

DOI: 10.11766/trxb201811200543

20 年持续施钾对烤烟/油菜轮作土壤钾素 Q/I 关系的影响*

代 快¹ 李江舟¹ 张立猛¹ 计思贵¹ 龙怀玉^{2†} 徐照丽³ 段玉琪³
杨宇虹^{3†} 卢秀萍³ 焦永鸽¹ 卜令铎¹

(1 云南省烟草公司玉溪市公司/烟草行业病虫害生物防治工程研究中心, 云南玉溪 653100)

(2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

(3 云南省烟草农业科学研究院, 昆明 650031)

摘 要 研究长期施钾下烤烟/油菜轮作土壤钾素供应能力变化特征及其机制, 为农田合理施用钾肥和农业土壤发生发育的研究提供科学依据。烤烟/油菜轮作下选取连续 20 a 烤烟季施钾量 0、187.5 和 375 kg·hm⁻² 处理, 测算其土壤钾素表观平衡 (K_{ab}) 以及土壤钾素容量和强度关系曲线 (Q/I 曲线) 的土壤钾素平衡活度比 (AR_e)、土壤活性钾 (K_L)、非专性活性钾 ($-\Delta K_0$)、专性活性钾 (K_X)、土壤钾位缓冲容量 (PBC)、 K^+ 与 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 交换自由能变 ($-\Delta G$) 等参数, 以及速效钾 (K_{av})、缓效钾 (K_{nex})、 K^+ 饱和度 (K_S)、黏土矿物组分等土壤性质, 分析 Q/I 曲线参数变化及其与土壤理化性质变化之间的关系。结果表明, 经过 20 a 定位试验后, AR_e 在 $0.38 \times 10^{-3} \sim 8.91 \times 10^{-3} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{0.5}$ 之间, $-\Delta K_0$ 在 0.02~0.55 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, K_L 在 1.61~2.16 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, K_X 在 1.06~2.14 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, PBC 在 6.20~7.76 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{-0.5}$ 之间, $-\Delta G$ 在 11.70~19.72 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 之间。持续施钾土壤的 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 较不施钾土壤显著增大, K_L 、 K_X 、PBC、 $-\Delta G$ 较不施钾土壤显著减小。 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 与 K_{av} 、 K_{nex} 、 K_S 、 K_{ab} 呈极显著正相关, K_L 、 K_X 、PBC、 $-\Delta G$ 与 K_{av} 、 K_{nex} 、 K_S 、 K_{ab} 呈极显著负相关。土壤钾素 Q/I 曲线参数彼此之间显著相关。上述指标可被整合成一个主成分指标, 不施钾肥土壤的主成分指标值显著大于施钾肥土壤。施钾肥土壤的活性钾主要保持在黏土矿物晶体的楔形边缘点位, 植物有效性较高, 不施钾肥土壤的活性钾主要保持在黏土矿物晶体的层间点位, 植物有效性降低。不施钾肥土壤的蛭石含量高于施钾土壤, 而伊利石含量小于施钾土壤。综上, 土壤钾素 Q/I 参数 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 、 K_L 、 K_X 、PBC 和 $-\Delta G$ 可作为土壤供钾能力指标, 土壤钾素表观平衡驱动了土壤钾素 Q/I 曲线形状与参数分异、土壤供钾能力分异及土壤黏土矿物变化, 施钾肥量越大、土壤钾素盈余越大, 土壤供钾能力越强。长期钾素亏缺下, 矿物钾转化为专性活性钾的速率大于专性活性钾释放成非专性活性钾的速率。长期钾素亏缺导致伊利石向蛭石转化。

关键词 烤烟/油菜轮作; 长期施钾定位实验; 山原红壤; 钾素 Q/I 关系; 供钾能力

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

钾素是植物必需的大量营养元素, 有些情况下 其需求量甚至超过了氮素。植物所需要的钾素在自

* 中国科协青年人才托举工程项目 (2016QNRC001) 和中国烟草总公司云南省公司科技计划重点项目 (2018530000241018) 资助
Supported by the Young Elite Scientists Sponsorship Program by China Association for Science and Technology (No. 2016QNRC001) and the Key Science and Technology Planning Project of China Tobacco Company Yunnan Branch (No. 2018530000241018)

† 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: hylong@caas.ac.cn; 1799010900@qq.com

作者简介: 代快 (1984—), 女, 湖南常德人, 博士, 主要从事植物营养与施肥技术研究。E-mail: daikuai520@163.com

收稿日期: 2018-11-21; 收到修改稿日期: 2019-03-27; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-04-28

然条件和绝大多数农业生产条件下必须通过根系从土壤中吸收, 准确地评价土壤供钾能力对于农业生产非常重要。自从 Beckett^[1]1964 年提出土壤活性钾容量和强度关系曲线(Q/I 曲线)以来, 国内外众多研究者利用 Q/I 曲线及土壤钾素平衡活度比(AR_e)、土壤活性钾(K_L)、非专性吸附活性钾($-\Delta K_0$)、专性吸附活性钾(K_X)、土壤钾位缓冲容量(PBC)等参数评价土壤供钾能力。Hosseinpur 和 Tadayon^[2]的研究表明, 在伊朗干旱半干旱区的钙质土壤上, AR_e 、 $-\Delta K$ 、 $-\Delta G$ 与大豆的相对产量、钾吸收量呈显著正相关, 较 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc-K}$ 更加有效地指示了土壤供钾能力。Panda 和 Patra^[3]比较了 Q/I 曲线参数与土壤 pH、阳离子交换量(CEC)、质地、有机质含量、交换性钾含量等理化性质的相关性, 认为 AR_e 、 K_L 、PBC 等可作为印度东部滨海盐土钾素植物有效性的指标。张春等^[4]的定位试验表明, AR_e 、 $-\Delta K_0$ 、PBC、 $-\Delta G$ 结合土壤速效钾和缓效钾以及全钾, 可很好地评价土壤供钾能力。Q/I 曲线参数随着环境变化而变化, 其中长期施肥下的 Q/I 曲线备受关注, Islama 等^[5]在双季稻水稻土进行 8 a 连续定位施肥试验后, 发现 AR_e 、 K_L 、 $-\Delta K_0$ 降低了, 而 K_X 未变化。张春等^[4]在中性紫色水稻土进行了 22 a 不同耕作方式的定位试验, 发现各处理的 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 下降了, PBC、 $-\Delta G$ 增加了。Sparks 和 Liebhardt^[6]研究了长期施用钾肥及石灰对砂壤 Q/I 关系的影响, AR_e 、 $-\Delta K_0$ 、 K_X 随着施钾量增加而升高, PBC 随着石灰用量提高而提高, 主要原因是 CEC 随石灰用量增加而增加。在 Ap 土层, 以黏土矿物表层吸附非专性吸附钾为主, 在 Bt 土层以专性吸附钾为主。范钦桢和谢建昌^[7]通过 18 个长期定位试验研究了施钾肥对土壤钾素 Q/I 关系的影响, 结果表明, 长期不施钾土壤的 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 、 K_X 降低, PBC 提高, 土壤对钾的吸附能力增强, PBC 与土壤黏土矿物组成、CEC 等有关。张会民等^[8]研究认为, 在小麦/玉米种植制度下长期施钾 土、潮土和红壤的 AR_e 、 K_L 、 $-\Delta K_0$ 、 K_X 提高。郑圣先等^[9]、刘春生等^[10]分别对湖南省水稻土、山东省主要土壤类型钾素 Q/I 关系进行了研究, 认为施肥影响各种类型土壤钾素 AR_e 值。长期定位施钾也影响了含钾矿物的演变, 林少雯等^[11]在石灰性潮土 39 a 的长期定位施肥试验上发现, 长期施用有机肥水云母含量增加, 绿泥石、高岭石呈现减少趋势, 长期单施氮肥可提高蒙脱石相对含

量。廖育林等^[12]发现稻田 31 a 连续施用钾肥和稻草促进晶格不良伊利石转变为晶格良好伊利石, 促进蛭石向伊利石转化, 增加了伊利石含量。Moterle 等^[13]在 15 a 长期定位试验和温室连续盆栽 11 茬作物的巴西南部土壤上发现, 不施钾肥土壤未检测到伊利石, 非交换性钾(缓效钾)和有效钾减少了, 作物吸钾量和产量也下降了, 而施钾土壤的蛭石含量减少、伊利石含量增加。

目前, 国内外关于长期定位施肥对土壤钾素 Q/I 关系影响已有较多报道^[1-13], 然而, 在云南这种低纬度高海拔高原季风性气候、山原红壤、嗜钾的烤烟与富钾的油菜轮作条件下, 长期不同用量钾肥对土壤钾素 Q/I 关系的影响尚未见报道。研究烤烟/油菜轮作下长期施钾是否影响了基于 Q/I 曲线参数的土壤钾素供应能力, 探讨其变化机制, 可为农田合理施用钾肥和研究农业土壤发生发育提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

云南省烟草农业科学研究院布置的烤烟/油菜一年两熟轮作下的肥料定位试验始于 1998 年, 地点位于玉溪研和试验基地($24^{\circ}14'N$, $102^{\circ}30'E$), 海拔 1 680 m, 年均温 $15.9^{\circ}C$, 年均降水量 918 mm, 雨季(4—9 月)降水量占全年的 79.5%, 年日照时数 2 072 h, 雨季(4—9 月)日照时数占全年的 41%。供试土壤为云南省典型的砂质山原红壤, 质地为砂质黏壤土, 颗粒组成为 2.0~0.2 mm 粒径含量 $270 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.2~0.02 mm 粒径含量 $420 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.02~0.002 mm 粒径含量 $80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、小于 0.002 mm 粒径含量 $230 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。黏土矿物组成主要为高岭石、伊利石、伊利石蒙脱石混层矿物及蛭石。供试土壤基础理化性状: pH6.4, 有机质 $10.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $1.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $6.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效氮 $82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $160.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验地实行烤烟/油菜一年两熟轮作种植制度, 烤烟生育期为 4 月至 9 月, 油菜生育期为 10 月至下一年 4 月。烤烟季设置 $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (K_0)、 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (K_{188})、 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (K_{375}) 3 个不同氧化钾用量

处理, 各处理的氮 (N) 和磷 (P_2O_5) 施用量均为 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 30% 的氮钾肥和全部磷肥作基肥穴施, 其余肥料作追肥于移栽后 20~25 d 穴施。油菜季各处理均基施复合肥 (N:P:K=12:6:24) $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 即每个处理均施用氧化钾 $36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每个处理设 3 次重复, 随机区组排列。烤烟、油菜的田间管理均采用玉溪当地最佳方式。本文中的土壤样品于第 20 茬烤烟采收结束后第二天 (2017 年 8 月 23 日) 采集。

1.2 测定指标与方法

烟叶产量及含钾量测定: 各小区烟叶成熟采收, 采收结束后按照国家标准 (GB2635-1992 烤烟) [14] 进行分级计产, 计算烟叶产量和地上部生物量。分别取烟叶等级中桔三 (C_3F) 及茎秆进行含钾量测定。油菜收获期分小区采集整株样品, 计算地上部和地下部生物量, 分别留样测定含钾量, 其中, 地上部含钾量为混合样品含钾量。采用火焰光度法测定植株含钾量 [15]。

土壤理化性质测定: 烤烟移栽前及收获后采集 0~20 cm 土壤样品。采用常规方法测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾、pH、黏粒含量、交换性钙、交换性镁 [15]。土壤矿物组成参照 SY/T 5163-2010 沉积岩中黏土矿物 X 射线衍射 (XRD) 分析方法 [16] 测定。

土壤钾素表观平衡 (K_{ab}): 土壤钾素表观平衡等于钾素输入 (投入的肥料钾素+轮作初始土体钾) 减去钾素输出 (作物吸收的钾素+轮作结束土体钾), 不考虑干湿沉降、灌溉、淋溶等途径收入或者损失的钾素。

1.3 土壤钾素 Q/I 曲线制作

采用震荡法对烤烟采收结束后土样进行钾素 Q/I 曲线测定 [17], 具体方法如下: 称取过 1 mm 筛土样 9 份, 样品量从 0.1 g 至 3.0 g (0.1、0.15、0.25、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 g), 将土样置于 50 mL 聚丙烯离心管中, 分别加入含 $2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 的不同浓度 KCl ($0\sim 2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$: 0、0.01、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 溶液 25 mL, 离心管加塞在 25°C 下恒温振荡 ($150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 4 h, 静置 24 h, 然后在离心机上离心 ($1500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 5 min 并过滤, 用原子吸收分光光度计 (PinAAcle 900H, PerkinElmer/珀金埃尔默, 美国) 测定平衡溶液中 K、

Ca 和 Mg 的含量。每处理 3 个重复, 每个重复做 2 组平行。

根据 Deby-Huckel 理论 [6, 18] 计算平衡溶液中电解质 K^+ 和 Ca^{2+} 离子的活度系数 (r) 及钾离子的活度比 (AR), 并获得土壤钾素 Q/I 曲线。平衡溶液中钾离子的活度比 (AR), 如下式:

$$\text{AR} = \frac{r_{\text{K}^+} \times C_{\text{K}}}{\sqrt{r_{\text{Ca}^{2+}} \times (C_{\text{Ca}} + C_{\text{Mg}})}} \quad (1)$$

式中, C_{K} 、 C_{Ca} 和 C_{Mg} 分别为平衡溶液 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度; r_{K^+} 和 $r_{\text{Ca}^{2+}}$ 分别为 K^+ 和 Ca^{2+} 在平衡溶液中的活度系数。

平衡前后溶液中钾的浓度差 (ΔK) 由初始溶液和平衡溶液中钾离子的浓度差计算。然后以 AR 为横坐标, 以对应的 ΔK 为纵坐标作图, 就得到一条 Q/I 曲线。典型的 Q/I 曲线应该包含一个直线和一个曲线部分; 直线部分在横轴上的截距是土壤供钾的强度指标, 用 AR_e 表示; 直线部分的延长线在纵轴上的截距 ΔK_0 是土壤供钾的容量指标, 称 ΔK_0 为非专性吸附钾; 直线的斜率表示土壤对钾的缓冲能力, 称为钾位缓冲容量, 用 PBC 表示。直线部分和曲线部分在纵轴上的截距之差表示在土壤矿物特殊吸附位上吸附的钾, 称为土壤专性吸附钾, 用 K_x 表示。土壤活性钾 (K_L) 由非专性吸附钾 ($-\Delta\text{K}_0$) 和专性吸附钾 (K_x) 两部分组成, 由插值法估算而来 [19]。

K 和 Ca+Mg 交换自由能 ($-\Delta\text{G}$) 计算公式如下 [20]:

$$-\Delta\text{G} = \text{RT} \ln \text{AR}_e \quad (2)$$

$-\Delta\text{G}$ 指在标准状态下 (25°C) 等当量的 K 交换等当量的 Ca+Mg 所需要的能量, 是衡量 K 和 Ca+Mg 化学势之差的一个指标, $-\Delta\text{G}$ 值越大, 土壤对 K 的选择性吸附越强, 作物对钾的吸收困难, 从而易出现缺钾, 反之。

1.4 数据处理

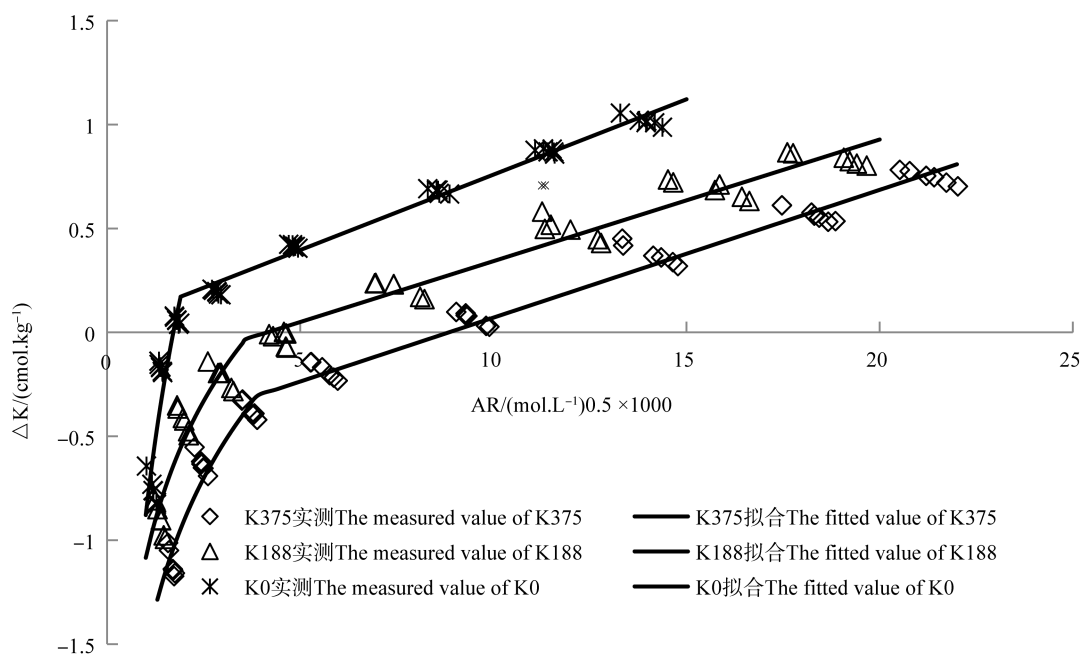
使用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据统计, 使用 SAS V9.4 软件进行单因素方差分析, 用邓肯 (Duncan) 新复极差法分析处理间平均数在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平的差异显著性, 使用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与讨论

2.1 长期施用不同量钾肥的土壤钾素 Q/I 关系曲线

如图 1 所示, 长期不同钾肥用量处理的土壤钾素 Q/I 关系曲线由两部分构成, 右侧表现为直线, 左侧近似地为直线, 属于典型的土壤钾素 Q/I 曲线形状, 右侧直线部分主要代表土壤中带负电荷的、表面吸附力较弱的、非专性吸附点位吸附的钾, 非专性吸附点位主要分布在黏土矿物的表平面, 左侧直线部分代表吸附力较强的专性吸附点位吸附的

钾, 专性吸附点位主要分布在黏土矿物晶层的边缘和楔形位置^[6, 21-22]。从图 1 中可以清楚地看出, 长期连续施用不同量钾肥对土壤钾素 Q/I 曲线的形状产生了明显影响, 施用量最高的 K375 处理的曲线处于最下方、最右边, 不施用钾肥的 K0 处理的曲线处于最上方、最左边, 施用量中等的 K188 处理的曲线处于 K0、K375 曲线的中间。右侧直线部分的斜率表现为 K0 大于 K188 和 K375, 而 K188 和 K375 几乎相同; 左侧直线部分的斜率表现为: K0 > K188 > K375。Q/I 曲线左右两部分的转折点则表现为: K0 < K188 < K375。



注: AR 为钾离子的活度比, ΔK 为平衡前后溶液中钾离子的浓度差。K0、K188、K375 分别表示施钾量为 0、187.5 和 375 kg·hm⁻² 的处理。下同 Note: AR stands for K⁺ activity ratio in solution, and ΔK for variation of the solution before and after equilibrium in K⁺ concentration.

K0, K188, K375 stands for treatments with applications of 0, 187.5 and 375 kg·hm⁻² K fertilizer, and the same below

图 1 长期施用钾肥下土壤钾素 Q/I 曲线

Fig. 1 Effect of long-term potassium application on quantity/intensity (Q/I) curve of soil potassium

2.2 长期施用不同量钾肥的土壤钾素强度性能

在 Beckett 方法中, 平衡溶液中钾离子的活度比 (AR) 是活性钾强度的重要体现。AR 随着溶液中原始钾浓度的减小而减少, 当平衡液原始钾浓度为 0 时, 取得了最小钾离子活度比 (AR_m)。从表 1 中可以看出, 持续 20 a 不同钾肥用量处理后, 土壤 AR_m 产生了显著的分异, 不施钾 K0 处理的 AR_m 仅有 1.00 × 10⁻³ (mol·L⁻¹)^{0.5}, 极显著地小于施钾 187.5 kg·hm⁻² 处理的 1.37 × 10⁻³ (mol·L⁻¹)^{0.5}, 后者又

显著地小于 375 kg·hm⁻² 处理的 1.52 × 10⁻³ (mol·L⁻¹)^{0.5}。

表 1 中, AR_e、- ΔK_0 、PBC、K_L 等是采用经典直线拟合法求算的长期连续施用不同量钾肥的土壤钾素 Q/I 关系参数。从中可以看出, 长期施用不同量钾肥显著地影响了土壤钾素 Q/I 关系参数, 土壤供钾能力的强度指标“土壤钾素平衡活度比 (AR_e)”随着钾肥用量的增加而显著增加, K375 处理和 K188 处理的 AR_e 为 8.91 × 10⁻³、5.22 × 10⁻³ (mol·L⁻¹)^{0.5}, 是 K0 处理的 23.4 倍和 13.7 倍, 施

钾肥处理的钾素供应强度远远大于不施钾肥处理的钾素供应强度。就 AR_e 数值而言, 本文不同钾肥施用量处理 20 a 后的 AR_e , 均明显小于廖育林等^[12]测定的长期施用钾肥或稻草的红壤水稻土的 AR_e , 处于 Hosseinpur 和 Tadayon 等^[2]测试的 14 种石灰性土的中间水平, 与刘春生等^[10]测定的山东省主要土壤的 AR_e 、阮建云等^[23]测定全国 18 个地点茶园土壤的 AR_e 、张春等^[4]测定的中性紫色水稻土原始土及其长期垄作免耕 22 a 后的 AR_e 相比, 本文施钾处理的 AR_e 要较它们大许多倍, 不施钾处理的 AR_e 则要较它们小许多倍。以上说明烤烟/油菜轮作下的云南山原红壤经过 20 a 持续不同施钾肥处理后, 施钾肥处

理土壤的钾素供应强度处于中上水平, 而不施钾肥处理土壤处于低下水平。

Schouwenburg 和 Schuffelen^[22]对土壤钾素 Q/I 关系研究表明, 当 AR_e 大于 $10.0 \times 10^{-3} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{0.5}$ 时, 土壤吸附的钾主要保持在黏土矿物晶体的表平面点位; 当 AR_e 介于 $1.0 \times 10^{-3} \sim 10.0 \times 10^{-3} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{0.5}$ 之间时, 土壤吸附的钾主要保持在黏土矿物晶体边缘的楔形点位; 当 AR_e 小于 $1.0 \times 10^{-3} (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{0.5}$ 时, 土壤吸附的钾主要保持在黏土矿物晶体的层间点位。根据各处理的 AR_e 可知, 施钾土壤吸附的钾主要保持在黏土矿物晶体的边缘点位, 不施钾土壤吸附的钾主要保持在黏土矿物晶体的层间点位。

表 1 施肥 20 a 后土壤钾素 Q/I 曲线参数

Table 1 Parameters of the Q/I curve of soil potassium after 20 yrs of consecutive potassium application

处理 treatments	$AR_e \times 10^{31}$ $/ (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{0.5}$	$K_L^{2)}$ $/ (\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$-\Delta K_0^{3)}$ $/ (\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$K_x^{4)}$ $/ (\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	PBC ^{5)/} (cmol· $\text{kg}^{-1} \cdot (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{-0.5}$)	$-\Delta G^{6)}$ $/ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$AR_m \times 10^{37)}$ $/ (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})^{0.5}$	$-\Delta K_m^{8)}$ $/ (\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1})$
K0	0.38±0.18c	2.16±0.09a	0.02±0.01c	2.14±0.11a	7.76±0.40a	19.72±1.12a	1.00±0.01c	1.26±0.04b
K188	5.22±1.01b	2.05±0.13a	0.33±0.06b	1.72±0.09b	6.48±0.38b	13.05±0.46b	1.37±0.01b	1.69±0.06a
K375	8.91±0.98a	1.61±0.05b	0.55±0.06a	1.06±0.05c	6.20±0.09b	11.70±0.28b	1.52±0.02a	1.72±0.02a

注: 表中数值为平均值±标准差。同一列不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。1) 土壤钾素平衡活度比, 2) 土壤活性钾, 3) 非专性活性钾, 4) 专性活性钾, 5) 土壤钾位缓冲容量, 6) K^+ 与 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 交换自由能变, 7) 单次平衡中最大解吸量, 8) 最小钾离子活度比, 下同 Note: The data in the table are Mean±SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different treatments at $P < 0.05$ level under Duncan test; 1) K equilibrium activity ratio; 2) Soil labile K; 3) Non-specific labile K; 4) Specific labile K; 5) Potential buffering capacity; 6) K and Ca+Mg exchange free energy change; 7) Maximum desorption in a single equilibrium; and 8) Minimum K ion activity ratio, and the same below

2.3 长期施用不同量钾肥的土壤钾素容量性能

在土壤钾素 Q/I 关系中, 土壤钾素容量性能指被土壤吸附或者从土壤上解吸附的土壤活性钾的数量大小, 以 $-\Delta K_0$ 来标识, 当平衡溶液中原始钾浓度比较小时, $-\Delta K_0$ 体现的是土壤钾素解吸附, 当平衡溶液中原始钾浓度为 0 时, 取得单次平衡中最大解吸量 $-\Delta K_m$, 这个指标在一定程度上体现了能被当季作物快速利用的活性钾容量。从表 1 中可以看出, 持续 20 a 不同钾肥用量处理后, 土壤 $-\Delta K_m$ 产生了显著的分异, 不施钾 K0 处理的 $-\Delta K_m$ 仅有 $1.26 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 极显著地小于施钾 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的 $1.69 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.72 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后两者则无显著差异。

当 Q/I 关系中 AR 为 0 时, 取得土壤供钾能力的容量指标土壤活性钾 (K_L), 它代表了土壤—钙镁钾溶液系统中潜在最大土壤钾解吸附量, 由吸附

在黏土矿物表平面上的非专性吸附钾 ($-\Delta K_0$) 和黏土矿物层间与楔形部位的专性吸附钾 (K_x) 两部分组成。表 1 中数据表明, 长期施用不同用量钾肥显著地影响了土壤供钾容量, K_L 、 K_x 随着钾肥用量的增加而显著减少, K0 处理的 K_L 、 K_x 分别为 $2.16 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.14 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 K375 处理的仅有 $1.61 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.06 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, $-\Delta K_0$ 随着钾肥用量的增加而显著增加, K375 处理的 $-\Delta K_0$ 为 $0.55 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, K0 处理的仅有 $0.02 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者将近是后者的 28 倍。本文中施钾肥处理的 $-\Delta K_0$ 略高于 Wani^[24]测定的 10 个典型水稻土及 Panda 和 Patra^[3]所测试 12 个滨海盐土的 $-\Delta K_0$, 较 Hosseinpur 和 Tadayon^[2]测定的 14 个石灰性土壤的 $-\Delta K_0$ 平均值大 3 倍~5 倍, 不施钾肥处理的则要小约 5 倍。以上说明, 连续持续 20 a 处理后, 施钾肥土壤能够维持较高的非专性吸附性钾, 不施钾肥土壤黏土矿物表

平面吸附位上的活性钾几乎全部被消耗掉了。

以上结果与有些文献不同,比如张会民等^[8]的结果是长期施用钾肥的 K_L 、 K_x 、 $-\Delta K_0$ 均较不施肥处理增加了,这主要与求算 K_L 的方法有关,张会民等^[8]以 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 提取钾作为 K_L ,也就是将速效钾作为 K_L ,表 2 数据表明本文速效钾也随着施钾量的增加而显著增加。但是 K_L 与速效钾本质上具有不同的物理内涵,因此与其他许多文献相同,本文以 Q/I 关系左边曲线的拟合直线的截距作为 K_L ,其值为速效钾的 1.9 倍~13.8 倍,而且与速效钾存在极显著负相关(表 3),与有些文献研究结果非常类似,比如 Hamdan 和 Ahmed^[25]的研究结果也表明 K_L 与速效钾存在极显著负相关, K_L 为速效钾的 3.5 倍~13.1 倍。

表 4 表明在 K_0 处理中,土壤钾素呈现为亏缺,前面的分析表明土壤非专性吸附钾已经被消耗殆尽,而且专性吸附钾的数量较钾素盈余土壤的还要多,那么植物所带走的钾素只可能来自土壤矿物钾的释放,从表 3 中可以看出,如果以全钾与 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 煮沸提取钾+速效钾的差值作为矿物钾,那么矿物钾与土壤钾素亏缺之间的相关系数很小,显然与事实不符。如果以全钾与 K_L 的差值作为矿物钾,那么矿物钾与土壤钾素亏缺之间的相关性明显提高,钾素亏缺度越大、矿物钾含量越小。以上说明在云南山原红壤的烤烟/油菜轮作系统中,当土壤钾素出现亏缺时,矿物钾将被逐渐释放为存放于矿物层间的专性吸附钾,而这些专性吸附钾不能立即转化为非专性吸附钾,致使活性钾总量和专性吸附钾逐步增大。

2.4 长期施用不同量钾肥的土壤供钾缓冲能力

土壤钾位缓冲容量(PBC)是指土壤溶液活度比(AR)每变动一个单位时,土壤容量因素 ΔK 的变化量,是衡量土壤保持一定供钾强度的能力指标。PBC 越大则表明土壤维持供钾强度的能力越大。表 1 数据表明长期施钾土壤 PBC 较小, K188 和 K375 处理的 PBC 相差不明显,分别为 $6.48 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1} (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-0.5}$ 和 $6.20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1} (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-0.5}$, K_0 的 PBC 则显著增加至 $7.76 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1} (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-0.5}$,说明经过 20 a 持续不同用量钾肥处理后,不施钾肥土壤的钾素强度缓冲性增强了,容量缓冲性变弱了,而施钾肥土壤则相反。其数值范围,较张春等^[4]、Rupa 等^[21]、Subba 和 Sekhon^[26]的研究结果明显偏

小,与 Hosseinpur 和 Tadayon^[2]测定的 14 个石灰性土壤的 PBC 则相似,这很可能与土壤理化性质有关。

国内外一些研究^[7,27]也发现不施钾处理土壤 PBC 增加,Roux 和 Sumner^[27]报道,长期钾素耗竭,土壤 PBC 增加,尤其在以伊利石为主要黏土矿物但 K^+ 饱和度较低的土壤上增加更多。但也有研究表明,施钾后土壤 PBC 无明显变化^[21, 28],张会民等^[8, 29]研究表明,长期不施钾红壤 PBC 无明显变化,而黑土、中性紫色土、土和潮土的 PBC 则显著增加。通过比较上述文献中土壤 pH 和本文土壤 pH,可发现当土壤酸碱性属于中性或者碱性时($\text{pH}>6.5$),长期不施用钾肥会导致土壤 PBC 增加,土壤属于酸性时,长期不施用钾肥不会导致土壤 PBC 明显变化。

2.5 长期施用不同量钾肥的土壤供钾能量性质

研究表明, $-\Delta G$ 越大,土壤对 K 的选择性吸附越强,作物从土壤中吸收钾困难,从而容易出现缺钾,反之亦然;一般而言,土壤非专性活性钾含量高, $-\Delta G$ 低^[20, 30]。表 1 数据表明,长期不施钾肥处理 K_0 的 $-\Delta G$ 为 $19.72 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,显著地高于长期施钾处理 K188、K375 的 $13.05 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $11.70 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,而 K188 和 K375 处理的 $-\Delta G$ 无明显差别。根据 Woodruff^[20]的研究结果,当土壤 $-\Delta G$ 大于 $14.64 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,容易出现缺钾,而当 $-\Delta G$ 小于 $8.36 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,则可能钾素过多诱发缺钙。由此判断,在烤烟/油菜轮作系统中持续 20 a 不同施钾量处理后,烤烟季不施钾、油菜季 $36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的土壤供钾能力很低、容易出现缺钾;烤烟季施钾 $187.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、油菜季 $36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施钾处理(K188)的土壤供钾能力适中,作物不容易出现缺钾,也不容易出现缺钙;烤烟季施钾 $375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、油菜季 $36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施钾处理(K375)土壤供钾能力很强,作物不会出现缺钾,但可能会诱发缺钙、缺镁。因此,从土壤钾-钙/镁的交换自由能角度看,烤烟/油菜轮作系统中,适宜的钾肥施用量为 $187.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这与段玉琪等^[31]综合分析产质量、土壤酶活性及微生物群落等得到的结论是一致的。

2.6 长期施用不同量钾肥的土壤矿物分异

用 X 射线衍射法获得了不同处理黏土矿物衍射图谱(图 2),图中 14\AA 和 10\AA 的衍射峰分别为蛭石和伊利石衍射峰,可以看出,不施钾 K_0 处理土壤的 14\AA 衍射峰要高于施钾的 K188 和 K375 处理, 10\AA 衍射峰则低于 K188 和 K375 处理,即经过 20 a

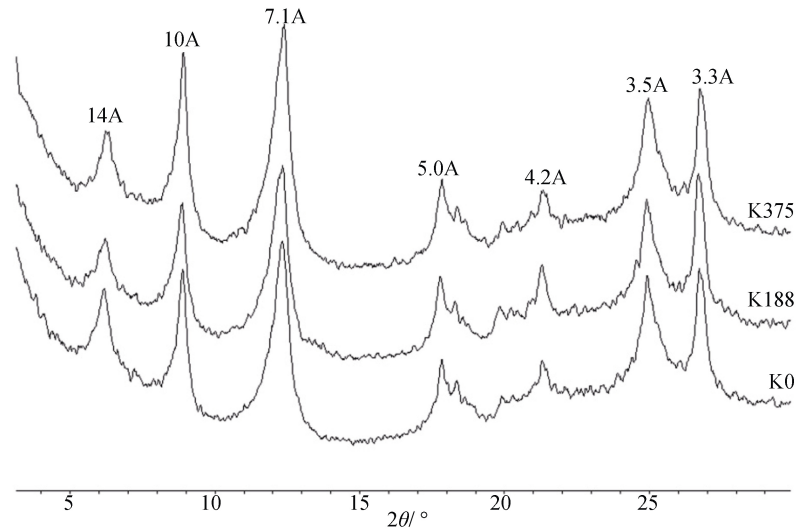


图 2 不同施肥处理土壤黏粒矿物 X-射线衍射 (XRD) 图谱比较

Fig. 2 X-ray diffraction (XRD) pattern of soil clay minerals relative to fertilization treatment

不同施钾量处理, 不施钾肥处理相比施钾肥处理, 土壤中的蛭石增加了, 伊利石减少了。蛭石和伊利石均是 2:1 型的黏土矿物, 伊利石含钾量高, 而蛭石含钾量少。因此, 不同施钾肥处理中伊利石和蛭石的消长变化可能与土壤钾素盈亏状况有关, 从表 4 中可看出, 2017—2018 年烤烟/油菜轮作系统不施钾肥土壤钾素年亏损 $44.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 假设每次轮作时的作物生长发育状况基本相同, 连续 20 a 种植累计亏损约 $661.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 矿物钾逐渐被释放至土壤供作物吸收, 黏土矿物伊利石呈现向蛭石转化的趋势。

廖育林等^[12]的研究表明, 长期施用钾肥或者富含钾的稻草能增加土壤黏粒中伊利石, 促进晶格不良伊利石向晶格良好伊利石转化, 促使蛭石向伊利石转化。Moterle 等^[13]发现 15 a 长期定位试验和温室连续盆栽 11 茬作物后, 不施钾肥土壤未检测到伊利石, 而施钾土壤的蛭石含量减少、伊利石含量增加。本文试验结果结合文献结果, 可以认为土壤中的伊利石和蛭石存在着相互转化, 在钾素亏缺的情况下, 伊利石逐渐转化为蛭石, 在钾素盈余时蛭石逐渐转化为伊利石。

2.7 长期施用不同量钾肥的土壤理化性质分异与 Q/I 曲线参数的关联性

不少研究表明 Q/I 曲线参数与土壤理化性质具有一定的相关性^[3, 25, 32-34], 理论上本文中三种长期施用不同量钾肥处理的初始土壤理化性质是相同的, 在 Q/I 曲线参数发生了显著分异的情况下, 理

论上也仅有那些发生了分异的土壤理化性质才可能与 Q/I 曲线参数具有相关性。从表 3、表 5 中可看出, 经过 20 a 长期施用不同量钾肥后, 土壤 pH、有机质、阳离子交换量、黏粒含量、交换性钙镁含量、全钾含量等指标并未发生显著分异, 它们与 Q/I 曲线所有参数均无显著相关, 而植物可利用的土壤钾素容量有关的速效钾、缓效钾、钾饱和度以及土壤碱解氮发生了显著分异, 其中, 速效钾、缓效钾、钾饱和度等三个指标与土壤钾素平衡活度比 (AR_e)、非专性吸附活性钾 ($-\Delta K_0$) 等两个参数呈极显著正相关, 与活性钾 (K_L)、专性吸附活性钾 (K_x)、土壤钾位缓冲容量 (PBC)、交换自由能 ($-\Delta G$) 等四个参数呈极显著负相关。以上结果有些与文献结果相似, 也有些与其他研究相反, Sailakshmiswari 等^[37]研究表明, AR_e 与土壤 K^+ 饱和度呈显著正相关, PBC 与黏粒含量呈显著正相关, 与土壤 CEC 无显著相关性。Niranjana 等^[33]研究表明, AR_e 与土壤交换性钾含量呈极显著负相关, 而土壤 K_L 、 $-\Delta K_0$ 和 K_x 均与土壤交换性钾含量呈极显著正相关, PBC 与土壤 CEC 含量呈极显著正相关。Hamdan 等^[34]研究得到 AR_e 、 $-\Delta G$ 与土壤交换性钾含量无显著相关关系。胡全才等^[35]则认为, AR_e 不仅取决于该土壤交换性钾含量, 同时由黏粒矿物决定, AR_e 由高到低依次为砖红壤、红壤、土、水稻土、黑土。Hamdan 和 Ahmed^[25]的研究表明, 交换性钾与活性钾、非专性活性钾呈极显著负相关, 与缓冲能力 PBC 呈显著

表 2 第 20 茬烤烟收获后土壤理化性质
Table 2 Soil physical and chemical properties after harvest of the twentieth crop of flue-cured tobacco

处理 Treatments	pH	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Alkalytic nitrogen/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 available K/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Readily available K/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	缓效钾 Non-exchange K/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 Total K/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	交换性钙 Exchange calcium/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	交换性镁 Exchange magnesium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	阳离子交换量 Cation exchange capacity/ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	K^+ 饱和度 K^+ saturation/%
K0	$6.96 \pm 0.05\text{a}$	$10.1 \pm 1.60\text{a}$	$47.9 \pm 10.8\text{b}$	$57.8 \pm 3.5\text{c}$		$171.5 \pm 12.3\text{c}$	$6.1 \pm 0.52\text{a}$	$1\ 362 \pm 103\text{a}$	$204 \pm 21.3\text{a}$	$7.8 \pm 0.3\text{a}$	$1.9 \pm 0.04\ \text{c}$
K188	$6.97 \pm 0.31\text{a}$	$10.2 \pm 1.01\text{a}$	$61.3 \pm 13.2\text{a}$	$234.2 \pm 27.0\text{b}$		$305.1 \pm 20.3\text{b}$	$6.8 \pm 0.42\text{a}$	$1\ 200 \pm 157\text{a}$	$189 \pm 45.2\text{a}$	$7.3 \pm 0.7\text{a}$	$8.6 \pm 1.5\text{b}$
K375	$7.04 \pm 0.21\text{a}$	$10.9 \pm 1.85\text{a}$	$63.9 \pm 11.1\text{a}$	$345.1 \pm 14.9\text{a}$		$360.4 \pm 28.8\text{a}$	$6.9 \pm 0.42\ \text{a}$	$1\ 217 \pm 216\text{a}$	$169 \pm 21.4\text{a}$	$8.2 \pm 1.2\text{a}$	$10.5 \pm 1.9\text{a}$

表 3 土壤钾素 Q/I 参数和不同形态钾素的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between soil potassium Q/I parameters with forms of soil potassium

	AR _e	PBC	-ΔG	K _L	-ΔK ₀	K _x	T _K ¹⁾	K _{nex} ²⁾	K _{av} ³⁾	L _{Ka} ⁴⁾	L _{Kb} ⁵⁾	K _{ab} ⁶⁾
AR _e	1	-0.897**	-0.945**	-0.823**	0.999**	-0.947**	0.576	0.965**	0.987**	0.315	0.648*	0.957**
PBC		1	0.892**	0.618	-0.889**	0.779**	-0.346	-0.865**	-0.924**	-0.071	-0.408	-0.824**
-ΔG			1	0.716*	-0.953**	0.865**	-0.633*	-0.928**	-0.976**	-0.391	-0.683*	-0.823**
K _L				1	-0.824**	0.961**	-0.560	-0.789**	-0.781**	-0.369	-0.660*	-0.890**
-ΔK ₀					1	-0.949**	0.603	0.964**	0.990**	0.346	0.672*	0.948**
K _x						1	-0.607	-0.911**	-0.919**	-0.375	-0.697*	-0.960**
T _K							1	0.616	0.612	0.956**	0.992**	0.450
K _{nex}								1	0.953**	0.365	0.679*	0.909**
K _{av}									1	0.356	0.674*	0.910**
L _{Ka}										1	0.923	0.192
L _{Kb}											1	0.544
K _{ab}												1

注: 1) 全钾, 2) 缓效钾, 3) 速效钾, 4) 是用全钾减去速效钾和缓效钾所得到的矿物钾, 5) 是用全钾减去活性钾所得到的矿物钾, 6) 土壤钾素表观平衡

Note: 1) Total K; 2) Slowly available K; 3) Readily available K; 4) Mineral potassium obtained by subtracting readily available potassium and slowly available potassium from total potassium; 5) Mineral potassium obtained by subtracting labile potassium from total potassium; and 6) Apparent balance of potassium in soil

表 4 第 20 次轮作时的土壤钾素表观平衡

Table 4 Apparent balance of soil potassium during the twentieth tobacco-rape rotation (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	烤烟季 In flue-cured tobacco growing period			油菜季 In rape growing period			第 20 茬烤烟/油菜系统 The 20th tobacco/rape rotation system
	烤烟移栽前 0~20cm 土体速效钾 ^①	钾肥 投入 ^②	作物带走 ^③	油菜收获后 0~20cm 土体速效钾 ^④	钾肥 投入 ^②	作物带走 ^③	钾素表观平衡 ^⑤
	K0	176.4±9.8c	0	16.5±0.5c	173.0±4.6c	36	67.4±15.5b
K188	661.4±16.4b	188	73.5±8.6b	666.0±20.5b	36	123.2±1.9a	22.6±5.9b
K375	937.3±31.2a	375	107.6±10.6a	964.6±28.9a	36	137.7±25.7a	138.4±21.3a

① Readily available K in the 0-20cm soil layer before flue-cured tobacco transplanted; ② K input via fertilization; ③ K removal by tobacco; ④ Readily available K in the 0-20cm soil layer after rape harvested; and ⑤ K apparent balance (K_{ab})

负相关。而 Hosseinpur 和 Tadayon 等^[2]的研究表明交换性钾与所有 Q/I 参数均无相关性。以上结果说明, 土壤 Q/I 参数与土壤性质的相关性因为土壤条件、气候条件、生产条件的不同而变化。

土壤 pH、有机质、阳离子交换量、黏粒含量等指标与 Q/I 曲线参数在本试验中无相关性, 而在一些文献中具有相关性, 两者并不矛盾, 文献中的研

究采用的是不同土壤, 土壤 pH、有机质、阳离子交换量、黏粒含量等有着明显不同, 它们对 Q/I 曲线参数的影响可以在相关性分析中体现出来, 而本文的土壤原本是同种土壤, 即使经过 20 a 的不同钾肥处理, 以上土壤性质也未产生明显的分异, 使得其对 Q/I 曲线参数的影响无法在相关性分析中体现出来。同时, 以上结果也说明在烤烟/油菜轮作系统中,

表 5 土壤钾素 Q/I 参数与土壤性质的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between soil potassium Q/I parameters and soil properties

	AR _e	PBC	-ΔG	K _L	-ΔK ₀	K _x
pH 值 pH value	0.090	0.238	0.066	-0.251	0.105	-0.191
有机质 Organic matter	0.246	0.018	-0.281	-0.335	0.263	-0.316
碱解氮 Alkalytic nitrogen	0.158	-0.236	-0.119	-0.407	0.164	-0.308
有效磷 Available phosphorus	-0.245	0.177	0.245	0.401	-0.260	0.351
K ⁺ 饱和度 K ⁺ saturation degree	0.962**	-0.939**	-0.961**	-0.680*	0.960**	-0.848**
全氮 Total nitrogen	0.065	0.163	-0.140	0.036	0.087	-0.022
全磷 Total phosphorus	0.015	0.113	-0.078	-0.461	0.036	-0.275
交换性钙 Exchange calcium	-0.268	0.489	0.346	0.216	-0.264	0.250
交换性镁 Exchange magnesim	-0.434	0.647*	0.391	0.344	-0.403	0.389
阳离子交换量 Cation exchange capacity	0.073	0.151	-0.033	-0.431	0.097	-0.288

注: $n=9$, $r_{0.05}=0.632$, *代表 $P<0.05$ 水平显著, $r_{0.01}=0.765$, **代表 $P<0.01$ 水平显著。下同 Note: $n=9$, $r_{0.05}=0.632$, * represents significanc

土壤钾素 Q/I 曲线参数分异的原因并不是土壤 pH、有机质、阳离子交换量、黏粒含量等理化性质的变化, 而是土壤钾素盈亏状况, 结合表 3 和表 4 可以看出, 土壤钾素亏缺导致 K_L 、 K_x 、PBC、 $-\Delta G$ 变大, 而 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 变小, 土壤钾素盈余则相反。

2.8 土壤钾素 Q/I 曲线参数之间的关联性

从表 3 可以看出, 土壤钾素 Q/I 曲线参数彼此之间存在显著的相关性, 而所有指标均与速效钾、缓效钾、钾素平衡存在极显著相关, 速效钾、缓效钾是被广泛认可的土壤供钾指标, 即所有的土壤钾素 Q/I 曲线参数均可作为评价土壤供钾能力的指标。因子分析表明, 以上 6 个土壤钾素 Q/I 曲线参数可以用一个主成分 (K_{PC}) 来表达 (特征值为 5.37, 累积方差占比为 89.4%), 表达式为:

$$K_{PC} = -0.991 \times (-\Delta K_0) + 0.970 \times K_x + 0.870 \times K_L - 0.991 \times AR_e + 0.896 \times PBC + 0.949 \times (-\Delta G) \quad (3)$$

将根据式 (3) 计算出的不同施钾量处理的 K_{PC} 与速效钾 (K_{av})、缓效钾 (K_{nex})、钾素表观平衡 (K_{ab}) 进行关联分析发现, K_{PC} 与 K_{av} 、 K_{nex} 、 K_{ab} 之间存在极显著的直线回归方程, 如下:

$$K_{PC} = -25.83 \times K_{av} + 26.16, R^2 = 0.989^{**}, n=9 \quad (4)$$

$$K_{PC} = -39.82 \times K_{nex} + 35.90, R^2 = 0.9258^{**}, n=9 \quad (5)$$

$$K_{PC} = -0.0693 \times K_{ab} + 16.11, R^2 = 0.8414^{**}, n=9 \quad (6)$$

式 (4)、式 (5) 表明, 土壤钾素 Q/I 曲线参数的主成分 K_{PC} 的确可作为土壤供钾综合指标, 而且 K_{PC} 的值越大, 土壤供钾能力越小。式 (6) 表明土壤综合供钾能力指标 K_{PC} 与土壤钾素表观平衡 (K_{ab}) 呈显著负相关, 说明土壤钾素表观平衡驱动了土壤综合供钾能力变化, 土壤钾素盈余时土壤综合供钾能力变强, 土壤钾素亏缺时土壤综合供钾能力变弱。

将不同施钾量处理的 K_{PC} 进行统计分析, 可以发现 K375 处理的 K_{PC} (4.21 ± 1.28) 极显著地小于 K188 处理的 (10.39 ± 1.36), 后者又极显著地小于 K0 处理 (22.35 ± 1.35)。以上说明, 长期连续施用不同量钾肥, 造成了土壤综合供钾能力分异, 施钾量越大, 综合供钾能力越大。

3 结 论

长期连续施用不同量钾肥对土壤钾素 Q/I 曲线的形状产生了明显影响, 钾肥施用量越高, Q/I 曲线越往右下方移动。土壤钾素 Q/I 曲线参数发生了显著分异, 钾肥施用量越高, AR_e 和 $-\Delta K_0$ 越大, K_L 、 K_x 、PBC 和 $-\Delta G$ 越小。本试验条件下, 土壤钾素表观平衡驱动了土壤钾素 Q/I 曲线参数分异。长期土壤钾素亏缺状况下, 矿物表面吸附钾几乎被消耗殆尽, 导致矿物钾素转化为专性吸附活性钾, 其转化

速率要大于专性吸附活性钾转化为非专性活性钾的速率, 且伊利石产生了向蛭石转化的趋势。在长期钾素盈余下, 蛭石产生了向伊利石转化的趋势。Q/I 曲线参数 AR_e 、 $-\Delta K_0$ 、PBC、 K_L 、 K_x 、 $-\Delta G$ 等均可作为砂质山原红壤供钾能力评价指标, 这些指标可被整合成一个综合指标。土壤钾素盈亏驱动了土壤综合供钾能力的分异, 土壤钾素盈余时土壤综合供钾能力增强, 反之亦然。在云南山原红壤烤烟/油菜轮作的条件下, 长期不施用钾肥, 植物将缺钾, 长期施用 $187.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 钾肥较为适宜。

参 考 文 献

- [1] Beckett P H T. Studies on soil potassium. The immediate Q/I relation of labile potassium in the soil. *Journal of Soil Science*, 1964, 15 (1): 9—23
- [2] Hosseinpur A R, Tadayon M R. Potassium quantity-intensity parameters and their correlation with bean plant indices in some calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44 (9): 1480—1488
- [3] Panda R, Patra S K. Quantity-intensity relations of potassium in representative coastal soils of eastern India. *Geoderma*, 2018, 332: 198—206
- [4] 张春, 郭涛, 杨济妮, 等. 不同耕作方式对土壤钾素容量和强度关系的影响. *山地农业生物学报*, 2014, 33 (6): 21—27
Zhang C, Guo T, Yang J N, et al. Effects of the different tillage methods on potassium quantity-intensity relationship in soil (In Chinese). *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2014, 33 (6): 21—27
- [5] Islama A, Karimb A J M S, Solaimanb A R M, et al. Eight-year long potassium fertilization effects on quantity-intensity relationship of soil potassium under double rice cropping. *Soil and Tillage Research*, 2017, 169: 99—117
- [6] Sparks D L, Liebhart W C. Effect of long-term lime and potassium applications on quantity-intensity (Q/I) relationships in sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45 (4): 786—790
- [7] 范钦楨, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变. *土壤学报*, 2005, 42 (4): 591—599
Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long term stationary experiment (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (4): 591—599
- [8] 张会民, 徐明岗, 王伯仁, 等. 小麦—玉米种植制度下长期施钾对土壤钾素 Q/I 关系的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (4): 843—849
Zhang H M, Xu M G, Wang B R, et al. Effects of long-term potassium application on Q/I relationship of potassium in soil under wheat-corn cropping system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (4): 843—849
- [9] 郑圣先, 李明德, 戴平安, 等. 湖南省主要旱地土壤供钾能力的研究. *中国农业科学*, 1995, 28 (2): 43—50
Zheng S X, Li M D, Dai P A, et al. Potassium supplying capacity of main upland soil in Hunan Province (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 1995, 28 (2): 43—50
- [10] 刘春生, 曹正梅, 邱燕, 等. 山东省主要土壤钾素 Q/I 关系的研究. *山东农业大学学报*, 1997, 28 (4): 453—459
Liu C S, Cao Z M, Qiu Y, et al. Q/I relations of potassium of main soils in Shandong Province (In Chinese). *Journal of Shandong Agricultural University*, 1997, 28 (4): 453—459
- [11] 林少雯, 陈延玲, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对潮土土壤粘土矿物影响的研究. *华北农学报*, 2017, 32 (4): 142—147
Lin S W, Chen Y L, Liu S T, et al. Effect of long term fertilization on soil clay minerals in soil (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 2017, 32 (4): 142—147
- [12] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 长期施用钾肥和稻草对红壤双季稻田土壤供钾能力的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (2): 456—467
Liao Y L, Lu Y H, Xie J, et al. Effects of long-term application of chemical potassium fertilizer and incorporation of rice straw on potassium supplying capacity of red soil in double cropping paddy field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2): 456—467
- [13] Moterle D F, Kaminski J, Rheinheimer D S, et al. Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. *Plant and Soil*, 2016, 406: 157—172
- [14] 国家烟草专卖局. GB2635-1992 烤烟. 北京: 中国标准出版社, 1992
State Tobacco Monopoly Administration. GB2635-1992 Flue-cured tobacco (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1992
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and agro-chemical analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [16] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析. 北京: 海洋出版社, 1990
Zhao X Y, Zhang Y Y. Clay minerals and clay minerals analysis (In Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1990
- [17] Rupa T R, Srivastava S, Swarup A, et al. Potassium supplying power of a typic ustochrept profile using quantity-intensity technique in a long-term fertilized plot. *Journal of Agricultural Science*, 2001, 137: 195—203
- [18] Moore W J. Physical chemistry. 4th ed. Englewood Cliffs N J: Prentice-Hall Co, 1972

- [19] Evangelou V P, Blevins R L. Effect of long-term tillage systems and nitrogen addition on potassium quantity-intensity relationship. *Soil Science Society of American Journal*, 1988, 52: 1047—1054
- [20] Woodruff C M. The energies of replacement of calcium by potassium in soils. *Proceeding of Soil Science Society of American*, 1955, 19: 167—171
- [21] Rupa T R, Srivastava S, Swarup A, et al. The availability of potassium in Aeris Haplaquept and Typic Haplustert as affected by long-term cropping, fertilization and manuring. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65: 1—11
- [22] Schouwenburg J C V, Schuffelen A C. Potassium-exchange behavior of an illite. *Netherlands Journal of Agriculture Science*, 1963, 11: 13—22
- [23] 阮建云, 吴洵, Hardter R. 茶园土壤钾素容量/强度关系及施用钾镁肥的影响. *茶叶科学*, 1996, 16 (2): 93—98
Ruan J Y, Wu X, Hardter R. Potassium quantity-intensity relationship (Q / I) in tea soils and the influence of potassium and magnesium application on it (In Chinese). *Journal of Tea Sciences*, 1996, 16 (2): 93—98
- [24] Wani M A. Potassium buffering characteristics of ten typical rice soils of Lesser Himalayas. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59 (1): 61—70
- [25] Hamdan J, Ahmed O H. Potassium dynamics of a forest soil developed on a weathered schist regolith. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59 (4): 593—602
- [26] Subba R A, Sekhon G S. Potassium availability as measured by Q/I relations in soils differing in mineralogy and texture. *Agrochimica*, 1990, 34 (1/2): 59—68
- [27] Roux J L, Sumner M E. Labile potassium in soils. I. Factors affecting the quantity-intensity (Q/I) parameters. *Soil Science*, 1968, 106 (1): 35—41
- [28] Horra A M D L, Efron D, Jimenez M P, et al. Effect of potassium fertilizers on quantity-intensity parameters on some Argentine soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29 (5/6): 671—680
- [29] 张会民, 徐明岗. 长期施肥土壤钾素演变. 北京: 中国农业出版社, 2008
Zhang H M, Xu M G. Evolution of potassium in soils of China under long-term fertilization (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2008
- [30] Roy H K, Kumar A, Sarkar A K. Quantity-intensity relations of potassium in a representative acid sedentary soil of Ranchi. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 1991, 39: 175—177
- [31] 段玉琪, 杨宇虹, 晋艳, 等. 长期施钾肥对烤烟产质量和土壤理化性状的影响. *贵州农业科学*, 2015, 43 (9): 100—104
Duan Y Q, Yang Y H, Jin Y, et al. Effect of long term potassium application on yield and quantity of tobacco and soil physical and chemical properties (In Chinese). *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43 (9): 100—104
- [32] Sailakshmiswari Y, Subba R A, Pillai R N. Quantity and intensity parameters of potassium in texturally different Alluvial soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 1986, 34: 185—186
- [33] Niranjana K S, Srinivasamurthy C A, Ramegowda M, et al. Quantity-intensity (Q/I) relationship in selected soil series of southern Karnataka. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 2000, 48 (2): 228—233
- [34] Hamdan J, Burnham C P, Ruhana B. Evaluation of quantity-intensity relationships of potassium in deeply weathered soil profile developed over granite from peninsular Malaysia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30 (17/18): 2311—2321
- [35] 胡全才, 卢朝东, Syers J K. 我国不同土壤 Q/I 特性及其供钾能力研究. *山西农业科学*, 2000, 28 (1): 35—39
Hu Q C, Lu C D, Syers J K. Study Q/I characteristics and K-supplying power in different Chinese soils (In Chinese). *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2000, 28 (1): 35—39

Effects of 20 Consecutive Years of Potassium Application on Soil Potassium Quantity-Intensity (Q/I) Relationship in Flue-cured Tobacco-rape Rotation System

DAI Kuai¹ LI Jiangzhou¹ ZHANG Limeng¹ JI Sigui¹ LONG Huaiyu^{2†} XU Zhaoli³ DUAN Yuqi³
YANG Yuhong^{3†} LU Xiuping³ JIAO Yongge¹ BU Lingduo¹

(1 Yunnan Tobacco Company Yuxi Branch/Biological Control of Tobacco Diseases and Insect Pests Engineering Research Center Of China, Yuxi, Yunnan 653100, China)

(2 Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(3 Yunnan Tobacco Agriculture Research Institute, Kunming 650031, China)

Abstract 【Objective】 This study was to explore effect of long-term potassium application on soil potassium supplying capacity, so as to provide certain scientific basis for rationalizing potassium application and continuing research on development of agricultural soil. 【Method】 From a long term potassium fertilization experiment on a tobacco-rape rotation system, which was designed to have 0, 187.5 or 375 kg·hm⁻² K₂O applied to flue-cured tobacco and 36 kg·hm⁻² to rape, soil samples were collected for analysis of apparent balance and Quantity-Intensity (Q/I) of soil potassium, and relevant parameters, i.e. K equilibrium activity ratio (AR_e), soil labile K(K_L), non-specific labile K(-ΔK₀) and specific labile K(K_X), potential buffering capacity (PBC), K and Ca+Mg exchange free energy change(-ΔG), and soil properties, like readily available K(K_{av}), slowly available K (K_{nex}), K saturation degree (K_S), clay minerals components and so on, and moreover, relationships between Q/I parameters and soil properties in the flue-cured tobacco-rape cropping system. 【Result】 Results show that after 20 years of the stationary experiment, AR_e varied in the range of 0.38×10⁻³~8.91×10⁻³(mol·L⁻¹)^{0.5}, -ΔK₀ of 0.02~0.55 cmol·kg⁻¹, K_L of 1.61~2.16 cmol·kg⁻¹, K_X of 1.06-2.14 cmol·kg⁻¹, PBC of 6.20~7.76 cmol·kg⁻¹(mol·L⁻¹)^{-0.5}, and -ΔG of 11.70~19.72 kJ·mol⁻¹. Obviously K application enhanced both AR_e and -ΔK₀, but reduced K_L, K_X, PBC, and -ΔG. K_{av}, K_{nex}, K_S and K_{ab} were extre-significantly and positively correlated with AR_e and -ΔK₀, but negatively with K_L, K_X, PBC and -ΔG. Significant relationships were observed between the parameters of the Q/I curve of soil K, and these parameters could be integrated into a principal component index, which was significantly lower in K application treatments than in no K application treatments. Soil potassium was retained mainly interlamarily in clay mineral crystals and lower in bio-availability in the soils with no K applied, but on edges of the clay mineral crystals and higher in bio-availability in the soils applied with K. Hence, the soils with no K applied were higher in vermiculite content, but lower in illite content than the soils with K applied. 【Conclusion】 All the Q/I curve parameters, such as AR_e, ΔK₀, K_L, K_X, PBC, -ΔG, can be used as indicators for evaluation of soil potassium supply capacity. Apparent balance of soil potassium is a major factor driving changes in K Q/I curve shape and differentiation of its parameters, variation of potassium supply capacity and evolution of soil minerals. The higher the K application rate, the higher the soil potassium surplus and the higher the soil supply capacity. In the soils under long term potassium deficiency, mineral potassium transforms into specific labile K at a higher rate than specific labile K does into non-specific labile K. Long-term potassium deficiency causes transformation of illite into vermiculite.

Key words Flue-cured tobacco/rape rotation; Long-term stationary experiment of potassium application; Mountain red soil; Potassium Q/I relationship; Potassium supply capacity

(责任编辑：陈荣府)