土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202404290178 CSTR: 32215.14.trxb202404290178

胡聪月，韩光中，杨金玲.两种典型水稻土在发生过程中不同形态钾转化阈值的演变特征和影响因素[J].土壤学报，2024，

Evolution Characteristics of the Conversion Threshold of Different Potassium Forms in Two Typical Paddy Soils.[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,

两种典型水稻土在发生过程中不同形态钾转化阈值的演变特征和影响因素*

胡聪月[1]， 韩光中[2†]， 杨金玲[3]

（1.聊城大学地理与环境学院，山东聊城 252000；2.内江师范学院地理与资源科学学院，四川内江 641112；3.土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008)

摘 要：由于水稻土中的富钾矿物具有独特的释钾机制，在未来的农业生产中要对水稻土矿物钾给予足够的重视。但水稻土发生过程中不同形态钾转化阈值的演变特征和影响因素尚缺乏系统研究，这大大限制了水稻土矿物钾转化模型的建立与发展。为此，本研究选取“富钾”的紫色水稻土和“贫钾”的红壤性水稻土，通过时间序列，研究其发生过程中不同形态钾（包括水溶态钾：WK；交换性钾：EK；非交换性钾：NEK；矿物钾：MK）转化阈值的演变特征和影响因素，以期为降低稻田对可溶性钾肥的依赖提供理论支撑。结果表明，对“富钾”的紫色水稻土而言，传统稻作在 0～20 a 之内能引起耕作层 WK 和 EK 总量明显降低（约降低 28%），之后 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值相对稳定于 61±4 和 106±9 mg·kg^{-1}之间。对“贫钾”的红壤性水稻土而言，WK 和 EK 的总量在 0～100 a 之内也会大幅度降低并达到很低的水平（约降低 30%），之后 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值相对稳定于 32±4 和 64±4 mg·kg^{-1}之间。在水稻土发生过程中，水稻土钾赋存形态和转化阈值与黏粒和粉粒中的富钾矿物密切相关。层状硅酸盐富钾矿物的释钾机制可以在“富钾”的水稻土发生过程中长期保持稳定。对红壤性水稻土尤其是种稻超过 200 a 的红壤性水稻土而言，有必要以可持续和钾平衡的方式增加其钾肥的投入，避免农田出现负钾平衡。在稻田中使用富含层状硅酸盐富钾矿物的粉屑作为传统钾肥的替代品具有巨大潜力。

关键词：水稻土；不同形态钾；转化阈值；演变特征

中图分类号： S158.5 **文献标志码**： A

Evolution Characteristics of the Conversion Threshold of Different Potassium Forms in Two Typical Paddy Soils

HU Congyue[1]， HAN Guangzhong[2†]， YANG Jinling[3]

(1. School of Geography and the Environment, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, *China;*2. *College of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan* 641112, *China;*3. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing,* 210008, *China*)

*科技基础资源调查专项（2022FY100202）资助 Supported by the Science & Technology Fundamental Resources Investigation Program (No. 2022FY100202)

†通讯作者 Corresponding author: hanguangzhong@163.com

作者简介：胡聪月（1995-），女，四川自贡人，硕士研究生，主要从事养分循环、湿地生态研究。E-mail: congyuehu@163.com

收稿日期：2024-08-06；收到修改稿日期：2024-10-06；网络首发日期（www.cnki.net）：

Abstract:【Objective】In the past few decades, soil potassium has received less attention than nitrogen and phosphorus, despite that potassium loss in farmland is a common issue due to large crop demand and the relatively small application amount. Soluble potassium resources are relatively unabundant in China. The low self-sufficiency rate and high reliance on imports led to the high cost of potassium fertilizers. Due to the importance of potassium in crop production and the cost and environmental consequences of applying potassium fertilizer, it is worth paying attention to mineral potassium in future agricultural production. It has been found that there is a unique potassium release mechanisms of layered silicate potassium-rich minerals in paddy soils. However, there is currently a lack of systematic research on the changes and influencing factors of different potassium transformation thresholds during the formation of paddy soils, which greatly limits the establishment and development of potassium transformation models for these soils. 【Method】This study selected "potassium-rich" purple paddy soil and "potassium-poor" red paddy soil, and investigated the evolution characteristics and influencing factors of different potassium transformation thresholds during their formation through time series analysis. The aim was to provide theoretical support for reducing the dependence on soluble potassium fertilizers in rice fields. 【Result】 For "potassium-rich" purple paddy soil, traditional rice cultivation in the early stages (within 0-20 years) significantly reduced the total amount of water-soluble potassium and exchangeable potassium in the plow layer (about a 28% decrease). After this period, the transformation thresholds between water-soluble potassium and exchangeable potassium, and between exchangeable potassium and non-exchangeable potassium, remained relatively stable, with thresholds stabilizing between 61±4 and 106±9 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. For "potassium-poor" red paddy soil, the total amount of water-soluble potassium and exchangeable potassium also decreased significantly in the early stages of rice cultivation (within 0-100 years), reaching very low levels (about a 30% decrease). Subsequently, the transformation thresholds between water-soluble potassium and exchangeable potassium, and between exchangeable potassium and non-exchangeable potassium, stabilized, with thresholds remaining between 32±4 and 64±4 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. 【Conclusion】During the formation of paddy soils, the potassium forms and transformation thresholds in these soils are closely related to the potassium-rich minerals in clay and silt particles. The potassium release mechanisms of layered silicate potassium-rich minerals can remain stable over a long period during the formation of "potassium-rich" paddy soils. For red paddy soils, especially those with over 200 years of rice cultivation, it is necessary to increase potassium fertilizer input in a sustainable and potassium-balanced manner to avoid negative potassium balance in the fields. There is great potential in using gravel-rich layered silicate potassium minerals as an alternative to traditional potassium fertilizers in paddy fields.

Key words: Paddy soils; Different potassium forms; Conversion threshold; Evolution characteristic

在过去的几十年里，土壤钾研究所受的关注要远低于氮和磷[1-2]。与氮肥和磷肥大量施用相比，钾肥因供应量少、成本高而在农业生产中相对较少施用，导致部分地区农田钾素逐年亏损[1-3]。在集约化农业条件下，土壤钾耗竭与养分失衡是导致养分利用效率低、作物产量停滞乃至减产的重要原因之一[4-5]。研究表明，我国南方 75%的稻田正面临钾素缺乏的状况[6-7]。尽管如此，我国稻田钾肥施用量仍远低于氮肥和磷肥，从而进一步加剧土壤钾素亏缺和养分失衡。这主要是由于我国可溶性钾肥自给率低且主要依赖于进口致使钾肥施用成本高导致的。然而在当前错综复杂的国际形势下，过分依靠国际钾肥市场不但会大大增加农业成本，也关乎我国粮食安全。因此，降低我国稻田对可溶性钾肥的依赖十分必要。

水稻土的发生过程以人为淹水稻作和周期性氧化还原过程为特征。人为淹水的水分状况使土壤的物理、化学、生物学和矿物学性质均会发生显著的变化，这些变化会改变土壤组分的化学行为[8-10]，并对土壤矿物钾的转化和释放产生重要影响[11-12]。最近的长期定位实验研究表明淹水还原条件下 Fe^{2+}、Ca^{2+}等阳离子与层状硅酸盐矿物层间钾的置换和还原氧化交替驱动了紫色水稻土矿物钾的转化和释放，并对水溶性钾（WK）、交换性钾（EK）和非交换性钾（NEK）有快速且较稳定的补给[13]。紫色水稻土在没有秸秆还田且 40 a 高强度稻麦轮作和不施钾肥的情况下，其释放的钾仍能在氮肥和磷肥充足的前提下满足作物高强度种植的生长需求[13]。这说明在未来农业生产中要对水稻土矿物钾给予足够的重视。尽管如此，水稻土发生过程中不同形态钾转化阈值的演变特征和影响因素当前还缺乏系统研究，这大大限制了水稻土矿物钾转化模型的建立与发展。紫色水稻土起源于紫色土，富含富钾矿物[10-12]；红壤性水稻土起源于红壤，缺乏富钾矿物[10]，这为研究水稻土不同形态钾的转化阈值提供了良好的素材。为此，选取“富钾”的紫色水稻土和“贫钾”的红壤性水稻土，通过时间序列，研究其发生过程中不同形态钾转化阈值的演变特征和影响因素，

以期为降低稻田对可溶性钾肥的依赖提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取我国数百年尺度水稻土时间序列（表 1），分别位于四川省广安市的紫色水稻土时间序列（P01，P02，P03，0 a；P11，20 a；P12，60～100 a；P13，100～300 a；P14，300 a）和江西省进贤县的红壤性水稻土时间序列（RC10，0 a；RC11，100 a；RC12，100～300 a；RC13，300 a）。2 个时间序列最早由 Han 等[11, 14]构建，构建过程和水稻土的发育特征等详细信息未在此处列出。时间序列中的稻田在 20 世纪 90 年代之前主要施用农家肥和草木灰，后逐渐只施用化肥。

表 1 土壤采样点信息和耕作层基本理化性质

Table 1 General information on the soil sampling sites and basic soil properties of the cultivation horizon

剖面编号 ID	母质 Parent material	利用方式 Land use	耕种年限 Cultivation age /a	pH	有机碳 SOC /（g·kg^{-1}）	黏粒 Clay /（g·kg^{-1}）	阳离子交换量 CEC /（cmol·kg^{-1}）	全钾 TK /（g·kg^{-1}）
RC10	第四纪红黏土	荒地	0	4.7	8.70	419.77	7.27	13.43
RC11	第四纪红黏土	油菜-水稻	100	4.9	19.28	182.03	6.38	11.1
RC12	第四纪红黏土	油菜-水稻	100～300	5.4	15.61	241.62	6.44	14.74
RC13	第四纪红黏土	油菜-水稻	300	5.9	23.94	257.88	6.34	11.94
P01	紫色砂页岩	林地	0	6.1	9.31	248.99	12.22	24.6
P02	紫色砂页岩	林地	0	5.3	8.22	261.63	11.78	23.27
P03	紫色砂页岩	林地	0	5.4	9.45	225.58	19.44	22.34
P11	紫色砂页岩	双季稻	20	6.8	5.27	261.07	21.11	22.37
P12	紫色砂页岩	双季稻	60～100	6.0	9.21	362.01	23.55	22.18
P13	紫色砂页岩	双季稻	100～300	6.5	13.98	366.64	23.44	21.59
P14	紫色砂页岩	双季稻	300	6.4	15.70	394.77	16.89	22.32

1.2 样品采集与分析

结合史料分析与实地考察，选取典型土壤剖面，按照土壤发生层采样法采集土样，稻田样本均在水稻收割排水后采集。采集的土壤样品在室内自然风干，挑出枯枝落叶、根系和大于 2 mm 的非土壤物质，四等分法取土，先后过 10 和 60 目尼龙筛，装好备用。颗粒组成、有机碳（SOC）、阳离子交换量（CEC）和全钾（TK）等基本理化性质测定方法参照《土壤调查实验室分析方法》[15]。

WK，称取过 10 目筛的风干土样 5 g，加 50 mL 蒸馏水浸提；EK，称取过 10 目筛的风干土样 5 g，加 50 mL 0.1 mol·L^{-1} 的乳酸铵和 0.4 mol·L^{-1} 醋酸混合溶液室温下（20～25 °C，pH=3.75）浸提；NEK，称取过 10 目筛的风干土样 5 g，加 50 mL 2 mol·L^{-1} HCl 加热至 100 °C 浸提，火焰光度计测定，具体方法参照文献[16]；矿物钾（MK），为 TK－WK－EK－NEK 的差值。不同形态钾的转化阈值主要根据不同形态钾累积图进行判别。

样本用沉降法分离出黏粒（< 2 μm）和粉粒（2～50 μm）后制片，进行 X-射线衍射分析（XRD），具体方法参见《土壤调查实验室分析方法》[15]，并根据标准卡片对黏粒矿物组成进行估算[17]。测试仪器：德

国 BRUKER 公司 D8 ADVANCE 型仪器；测试条件：CuKa (λ = 0.15406 nm) 辐射，测试电压为 40 kV，测试电流为 40 mA，扫描方式为步进扫描，扫描速度为 10°·min^{-1}，步长为 0.02°。

1.3 统计方法

采用Microsoft Excel 2020软件进行数据统计，Origin 2021软件进行绘图以及IBM Statistics SPSS 25.0软件进行Person相关性分析。

2 结 果

2.1 两种典型水稻土在发生过程中基本理化性质和矿物的演变特征

两种典型水稻土随着种稻年限的增加其基本理化性质均呈现了明显变化（表 1）。紫色水稻土和红壤性水稻土耕作层 SOC 平均含量与它们的起源土壤相比有明显的增加（平均分别增加了 23%和 126%）。与紫色水稻土相比，红壤性水稻土种稻后 SOC 更容易累积。紫色水稻土黏粒平均含量较其起源土壤增加了约 41%，基本体现出随着种稻时间的增加而逐渐增加的趋势。相比较而言，红壤性水稻土黏粒平均含量较其起源土壤降低了约 46%，基本体现出随着种稻时间的增加而逐渐降低的趋势。紫色水稻土 CEC 均值远高于其起源土壤，但并没有随着种稻年限的增加而一直增加，而是先增加后又有所降低。这表明紫色水稻土发育初期（0～100 a）有利于 CEC 值的提高，之后则显示出相反的效果。红壤性水稻土 CEC 略低于其起源土壤，随着种稻年限的增加变化不大。紫色水稻土和红壤性水稻土 pH 分别介于 6.0～6.8 和 5.0～6.3 之间，略高于起源土壤。长期种稻会使土壤 pH 趋于中性，这和已有的研究结果一致[8, 18]。

对紫色水稻土黏粒矿物而言，其耕作层蒙脱石的平均相对百分含量为 39%，明显高于起源土壤（27%，图 1）。淹水稻作有利于蒙脱石的积累。种稻初期（0～100 a），蒙脱石随着种稻年限的增加逐渐增多。之后随着种稻年限的增加（>100 a）蒙脱石含量不再增加，甚至有所下降。相比而言，伊利石（16%）和绿泥石（19%）的平均相对百分含量低于起源土壤（19%和 22%）。对紫色水稻土粉粒矿物而言，石英（49%）和斜长石（28%）的平均相对百分含量高于起源土壤（分别为 44%和 21%）；而伊利石（12%）和钾长石（4%）的平均相对百分含量则低于起源土壤（分别为 19%和 9%）。在长期种稻过程中，紫色水稻土存在较明显的脱钾（表 1），并伴有矿物的显著变化（图 1）。在黏粒部分，蒙脱石相对积累，而伊利石和绿泥石相对减少；在粉粒部分，石英和斜长石相对积累，而伊利石和钾长石相对减少。

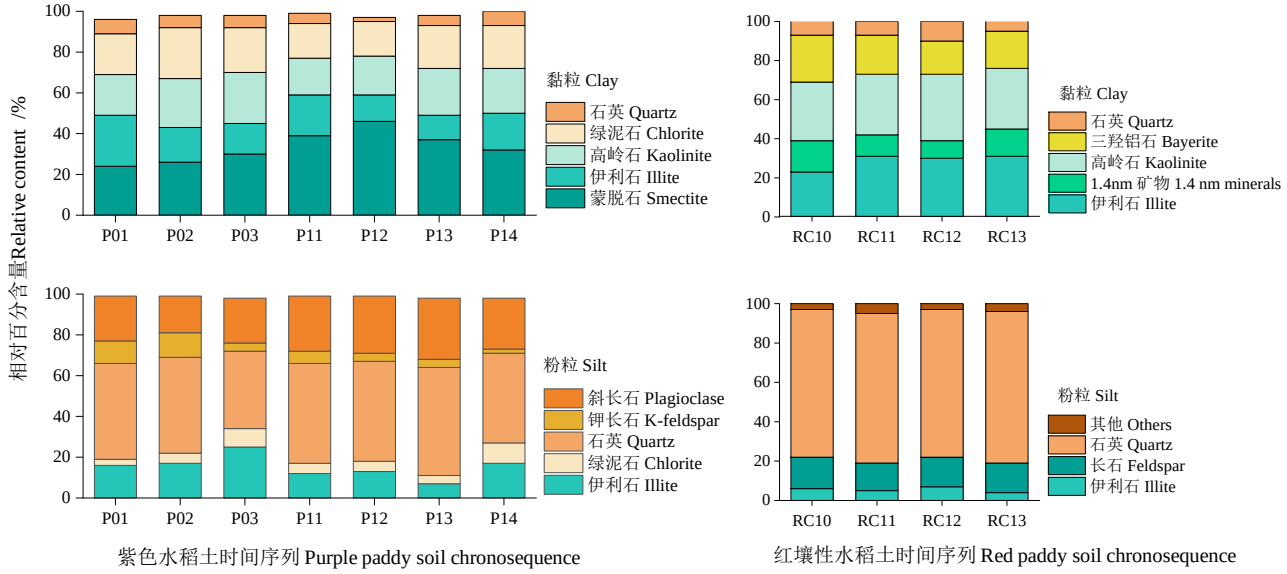


图 1 两种典型水稻土矿物的演变特征

Fig. 1 Evolution characteristics of minerals in two typical paddy soils

对红壤性水稻土黏粒矿物而言，其伊利石平均相对百分含量（31%）较起源土壤（22%）有一定的增加，而 1.4 nm 过渡矿物和三羟铝石平均相对含量（分别为 10%和 19%）较起源土壤（分别为 16%和 24%）有所降低。长期种稻能增加黏粒矿物中伊利石的相对含量。红壤性水稻土在种稻 100 a 以内，伊利石相对含量明显增加（平均约增加了 37%），之后随着种稻时间的增加（100～300 a）变化很小（图 1）。考虑到红壤性水稻土黏粒含量的损失率要高于伊利石黏粒矿物的增加率，实际上黏粒中伊利石绝对含量在长期种稻过程中仍是亏损的。对粉粒矿物而言，其富钾矿物非常少，主要以抗风化的石英和长石为主，二者总量超过了 90%。在长期种稻过程中，石英略有积累，而伊利石和长石相对减少。在长期种稻过程中，红壤性水稻土脱钾要明显较紫色水稻土轻（表 1），矿物变化也小。

2.2 紫色水稻土发生过程中不同形态钾以及转化阈值的演变特征

紫色水稻土耕作层的 WK 和 EK 平均含量分别为 61.5 和 44.4 mg·kg^{-1}，低于起源土壤（分别为 106.5 和 56.7 mg·kg^{-1}），这说明淹水稻作并不会增加紫色水稻土的 WK 和 EK 含量。相反，紫色水稻土 NEK 平均含量为 675.6 mg·kg^{-1}，要高于起源土壤（650.6 mg·kg^{-1}），这说明淹水稻作能促进 MK 向 NEK 的转化，提高矿物钾的有效性。紫色水稻土 WK 在种稻 20 a 内降低比较明显，之后随着种稻时间的增加相对稳定（图 2）。EK 在种稻 20 a 内相对稳定，20～60 a 内有一定的下降，之后相对稳定。NEK 在种稻 20 a 内有较大幅度的增加，20～60 a 内有一定的下降，之后也相对稳定且保持在一个较高的水平（658±10 mg·kg^{-1}）。对“富钾”的紫色水稻土而言，传统稻作在种稻初期（0～20 a）能引起耕作层 WK 和 EK 总量明显降低（约降低 28%），之后 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值相对稳定，其转化阈值稳定在 61±4 和 106±9 mg·kg^{-1} 之间。

总体而言，传统稻作在种稻初期（0～20 a）虽然会大幅度降低 WK 和 EK 的总量，但其总量仍然保持在一个较高的水平（图 2），同时也降低了 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值，且其转化阈值在之后长期保持稳定。这对稻田的保肥和促进土壤 NEK 的释放有利。从紫色水稻土不同形态钾以及转化阈值的演变特征来看，紫色水稻土的供钾能力和供钾潜力比较高且能长期保持不变。

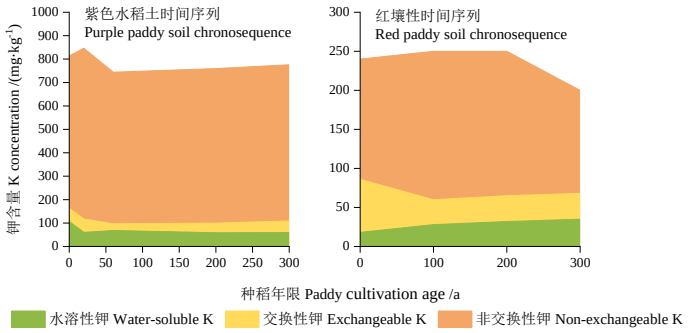


图 2 两种典型水稻土不同形态钾及转化阈值的演变特征

Fig. 2 Evolution characteristics of different potassium forms and conversion thresholds in two typical paddy soils

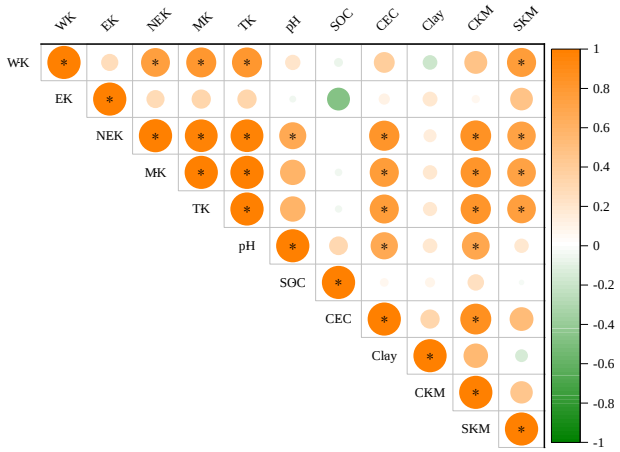
2.3 红壤性水稻土发生过程中不同形态钾以及转化阈值的演变特征

红壤性水稻土耕作层 WK 和 NEK 平均含量分别为 27.0 和 184.8 mg·kg^{-1}，要高于起源土壤（分别为 15.5 和 169.5 mg·kg^{-1}），而 EK 平均含量为 37.1 mg·kg^{-1}，要低于起源土壤（52.5 mg·kg^{-1}）。红壤性水稻土耕作层 WK 在种稻 100 a 内有一定的增加，之后相对稳定。EK 在种稻 100 a 内大幅度下降，之后相对稳定（图 2）。NEK 在种稻 100 a 内大幅度增加，在 100～200 a 内相对稳定；但在种稻 200 a 之后，随着种稻时间的增加大幅度下降。对“贫钾”红壤性水稻土而言，WK 和 EK 的总量在种稻初期（0～100 a）会大幅度降低并达到非常低的水平（约降低 30%），之后 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值相对稳定，其转化阈值稳定在 32±4 和 64±4 mg·kg^{-1} 之间。

传统稻作在种稻初期（0～100 a）会提高红壤性水稻土 WK 含量并降低 EK 的含量，这会促进 NEK 的释放，但不利于稻田保肥。尽管如此，红壤性 WK、EK 和 NEK 的总量非常低，土壤的供钾能力和供钾潜力均比较低。而且种稻 200 a 之后，红壤性水稻土的 NEK 也开始大幅度下降，这表明土壤的供钾潜力开始大幅度下降，红壤性水稻土在发生过程中钾素的释放能力比较有限。

3 讨 论

为理解土壤属性对水稻土钾赋存形态和转化阈值的影响，将耕作层或表层土壤属性与各种形态钾进行相关分析（图 3）。结果显示除 EK 外，WK、NEK 和 MK 之间均呈显著正相关，这说明在两种典型水稻土发生过程中不同形态钾之间存在密切联系。WK、EK、NEK 和 MK 与 SOC 和黏粒含量均不呈显著相关。WK 和 EK 与 CEC 不呈显著相关，而 NEK 和 MK 与 CEC 呈显著正相关。除 EK 外，WK、NEK 和 MK 与黏粒和粉粒中的富钾矿物呈显著正相关（$P<0.05$，图 3）。



WK：水溶态钾 Water soluble K； EK：交换性钾 Exchangeable K；NEK：非交换性钾 Non-exchangeable K；MK：矿物钾 Mineral K；TK：全钾 Total K；SOC：有机碳 Soil organic carbon；CEC：阳离子交换量 Cation exchange capacity；Clay：黏粒含量 Clay content；CMK：黏粒中的富钾矿物 K-rich minerals in clay particles；SMK：粉粒中的富钾矿物 K-rich minerals in silt particles

图 3 两种典型水稻土土壤属性与各种形态钾的相关性

Fig. 3 Pearson correlation coefficients between soil properties and different K forms in the two typical paddy soils

在土壤体系内，各种形态钾之间可以相互转化。有机质和高岭石中的吸附点位对钾的选择性很弱[19]，而且有机质还能占据层状硅酸盐矿物层间的一些吸附点位[20]，限制钾离子（K^+）在矿物层间的扩散和吸附[12, 21]，不利于 EK 和 NEK 的提升[22]。这也解释了为什么 SOC 与各种形态钾均呈负相关性（尽管未达显著水平）。WK、NEK 和 MK 与黏粒和粉粒中的富钾矿物呈显著正相关，这说明水稻土发生过程中，水稻土钾赋存形态和转化阈值与黏粒和粉粒中的富钾矿物密切相关。

总体而言，两种典型水稻土的矿物组成受起源土壤的影响非常大具有明显的继承性。淹水种稻能引起矿物的规律变化，但矿物变化趋势和强度可能与土壤自身的矿物有关。紫色水稻土在发生过程中脱钾很明显（表 1），这与其黏粒和粉粒中的富钾矿物（伊利石、绿泥石和钾长石）减少一致（图 1）。在自然土壤中的 EK 和 NEK 库仅能在数年至数十年内满足高强度种植作物对钾需求。自然土壤淹水稻作后，土壤水分状况和氧化还原状况发生改变，这会提高 MK 释放。淹水还原条件下 Fe^{2+}、Ca^{2+}等阳离子与层状硅酸盐矿物层间钾的置换和还原氧化交替会驱动 MK 的转化和释放，并对 WK、EK 和 NEK 有快速且较稳定的补给[13]。紫色水稻土不同形态钾含量和转化阈值的演变特征也证实了其释钾机制可以在“富钾”的水稻土发生过程中

长期保持稳定。

尽管如此，当土壤富钾矿物较少时，无论淹水或干湿交替的农业措施对土壤速效钾的增加均非常有限[18]。红壤性水稻土 TK 含量较低，富钾矿物比较匮乏。在水稻土发生过程中，脱钾现象不明显，矿物的变化也相对较小（图 1）。其土壤黏粒矿物的动态变化可能主要与耕作措施有关，长期施肥可以提高黏粒伊利石的含量[23-26]。在耕作过程中，水稻土的黏粒矿物通常发挥了重要的缓冲作用，当土壤中有足够植物生长的钾元素时，黏粒矿物会储存一部分钾元素；当土壤中的钾元素无法满足植物生长时，黏粒矿物也会释放一部分钾元素来供应植物生长。由于红壤性水稻土在 20 世纪 90 年代之前缺少稳定的钾源输入，历史时期的稻作会导致土壤长期的负钾平衡，这会引起黏粒和伊利石等富钾矿物绝对含量的亏损，导致其原本就不高的供钾能力和供钾潜力持续下降（图 2）。已有研究结果表明长期的负钾平衡会导致红壤性水稻土对钾素的吸附能力降低[27]，进而会加大其作物对钾肥的依赖[28]。对红壤性水稻土尤其是种稻超过 200 a 的红壤性水稻土而言，有必要以可持续和钾平衡的方式增加其钾肥的投入，避免出现农田的负钾平衡。

当前农田缺钾现象普遍存在，因此寻找更经济的钾肥势在必行。在此背景下，使用破碎的硅酸盐岩作为作物钾源并当作传统肥料的替代品，成为一种潜在的选择[29]。然而，在旱地土壤中作物对这种矿物钾的利用效率相当有限。由于水稻土中的层状硅酸盐矿物具有独特的释钾机制[13]，且能在发生过程中长期保持稳定，因此在稻田中使用富含层状硅酸盐富钾矿物的粉屑作为传统钾肥的替代品具有巨大的潜力。考虑到我国伊利石、云母等层状硅酸盐矿物资源丰富，分布广泛，本研究发现不仅为减少钾肥投入和为富含富钾矿物的水稻土设计低成本、高效的种植模式提供了科学依据，也有助于缓解稻田对水溶性钾肥需求的压力。

需要特别指出的是时间序列剖面缺少重复，可能会影响研究结果的可靠性。同时当前研究仍缺少土壤钾素的收支平衡数据，因此很难确定土壤各种形态钾实际的有效性。需要更多的工作来精确度量富钾矿物粉屑施入稻田后其矿物钾释放的动力学特征和影响机制以及综合考量粉屑施入对稻田可耕性及质量影响，以期为降低稻田对可溶性钾肥的依赖提供理论支撑。

4 结 论

对“富钾”紫色水稻土而言，传统稻作在 0～20 a 内能引起耕作层 WK 与 EK 总量明显降低，之后 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值相对稳定在 61±4 和 106±9 $mg \cdot kg^{-1}$。对“贫钾”红壤性水稻土而言，WK 和 EK 的总量在 0～100 a 内也会大幅度降低并达到非常低的水平，之后 WK↔EK 和 EK↔NEK 之间的转化阈值相对稳定在 32±4 和 64±4 $mg \cdot kg^{-1}$。在水稻土发生过程中，水稻土钾赋存形态和转化阈值与黏粒和粉粒中的富钾矿物密切相关。层状硅酸盐富钾矿物的释钾机制可以在“富钾”的水稻土发生过程中长期保持稳定。对红壤性水稻土尤其是种稻超过 200 a 的红壤性水稻土而言，有必要以可持续和钾平衡的方式增加其钾肥的投入，避免出现农田的负钾平衡。

参考文献（References）

[1] Öborn I, Andrist-Rangel Y, Askekaard M, et al. Critical aspects of potassium management in agricultural systems[J]. Soil Use and Management, 2005, 21(1): 102-112.

[2] Römheld V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1): 155-180.

[3] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture–Status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(9): 656-669.

[4] Regmi A, Ladha J, Pasuquin E, et al. The role of potassium in sustaining yields in a long-term rice-wheat experiment in the Indo-Gangetic Plains of Nepal[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36(3): 240-247.

[5] Ladha J K, Dawe D, Pathak H, et al. How extensive are yield declines in long-term rice–wheat experiments in Asia?[J]. Field Crops Research, 2003, 81(2/3): 159-180.

[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(3): 341-349.

[7] Wu L Q, Ma W Q, Zhang C C, et al. Current potassium-management status and grain-yield response of Chinese maize to potassium application[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(3): 441-449.

[8] Gong Z T. Chinese soil taxonomy: Theory, methodology and practices[M]. Beijing: Science Press, 1999.[龚子同. 中国土壤系统分类: 理论・方法・实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]

[9] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J]. Geoderma, 2015, 237: 199-210.

[10] Han G Z, Zhang G L, Li D C, et al. Pedogenetic evolution of clay minerals and agricultural implications in three paddy soil chronosequences of South China derived from different parent materials[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(2): 423-435.

[11] Han G Z, Huang L M, Tang X G. Potassium supply capacity response to K-bearing mineral changes in Chinese purple paddy soil chronosequences[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1190-1200.

[12] Han G Z, Huang L M, Zhang G L, et al. A chronosequence study of purple paddy soils with respect to improving ammonium and potassium fertilization management[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 2031-2042.

[13] Han G Z, Fan H Z, Han B S, et al. Paddy management controls potassium release from minerals in purple soils after 40 years of cultivation[J]. European Journal of Soil Science, 2024, 75(3): e13492.

[14] Han G Z, Zhang G L. Changes in magnetic properties and their pedogenetic implications for paddy soil chronosequences from different parent materials in South China[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(4): 435-444.

[15] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]

[16] Egnér H, Riehm H, Domingo W R. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beuteilung des Nähstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor-und Kaliumbestimmung [J]. Kungl Lantbr Högsk Ann, 1960, 26: 199-215.

[17] Whittig L D, Allardice W R. X-ray diffraction techniques[M]//SSSA Book Series. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018: 331-362.

[18] Li Q K. Paddy soils of China[M]. Beijing: Science Press, 1992. [李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]

[19] Ehlers W, Gebhardt H, Meyer B. Untersuchungen über die positionsspezifische Bindung des Kaliums an Illit, Kaolinit, Montmorillonit und Humus. (Beiträge zum K-Austausch des Bodens IV)[J]. Zeitschrift Für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1968, 119(3): 173-186.

[20] Velde B, Goffé B, Hoellard A. Evolution of clay minerals in a chronosequence of poldered sediments under the influence of a natural pasture development[J]. Clays and Clay Minerals, 2003, 51(2): 205-217.

[21] Evangelou V P, Karathanasis A D, Blevins R L. Effect of soil organic matter accumulation on potassium and ammonium quantity-intensity relationships[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(2): 378-382.

[22] Li X Z, Hu C Y, Yang F, et al. Influence of land use changes on evolution of different K forms in purple paddy soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 685-693. [李秀芝, 胡聪月, 杨帆, 等. 土地利用方式改变对紫色水稻土不同形态钾演变特征的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 685-693.]

[23] Tributh H, Boguslawski E V, Lieres A V, et al. Effect of potassium removal by crops on transformation of illitic clay minerals[J]. Soil Science, 1987, 143(6): 404-409.

[24] Barré P, Velde B, Abbadie L. Dynamic role of “illite-like” clay minerals in temperate soils: Facts and hypotheses[J]. Biogeochemistry, 2007, 82(1): 77-88.

[25] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1580-1590.

[26] Li D C, Velde B, Li F M, et al. Impact of long-term alfalfa cropping on soil potassium content and clay minerals in a semi-arid loess soil in China[J]. Pedosphere, 2011, 21(4): 522-531.

[27] Han G Z, Cao X M, Han B S, et al. Potassium supply and adsorption capacity changes in a Chinese subtropical paddy soil chronosequence[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(2): 290-303.

[28] Li Z P, Velde B, Li D C. Loss of K-bearing clay minerals in flood-irrigated, rice-growing soils in Jiangxi Province, China[J]. Clays and Clay Minerals, 2003, 51(1): 75-82.

[29] Manning D A C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2): 281-294.

（责任编辑：檀满枝）