e., CK (No fertilization), N, NP, NK, PK, NPK, NPKS (NPK plus straw), NPKM (NPK plus organic manure) and 1.5NPKM (1.5 folds of NPKM). Results show that the balanced fertilizer treatments were much higher than the unbalanced fertilizer treatments in yield (except the NP). However, Treatment NP was an exception, and did not differ much from the balanced fertilizer treatments in yield ( $p > 0.05$ ), indicating that the grey desert soil is not in deficit of potassium. Budgeting of soil potassium revealed that only Treatment NPKS was gaining in K, while all the others were losing, with K deficit reaching as high as  $268 \sim 2\,996 \text{ kg hm}^{-1}$ . Among all the K treatments, Treatments NPKM and 1.5NPKM were the highest in apparent use efficiency of K, reaching up to 81.2% and 38.9%, respectively, much higher than all the others ( $p < 0.05$ ), indicating that addition of manure may improve potassium use efficiency. After the long-term fertilization experiment, potassium varied significantly in form in all the treatments. Treatments NPKM and 1.5NPKM were much higher than all the other treatments ( $p < 0.05$ ) in non-exchangeable K, non-specific absorbable K, water soluble K and exchangeable K, demonstrating the importance of addition of organic manure or straw to NPK in maintaining potassium fertility in grey desert soil. In short, the conventional fertilization method fails to meet K demand of the crops, leading to growing K deficiency in farmlands of grey desert soil. More attention should be given to application of more potassium fertilizer or addition of organic manure or incorporation of crop straw in the farmlands of grey desert soil.

**Key words** Long-term fertilization; Potassium balance; Potassium utilization rate; Potassium forms; Cropland of grey desert soil

(责任编辑: 汪枳生)