

长期施肥对棕壤矿物吸附点位钾有效性及其剖面分布的影响

李娜, 韩晓日*, 杨劲峰, 刘宁, 李巧宁, 房大伟

(沈阳农业大学土地与环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室,
农业部东北玉米营养与施肥科学观测试验站, 辽宁沈阳 110866)

摘要: 运用连续提取法结合常规方法, 研究玉米—玉米—大豆轮作条件下, 经过 31 年不同施肥后棕壤矿物吸附的 p 位钾、e 位钾和 i 位钾的有效性及其剖面分布情况。结果表明: 耕层土壤各位点钾含量及占全钾比例均表现为 i 位 > e 位 > p 位; 长期单施化学钾肥或不施钾各位点钾含量降低, 有机肥配施化肥可以维持土壤中各位点钾含量。相关分析表明, 交换性钾与 p 位和 e 位钾相关性显著, 相关系数分别为 0.926* 和 0.886*; 植株地上部吸钾量与 p 和 e 位钾呈显著正相关关系, 与 i 位钾呈极显著正相关关系 ($r=0.963^{**}$); 不同位点间钾含量呈极显著正相关关系。在剖面分布中, p、e 和 i 位钾含量均表现为 0—20 cm > 20—40 cm。

关键词: 长期施肥; 棕壤; 吸附位点钾; 表观平衡; 有效性; 剖面分布

中图分类号: S153.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2012)06-1412-06

Effects of long-term fertilization on the availability of K adsorbed by clay minerals and profile distribution in brown soil

LI Na, HAN Xiao-ri*, YANG Jin-feng, LIU Ning, LI Qiao-ning, FANG Da-wei

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/

National Engineering Laboratory of High Efficient Use on Soil and Fertilizer Resources/

Experiment Station of Northeast Maize Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China)

Abstract: The sequential extractions combined with conventional methods were used to study the availability of K adsorbed by clay minerals and the profile distribution under long-term fertilization of brown soil, with a maize-maize-soybean rotation. Results showed that the contents of K and the proportion in total K on arable layer presented as follows: i > e > p. Contents of p, e and i sites K with chemical K fertilizer application and no K fertilizer application decreased. And organic manure with K fertilizer application could remain the amount of K at a higher level. Correlation analysis indicated positive correlation between p-site K, e-site K and exchangeable K, and the correlation coefficient were 0.926* and 0.886*, respectively. A positive significant correlation was observed between p-site K, e-site K and the uptake of K by crops. And there was a highly significant correlation between i sites and the uptake of K by crops ($r=0.963^{**}$). There was an extremely significant positive correlation among p-site K, e-site K and i-site K. The tendency of contents of potassium were all changed with depth as follows: 0–20 cm > 20–40 cm.

Key words: long-term fertilization; brown soil; K adsorbed by clay minerals; apparent balance; availability; profile distribution

收稿日期: 2012-03-16

接受日期: 2012-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(31071861); 国家科技支撑计划(2011BAD16B12)项目资助。

作者简介: 李娜(1983—), 女, 黑龙江省哈尔滨人, 博士研究生, 主要从事植物营养与土壤肥力研究。E-mail: lnxlina@163.com

* 通讯作者 E-mail: hanxiaori@163.com

钾是植物必需的营养元素之一,而且是土壤中含量最丰富的营养元素^[1]。研究表明土壤中的钾只以无机形式存在,可以被植物直接吸收利用的很少,即使施钾其利用率也不高,因为多数 K^+ 被土壤粘土矿物所吸持固定^[2]。土壤中能够吸持钾的点位大致分为 3 种,即粘粒表面的 p 位点,矿物晶片边缘的 e 位点和矿物层间的 i 位点^[3-5]。土壤钾的存在形式、分布规律及其植物有效性是决定其供钾能力的重要因素^[6]。肥料长期定位试验信息量丰富、数据可靠、解释力强具有常规试验不可比拟的优点^[7],前人利用长期肥料定位试验对钾素的形态、有效性及空间分布情况进行了大量研究^[8-13]。本文从土壤中钾吸附位点的角度,研究长期轮作施肥对棕壤钾素有效性及其剖面分布的影响,探索施肥后土壤中钾素的化学行为及垂直分布情况,以期对钾肥的合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

土壤样本采自沈阳农业大学棕壤肥料长期定位试验站。试验站建于 1979 年,至 2009 年已有 31 年。土壤为发育在第四纪黄土性母质上的筒育湿润淋溶土(耕作棕壤),试验开始前土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的基本养分状况见表 1。该地处于松辽平原南部的中心地带,北纬 40°48′,东经 123°33′,属于温带湿润-半湿润季风气候,年降水量 574~684 mm,年蒸发量平均为 1435.6 mm,年平均气温 7.0~8.1℃,10℃以上积温 3300~3400℃,无霜期 148~180 d。该地区春季降水量少,6 月~8 月雨量充沛,期间平均降水量 547 mm,平均气温 20.7℃,适于作物生长,是作物生长旺季。作物的轮作方式为玉米—玉米—大豆。

表 1 1979 年试验前土壤基本理化性质
Table 1 The soil physical-chemical properties of soil before trial in 1979

土壤层次 Soil layer	pH (H ₂ O)	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alk. -hydr. N (mg/kg)	全磷 Total P (g/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
0—20 cm	6.5	15.90	0.80	105.5	0.38	6.5	21.1	97.9
20—40 cm	6.0	9.32	0.62	72.3	0.32	5.1	20.0	90.2

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,分为三个区组,共 18 个施肥处理,小区面积为 160 m²。本研究选取其中的 5 个处理:1)CK、2)N、3)NP、4)NPK、5)MNPK。其中,CK 为不施肥对照;M 代表施用有机肥,施肥量为 27 t/(hm²·a)。有机肥为猪厩肥,有机质平均含量 119.6 g/kg,N 5.6 g/kg,P₂O₅ 8.3 g/kg,K₂O 10.9 g/kg。化学氮肥为硫酸铵或尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。种植玉米年份施入的 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别为 120、60 和 60 kg/hm²;大豆年份的 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 30、90 和 90 kg/hm²,其中 1992 年后大豆年份不再施用有机肥。

1.3 供试土壤

供试土壤为 1979 年原始土(CK₀)以及 2009 年秋收后采集的土壤(0—20 cm 和 20—40 cm),土样风干后过 1 mm 筛。

1.4 分析及数据统计

采用连续浸提法结合常规方法测定不同形态钾

的含量。称取 2.00 g(m)土样放入 25 mL 离心管(记取二者质量 m₀)中,先加入 20.0 mL 蒸馏水,150 r/min,振荡 30 min,4000 r/min 离心 5 min,测定上清液 K⁺ 浓度(c₁),然后小心倒掉上清液,记取离心管质量(m₁);沉淀中再加入 0.5 mol/L 中性 CaCl₂ 溶液 20.0 mL,150 r/min,振荡 30 min,4000 r/min 离心 5 min,测定上清液 K⁺ 浓度(c₂),小心倒掉上清液,记取离心管质量(m₂);再往离心管沉淀中加入 1 mol/L 中性 NH₄OAc 溶液 20.0 mL,150 r/min,振荡 30 min,4000 r/min 离心 5 min,测定上清液中的 K⁺ 浓度(c₃)。

另取 2.50 g 土样,用 1 mol/L 热硝酸法,测得酸性钾 Q_酸。

各位点钾含量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} Q_{\text{水}} &= c_1 v_1 / m \\ Q_{\text{p}} &= (c_2 v_2 - c_1 \Delta v_1) / m \\ Q_{\text{e}} &= (c_3 v_3 - c_2 \Delta v_2) / m \\ Q_{\text{i}} &= Q_{\text{酸}} - Q_{\text{水}} - Q_{\text{p}} - Q_{\text{e}} \end{aligned}$$

其中: $\Delta v_1 = (m_1 - m) / \rho_1$, 此处 ρ_1 指蒸馏水密度, 为 1.00 g/mL; $\Delta v_2 = (m_2 - m) / \rho_2$, 此处 ρ_2 指 CaCl_2 溶液密度, 为 1.02 g/L; Q_w 、 Q_p 、 Q_e 和 Q_i 分别代表水溶性钾、p 位钾、e 位钾和 i 位钾含量。

交换性钾和植物钾采用常规方法测定。

钾素表观平衡量 (kg/hm^2) = 投入钾素总量 (kg/hm^2) - 作物吸收钾素总量 (kg/hm^2)

钾素平衡系数 = 投入钾量 (kg/hm^2) / 作物吸收钾量 (kg/hm^2)

采用 SPSS19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥对耕层 (0—20 cm) 土壤矿物吸附位点钾含量的影响

经过 31 年不同施肥处理, 各处理矿物吸附位点钾含量有明显变化 (表 2)。与 1979 年原始土相比, p、e 和 i 位钾含量均表现为 MNPK 处理高于 CK_0 , 但差异不显著; 其他处理 (NPK、NP、N 和 CK) 各位

点钾含量均显著低于 CK_0 。

由表 2 可知, 各处理 p 位钾占全钾的比例很低, 在 0.093% ~ 0.144% 之间。与不施肥 (CK) 相比, MNPK 和 NPK 处理 p 位钾含量显著高于 CK 处理, 分别高出 4.59 mg/kg 和 9.90 mg/kg; 而 N 和 NP 处理低于 CK 处理, NP 处理与 CK 差异达到显著水平。e 位钾占全钾比例为 0.281% ~ 0.339%, 比 p 位钾比例高; 与 CK 相比, MNPK 和 NPK 处理 e 位钾含量显著高于 CK, NP 和 N 低于 CK 处理, 但差异不显著。对于 i 位钾来说, 占全钾比例为 3.381% ~ 3.768%; 与 e 位钾类似, 表现为: MNPK > NPK > CK > N > NP, NP 和 N 与 CK 差异不显著。

以上说明经过 31 年不同施肥处理, 有机肥配施化学钾肥能够维持各位点钾含量, 而单独施用化学钾肥和不施钾土壤中各位点钾含量呈亏缺状态。各位点钾含量表现为: i 位 > e 位 > p 位。与对照相比, 施钾能够提高各位点钾含量和占全钾的比例。

表 2 不同施肥处理耕层 p、e 和 i 位钾含量

Table 2 Contents of K absorbed (p, e and i) on arable layer under different treatments

处理 Treatment	p 位钾 p-site K (mg/kg)	占全钾比例 % of total K (%)	e 位钾 e-site K (mg/kg)	占全钾比例 % of total K (%)	i 位钾 i-site K (mg/kg)	占全钾比例 % of total K (%)
CK	19.19 c	0.099	56.75 c	0.292	660.70 c	3.399
N	18.77 cd	0.097	54.38 c	0.282	652.60 c	3.381
NP	17.65 d	0.093	53.71 c	0.281	645.70 c	3.384
NPK	23.78 b	0.121	59.00 b	0.301	683.40 b	3.483
MNPK	29.09 a	0.144	68.45 a	0.339	761.50 a	3.768
CK_0	28.02 a	0.140	66.81 a	0.332	735.50 a	3.659

注 (Note): CK_0 —1979 年原始土 The original soil of 1979 year. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

2.2 长期不同施肥处理土壤钾素表观平衡状况

由表 3 可知, 在玉米—玉米—大豆轮作、连续 31 年不同施肥条件下, 不施钾肥各处理 (CK、N 和 NP) 均呈表观亏缺状态, 其中 NP 处理钾素亏缺量最大, 为 2301.1 kg/hm^2 。NPK 处理钾素平衡系数为 0.71, 表现为亏缺。尽管 NPK 处理有钾素的投入, 但是钾肥的施入量低于作物吸钾量, 施入的钾仍不能满足作物的钾需求。MNPK 处理钾素投入量高于作物携钾量, 表观平衡系数为 1.82, 土壤钾素呈表观盈余。

2.3 耕层各吸附位点钾的有效性

交换性钾是作物可以直接吸收的有效养分, 其含量是表征土壤钾素供应状况的重要指标之一^[14]。交换性钾与各位点吸附钾的相关分析 (表 4) 显示, 交换性钾与 p 位钾和 e 位钾呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.926* 和 0.886*, 说明 p 位钾和 e 位钾与土壤钾素的有效性有关。另外, 不同位点间钾含量呈极显著正相关关系, 说明各位点吸附的钾也相互影响。相关分析还表明, 植株地上部吸钾量与 p 位钾和 e 位钾含量均呈显著正相关关系 (0.943* 和 0.938*), i 位钾与吸钾量呈极显著正相

关关系(0.963**),说明长期不同施肥条件下,作物量层间钾的释放。
吸钾量与矿物吸附点位钾含量关系密切,并且有大

表 3 长期不同施肥对钾素表观平衡的影响
Table 3 Effect of long-term different fertilization on K balance of soil

处理 Treatment	施钾量 K input (K ₂ O kg/hm ²)	总吸钾量 K uptake (K ₂ O kg/hm ²)	钾表观平衡 K surplus or deficit (K ₂ O kg/hm ²)	钾平衡系数 Index of K balance
CK	0	1774.4	-1774.4	
N	0	2282.9	-2282.9	
NP	0	2301.1	-2301.1	
NPK	2100.0	2950.3	-850.3	0.71
MNPK	9163.2	5038.7	4124.5	1.82

表 4 各位点钾含量与交换性钾及吸钾量之间的相关性(r)
Table 4 Single correlation coefficient among exchangeable K, K uptake and K absorbed by different sites of soil

项目 Item	交换性钾 Ex-K	吸钾量 K uptake	p 位钾 PSK	e 位钾 ESK	i 位钾 ISK
交换性钾 Ex-K	1	0.752	0.926*	0.886*	0.862
吸钾量 K uptake		1	0.943*	0.938*	0.963**
p 位钾 PSK			1	0.975**	0.976**
e 位钾 ESK				1	0.996**
i 位钾 ISK					1

注 (Note): Ex-K—Exchangeable K; PSK—Planar site K; ESK—Edge site K; ISK—Interlayer site K. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著(n=5) Indicated correlation are significant at the 0.05 and 0.01 levels (n=5), respectively.

2.4 长期定位施肥对各位点钾含量剖面分布的影响

由图 1 可以看出,不同施肥处理 p、e 和 i 位钾含量变化趋势基本相同,随着土层的加深,各位点钾含量逐渐降低;与耕层相比,20—40 cm 土层 p 位钾

含量平均降低了 14.45%; e 位钾含量平均降低了 6.73%; i 位钾平均减少了 5.86%。各位点钾均以 MNPK 处理降低最多,p、e 和 i 位钾在 20—40 cm 土层分别较耕层降低了 5.92 mg/kg、5.52 mg/kg 和 56.92 mg/kg。

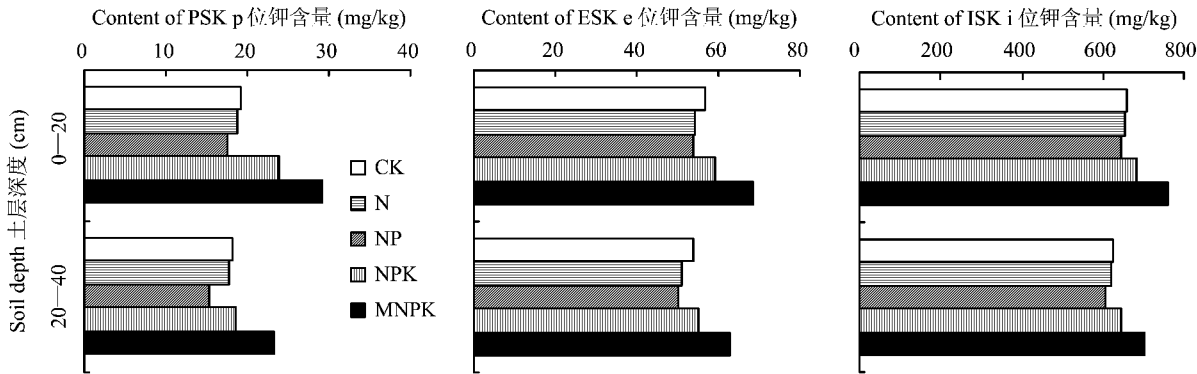


图 1 不同施肥处理 p、e 和 i 位钾的剖面分布(0—40 cm)
Fig.1 Profile distribution of p、e and i sites K under different fertilization
[注 (Note): PSK—Planar site K; ESK—Edge site K; ISK—Interlayer site K.]

3 讨论与结论

土壤中 p 位位于粘粒的外表面,对钾亲和力较弱; e 位处在颗粒边缘或楔形带,其电荷键合钾的能力比 p 位强; i 位是仅在 2:1 型粘土矿物才有的内晶格位置,对 K^+ 显示出较强的亲和力^[5]。

31 年连续施肥后, NP 和 N 处理 p、e 和 i 位点钾含量与 CK 相比降低较多,可能的原因是磷肥中含有较多的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可以交换出 K^+ ; 施入氮肥后,土壤中 NH_4^+ 浓度升高,抑制土壤吸附 K^+ 的作用增强^[15]; 同时氮肥可以促进植物旺盛生长,从土壤中吸钾较多,在没有外源钾素补充的情况下,导致 NP 和 N 处理各位点钾素亏缺量较多。尽管 NPK 处理有钾肥的投入,但施入量低于作物携走量,不能满足作物吸收,因此各位点钾含量也呈亏缺状态。以上表明,长期不施钾或施钾量较低均可导致土壤钾素出现亏缺^[7]。MNPK 处理 p、e 和 i 位钾含量均高于其他施肥处理。同时,结合表 3 可知, MNPK 处理的钾素表观平衡系数大于 1,土壤中钾素呈盈余状态。但也有研究表明,有机肥中钾素的转化率低于化学钾肥^[16],其与化学钾肥对土壤的作用也不尽相同。而 MNPK 处理土壤中的钾素绝大多数来源于有机肥料,这也许是在表观平衡呈盈余状态的情况下, MNPK 处理各吸附位点钾素含量高于 1979 年原始土,但未达到显著性水平的原因之一; 另外,土壤钾素淋失,并逐年积累^[17]也是原因之一。

相关分析表明,交换性钾与 p 位和 e 位钾相关关系显著,说明 p 位和 e 位钾对土壤钾素有效性的贡献较大; 作物地上部吸钾量与 p、e 和 i 位钾均呈显著正相关关系,说明作物吸钾量与矿物吸附位点钾含量关系密切。值得注意的是, i 位钾对植物吸钾也有相当的作用,这是因为土壤中各吸附位点上的钾处于动态平衡之中,植物生长吸收钾素致使土壤中钾平衡发生变化,为维持平衡,迫使高能吸附位点所吸持的钾素释放^[18]。

从剖面分布看, 0—20 cm 土层各位点钾含量高于 20—40 cm 土层,这与刘红霞等^[19]的研究结果一致,可能的原因是作物从较深层中吸收养分,后经残茬在表面释放,致使表层养分含量较高^[20]。与其他处理相比,随土层加深, MNPK 处理各位点钾降低较多,原因在于施用有机肥后植物生长旺盛,根系繁茂,从 20—40 cm 土层中吸收钾量相对较多。另外,在 20—40 cm 土层中,不同处理各位点钾含量表现为施用有机肥处理高于不施有机肥处理,可能的原

因是钾素随有机质下移至 20—40 cm。

总之,在玉米—玉米—大豆轮作制度下,连续 31 年不同施肥后各处理耕层土壤中 p、e 和 i 位钾含量发生了变化,单施化学钾肥或不施钾处理土壤钾素呈表观亏缺,各位点钾含量降低; 有机肥与化学钾肥配合施用土壤钾素表观平衡呈盈余状态,各吸附位点钾含量能够保持在较高水平。p 位钾和 e 位钾与土壤钾素的有效性关系密切; i 位钾对土壤持续供应能力贡献较大,且各吸附位点钾处于动态平衡之中; 在 0—40 cm 剖面中,随土层加深,各吸附位点钾含量降低。

参考文献:

- [1] Mengel K, Kirkby E A. Potassium in crop production[J]. Adv. Agron., 1980, 33: 59-110.
- [2] Goulding K W T. Potassium fixation and release [A]. Methodology in soil research [M]. Baden bei wien: Proceedings of the 20th Colloquium of the International Potash Institute, 1987. 137-154.
- [3] 北京农业大学主编. 农业化学总论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 152-153.
Beijing Agriculture University. Pandect of agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 152-153.
- [4] 芒森 R D(范钦桢, 郑文钦, 等译). 农业中的钾[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 160-161.
Munson R D (Translated by Fan Q Z, Zheng W Q et al.). Potassium in agriculture[M]. Beijing: Science Press, 1995. 160-161.
- [5] Kirkman J H, Basker A, Saurapaneni A. Potassium in the soils of New Zeal. A review[J]. New Zealand J. Agric. Res., 1994, 37 (2): 207-227.
- [6] 黄绍文, 金继运, 王泽良, 程明芳. 主要土壤钾形态及其植物有效性研究[J]. 植物营养与肥科学报, 1998, 4(2): 156-164.
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, Cheng M F. Native potassium forms and plant availability in selected soils from northern China [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 156-164.
- [7] 张会民, 吕家珑, 李菊梅, 等. 长期定位施肥条件下土壤钾素化学研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 155-160.
Zhang H M, Lü J L, Li J M et al. Research progress in soil potassium chemistry under long-term fertilization condition [J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 35(1): 155-160.
- [8] 熊明彪, 舒芬, 宋光煜, 等. 多年定位施肥对紫色土钾素形态变化的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(1): 44-47.
Xiong M B, Shu F, Song G Y et al. The effect of long-term application on the potassium forms in purple soil[J]. J. Sichuan Agric. Univ., 2001, 19(1): 44-47.
- [9] 姚源喜, 刘树堂, 郇恒福. 长期定位施肥对非石灰性潮土钾

- 素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 241-244.
- Yao Y X, Liu S T, Xun H F. Effect of long-term fertilization on the status of potassium in noncalcareous fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(3): 241-244.
- [10] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 何萍. 东北地区黑土、草甸土长期施钾对玉米产量及耕层土钾素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 850-855.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, He P. Effect of long-term K application on corn yield and potassium forms in plough layer of black soil and meadow soil in northeast of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 850-855.
- [11] 柳燕兰, 郝明德, 郭贤仕. 长期定位施肥对旱地黑垆土钾素空间分布及有效性影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 64-68.
- Liu Y L, Hao M D, Guo X S. Effect of long-term fertilization on spatial distribution and availability of soil potassium in the dark loessial soil[J]. J. Soil Water Conserv., 2011, 25(5): 64-68.
- [12] 戴茨华, 王劲松, 徐红, 等. 旱地红壤长期定位施肥养分下移特征及作物产量效应研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(09): 70-74.
- Dai C H, Wang J S, Xu H *et al.* The characteristics of nutrients downward movement and crop yield response on red soil dry lands of a long-term fertilization[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2012, 28(09): 70-74.
- [13] Öbom I, Edwards A C, Hillier S. Quantifying uptake rate of potassium from soil in a long-term grass rotation experiment[J]. Plant Soil, 2010, 335(1/2): 3-19.
- [14] 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 Pedol. Sin., 1993, 30(1): 94-101.
- [15] Chappell M A, Evangelou V P. Influence of added K^+ on inducing ammonium fixation and inhibiting nitrification[J]. Soil Sci., 2000, 165(5): 420-426.
- [16] 周晓芬, 张彦才, 李巧云. 不同供钾源及其用量对钾素营养的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(1): 32-34.
- Zhou X F, Zhang Y C, Li Q Y. Effects of different potassium sources and application amounts on potassium nutrition[J]. Chin. J. Soil Sci., 2001, 32(1): 32-34.
- [17] Olk D C, Cassman K G, Carlson R M. Kinetics of potassium fixation in vermiculitic soils under different moisture regimes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 423-429.
- [18] Zarabi J M. Kinetics of nonexchangeable-potassium release and plant response in some calcareous soils[J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2006, 169(2): 196-204.
- [19] 刘红霞, 韩晓日, 付时丰, 等. 长期定位施肥对棕壤钾素垂直分布状况的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 950-953.
- Liu H X, Han X R, Fu S F *et al.* Effect of long-term located fertilization on potassium vertical distribution in brown soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2006, 37(5): 950-953.
- [20] Mallarino A P, Borges R. Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70: 702-707.