

DOI: 10.11766/trxb202106290334

李秀芝, 胡聪月, 杨帆, 韩光中. 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.
LI Xiuzhi, HU Congyue, YANG Fan, HAN Guangzhong. Influence of Land Use Changes on Evolution of Different K Forms in Purple Paddy Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 685–693.

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*

李秀芝, 胡聪月, 杨帆, 韩光中[†]

(内江师范学院地理与资源科学学院, 土壤过程模拟实验室, 四川内江 641112)

摘要: 近年来紫色水稻土区农业种植结构发生很大变化, 深刻影响了土壤钾素的赋存形态和动态平衡。厘清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, 对紫色水稻土区钾肥管理和环境保护具有重要意义。运用时间序列方法, 分析了紫色水稻土在撂荒、旱作和改为鱼塘后土壤不同形态钾的动态变化特征和影响因素。结果表明紫色水稻土利用方式改变后, 土壤水溶性钾与土壤水分状况密切相关。撂荒和旱作均会降低土壤水溶性钾含量, 改为鱼塘后能提升土壤水溶性钾含量。3 种土地利用方式均能提升土壤交换性钾和非交换性钾含量, 提升幅度和提升速率为旱作>撂荒>养鱼。紫色水稻土改为鱼塘 5 a 后或撂荒 12 a 后土壤不同形态钾之间可以达到大致的平衡, 而旱作 20 a 后土壤不同形态钾之间仍未达到大致的平衡。紫色水稻土利用方式改变后土壤黏粒含量和黏粒矿物的动态变化与土壤中的钾平衡有关。土地利用方式改变导致的土壤有机质 (SOM) 损失可能会影响土壤钾的赋存形态和动态平衡, 进而引起土壤黏粒的富集和黏粒矿物的变化, 今后要加强这方面的研究。

关键词: 紫色水稻土; 土地利用方式; 不同形态钾; 演变特征

中图分类号: S158.5 **文献标志码:** A

Influence of Land Use Changes on Evolution of Different K Forms in Purple Paddy Soils

LI Xiuzhi, HU Congyue, YANG Fan, HAN Guangzhong[†]

(Laboratory of Simulation on Soil Process, School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China)

Abstract: 【Objective】Significant changes have recently taken place in the agricultural planting structure of the purple paddy soil area. These changes have profoundly affected the form and dynamic balance of soil potassium. Thus, understanding the impact of land-use changes on the evolution characteristics of different forms of potassium in purple paddy soil is of great significance to

* 国家级大学生创新创业训练计划 (X2018015)、内江师范学院成果转化重大培育项目 (17CZ03) 和内江师范学院校级科研项目 (17JC25) 资助 Supported by the National Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (No. X2018015), the Key Project of Neijiang Normal University (No. 17CZ03) and the Project of Neijiang Normal University (No. 17JC25)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hanguangzhong@163.com

作者简介: 李秀芝 (1983—), 女, 山东青岛人, 硕士, 讲师, 主要从事土地资源研究。E-mail: lixiuzhi2005@163.com

收稿日期: 2021-06-29; 收到修改稿日期: 2021-11-30; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-12-29

regional potassium management and environmental protection. 【Method】 In this paper, we analyzed the dynamic characteristics and influencing factors of different forms of potassium in the purple paddy soil after abandonment, dry farming and conversion to fish ponds, using the time series method. 【Result】 The results showed that abandonment and dry farming reduced the water-soluble potassium content of purple paddy soil, and conversion to fish ponds increased the water-soluble potassium content of purple paddy soil. Abandonment, dry farming and conversion to fish ponds could all increase the exchangeable potassium and non-exchangeable potassium content of purple paddy soil. Both the increasing magnitude and rate are highest for dry farming, intermediate for abandonment, and smallest for fish farming. 【Conclusion】 In the purple paddy soil, potassium in different forms reached a general balance after 5 years of fish farming or 12 years after abandonment. However, after 20 years of dry farming, the different forms of potassium in the soil did not reach a general balance. The results also showed that the release of mineral potassium in purple paddy soil was relatively fast in the natural state. After the land-use changes, there were complex connections between the occurrence and dynamic balance of purple paddy soil, the loss of soil organic matter, and the transformation of soil clay minerals, which needs further research.

Key words: Purple paddy soils; Land use; Different K forms; Evolution characteristic

20 世纪 80 年代初, 中国政府在农村开始推行家庭联产承包责任制。当时中国农业发展水平比较低, 以手工劳作为主, 不适合规模化经营。家庭联产承包责任制将农业经营单位划小到家庭, 同当时的生产力水平相适应。同时农民获得生产和分配的自主权并, 大幅度调动了农民精耕细作的积极性^[1]。农民通过增加劳动力投入、增施化肥、更换良种等措施大幅度提高了耕地的生产效率, 促进了中国粮食生产的迅速发展, 并产生了一定的经济效益。在农村推行家庭联产承包责任制的同时, 中国政府也进行了许多政治和经济改革, 刺激了国民经济的发展。随着经济发展和劳动力价格的显著提升, 越来越多的农村青壮年劳动力外出务工或经商, 放弃了农业生产, 农民家庭收入构成逐渐发生变化^[2-3]。2013 年我国从事非农工作的农村劳动力人口已达到 2.7 亿^[4]。农村劳动力的大量输出以及农药、化肥和种子等成本的逐年上涨, 使得农户家庭粮作为主的土地利用模式发生重大变化。

川渝地区紫色水稻土面积约 305 万 hm^2 , 占全区水稻土总面积的 66%^[5], 是当地最重要的水稻土类型。紫色水稻土多分布在丘陵低岗地区, 在家庭联产承包责任制的耕地分配制度下, 地块被人为破碎化, 大规模的机械化生产很难普及, 其水稻生产中劳动力成本较高。另一方面, 由于当地居民生活水平的不断提高, 市场对蔬菜、水果和肉类的需求急剧增加, 农民近年来不断通过改变土地用途增加收入。部分紫色水稻土已不再用于水稻生产, 而被用作养鱼或蔬菜等作物的生产, 甚至直接撂荒。土

地利用变化改变了水稻土周期性淹水的管理方式, 土壤的水分、养分状况和通气状况也随之发生变化。这会改变土壤组分的化学行为^[6-7], 进而影响土壤质量^[8-9]、土壤固碳速率和固碳潜力^[10-11]以及土壤碳氮循环^[12-13]等。但目前的研究还较少涉及水稻土利用方式改变对土壤不同形态钾演变特征的影响。因此, 本研究运用时间序列方法, 分析了紫色水稻土在撂荒、旱作和改为鱼塘后土壤不同形态钾的动态变化特征和影响因素, 旨在阐明紫色水稻土利用方式改变后土壤钾素的赋存形态和动态平衡, 为紫色水稻土区钾肥管理和环境保护提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

四川省内江市 (29°11'—30°2'N, 104°15'—105°26'E) 属于亚热带季风气候, 年均气温 17.5 °C, 年均降雨量 1 057 mm, 是紫色水稻土分布的典型区。以内江市东兴区太安乡的万年村、太平村和七家嘴村为研究区, 结合调查问卷和实地考察, 调查了当地土地利用现状。其中稻田改旱地比例最高, 约占原有稻田面积的 39%, 其次是稻田改鱼塘, 约占原有稻田面积的 13%, 撂荒地较少, 仅占原有稻田面积的 5%。

1.2 样品采集与分析

在研究区选取紫色水稻土发育的数十年尺度不同土地利用方式时间序列, 分别为撂荒序列 (AP 序列, AP10, 0 a; AP11, 8 a; AP12, 13 a; AP13,

20 a)、旱地序列 (PD 序列, PD10, 0 a; PD11, 10 a; PD12, 16 a; PD13, 20 a) 和鱼塘序列 (P 序列, P10, 0 a; P11, 5 a; P12, 9 a)。土地利用年限是根据实地调查得出, 采样点信息见表 1。选取典型样点, 按土壤发生层采样法采集土样, 每一样点重复采样三次。在 10 月初水稻收割后采集稻田土壤样本; 同一时间, 采集旱地和鱼塘土壤样本。鱼塘序列土壤已放弃稻作, 长期灌水(水深约 50~120 cm)。因此只采集了 0~20 cm 土壤样品。样品挑出枯枝落

叶、根系和大于 2 mm 的非土壤物质, 室内自然风干。风干土样过 10 目尼龙筛, 记录砾石和细土重量, 然后将细土经玛瑙研钵磨细, 分别过 60 目和 100 目尼龙筛, 保存备用。土壤理化属性分析参照《土壤调查实验室分析方法》^[14]: 土壤 pH, 电位法 (土水比 1:2.5); 土壤容重, 环刀法; 土壤有机质 (SOM), 重铬酸钾-硫酸消化法; 土壤全氮 (TN), 凯氏定氮法; 土壤化学指标均设置全程空白, 并以国家标准土壤样品 (GSS-3 和 GSS-5) 作为质量控制。

表 1 土壤采样点信息

Table 1 General information of the soil sampling sites

剖面编号 ID	地点 Location	坡度 Gradients /°	土地利用方式 Land use types	利用年限 Cultivation age /a	地下水位 Groundwater table /m
AP10	内江	< 6	水稻-油菜	0	0.7
AP11	内江	< 6	荒地	8	0.9
AP12	内江	< 6	荒地	13	1.2
AP13	内江	< 6	荒地	20	1.1
PD10	内江	< 3	水稻-油菜	0	0.4
PD11	内江	< 3	旱地	10	0.8
PD12	内江	< 3	旱地	16	0.7
PD13	内江	< 3	旱地	20	0.9
P10	内江	< 3	水稻-油菜	0	0.6
P11	内江	< 3	鱼塘	5	0
P12	内江	< 3	鱼塘	9	0

水溶性钾, 称取过 10 目筛的风干土样 5 g, 加 50 mL 蒸馏水浸提; 交换性钾, 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℃, pH = 3.75) 浸提; 非交换性钾, 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℃ 浸提, 火焰光度计测定, 具体方法参考文献[15]。

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》^[14], 并根据标准卡片对黏粒矿物组成进行估算^[16-17]。测试仪器: 德国 BRUKER 公司 D8 ADVANCE 型仪器; 测试条件: CuKα (λ = 0.154 06 nm) 辐射, 测试电压 40 kV, 测试电流 40 mA, 扫描方式为步进扫描, 扫

描速度为 10°·min⁻¹, 步长 0.02°。

1.3 土壤钾密度 (SKD) 的计算

SKD 计算公式为:

$$SKD = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i / 100) \rho_i \times K_i \times T_i / 100 \quad (1)$$

式中, SKD 为土壤钾密度 (g·m⁻²), 表示单位面积某一深度土壤内某一形态钾的总量; θ_i 为第 i 层 > 2 mm 砾石含量 (体积比, %); ρ_i 为第 i 层土壤容重 (g·cm⁻³); K_i 为第 i 层某一形态钾含量 (mg·kg⁻¹); T_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); n 为土壤层次总数。

1.4 统计方法

采用 Excel 2016 软件进行数据统计, 采用 Origin

8.0 软件进行绘图和采用 SPSS 18.0 软件进行 Person 相关性分析。

2 结果

2.1 土地利用方式改变对土壤性质的影响

紫色水稻土旱作后耕作层厚度有所增加,而犁底层弱化甚至消失(表 2)。这可能与旱作翻耕较深有关。撂荒和旱作后紫色水稻土耕作层或表层容重平均增加了 71%,而改为鱼塘后其表层“糊泥化”,容重平均降低了 14%。紫色水稻土撂荒、旱作或改为鱼塘后耕作层或表层 SOM 含量平均分别下降了 33%、

50%和 25%, C/N 平均分别下降了 8%、14%和 18%,但黏粒含量均有所增加,平均分别增加了 22%、28%和 16%。紫色水稻土利用方式改变后耕作层或表层黏粒矿物相对含量见图 1。紫色水稻土撂荒后土壤表层蛭石相对含量增加,而蒙脱石相对含量降低。紫色水稻土旱作后耕作层伊利石相对含量明显增加,而蛭石、高岭石和绿泥石相对含量降低。紫色水稻土改为鱼塘后表层伊利石相对含量略有增加,蒙脱石和绿泥石相对含量略有降低,但变化幅度较小。

紫色水稻土撂荒或旱作后,其地下水位明显下降(表 2)。紫色水稻土改为鱼塘后,其地下水位明显上升。当撂荒或旱作时,紫色水稻土失去人为

表 2 利用方式改变对土壤性质的影响

Table 2 Relationships between soil properties and land uses

土壤属性 Soil properties	利用方式 Land use types			
	水稻-油菜 Rice-rape rotation (n=3)	荒地 Wasteland (n=3)	旱地 Dry farm (n=3)	鱼塘 Fishpond (n=2)
地下水位 ^① /m	0.6	1.1	0.8	0
耕作层厚度 ^② /cm	13.3	/	16.7	/
犁底层厚度 ^③ /cm	12.5	/	/	/
容重(耕作层或表层) ^④ /(g·cm ⁻³)	0.7	1.2	1.2	0.6
容重(犁底层或表下层) ^⑤ /(g·cm ⁻³)	0.9	/	/	/
SOM(耕作层或表层) ^⑥ /(g·kg ⁻¹)	38.5	25.8	19.3	28.8
C/N(耕作层或表层) ^⑦	11.4	10.5	9.8	9.4
黏粒含量(耕作层或表层) ^⑧ /%	25.3	31.1	32.1	29.6

①Groundwater table, ②Depth of cultivation horizon, ③Depth of plow pan, ④Soil bulk density of cultivation horizon or soil surface layer, ⑤Soil bulk density of plow pan, ⑥Soil organic matter of cultivation horizon or soil surface layer, ⑦C/N of cultivation horizon or soil surface layer, ⑧Clay content of cultivation horizon or soil surface layer

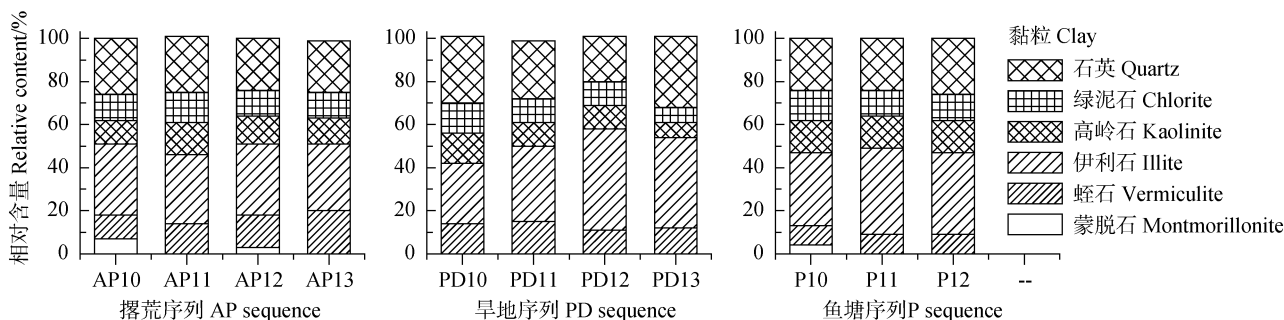


图 1 不同土地利用方式下土壤耕作层或表层黏粒矿物组成

Fig. 1 Relative content of clay minerals in the cultivation horizon or soil surface layer under different land uses

滞水的水分状况，随撂荒或旱作时间的增加逐渐失去了水稻土的部分特性，耕作层或表层变得紧实，厚度增加，犁底层弱化。紫色水稻土利用方式改变后，土壤有机物质的输入量、输入方式和存储环境等发生改变，引起 SOM 含量和 C/N 下降，造成土壤碳库向大气碳库的转化。

2.2 土地利用方式改变后不同形态钾的演变特征

紫色水稻土利用方式改变后土壤不同形态钾分异比较明显。撂荒和旱地序列稻作紫色水稻土水溶性钾平均含量（分别为 26.2 和 25.2 mg·kg⁻¹）要高于撂荒和旱作土壤（分别为 18.9 和 20.3 mg·kg⁻¹），

而交换性钾平均含量（分别为 91.0 和 82.8 mg·kg⁻¹）和非交换性钾平均含量（分别为 354.8 和 300.0 mg·kg⁻¹）要低于撂荒和旱作土壤（交换性钾平均含量分别为 101.7 和 103.5 mg kg⁻¹，非交换性钾平均含量分别为 462.7 和 444.3 mg·kg⁻¹）。鱼塘序列稻作紫色水稻土水溶性钾、交换性钾和非交换性钾平均含量（分别为 25.0、75.0 和 340.0 mg·kg⁻¹）均低于鱼塘土壤（分别为 57.0、121.0 和 430.0 mg·kg⁻¹）。就剖面分异而言，紫色水稻土撂荒后其水溶性钾在 8 a 内下降明显，之后趋于稳定（图 2）。耕作层或表层交换性钾在 12 a 内随着撂荒时间的增加逐渐增加，之后趋于

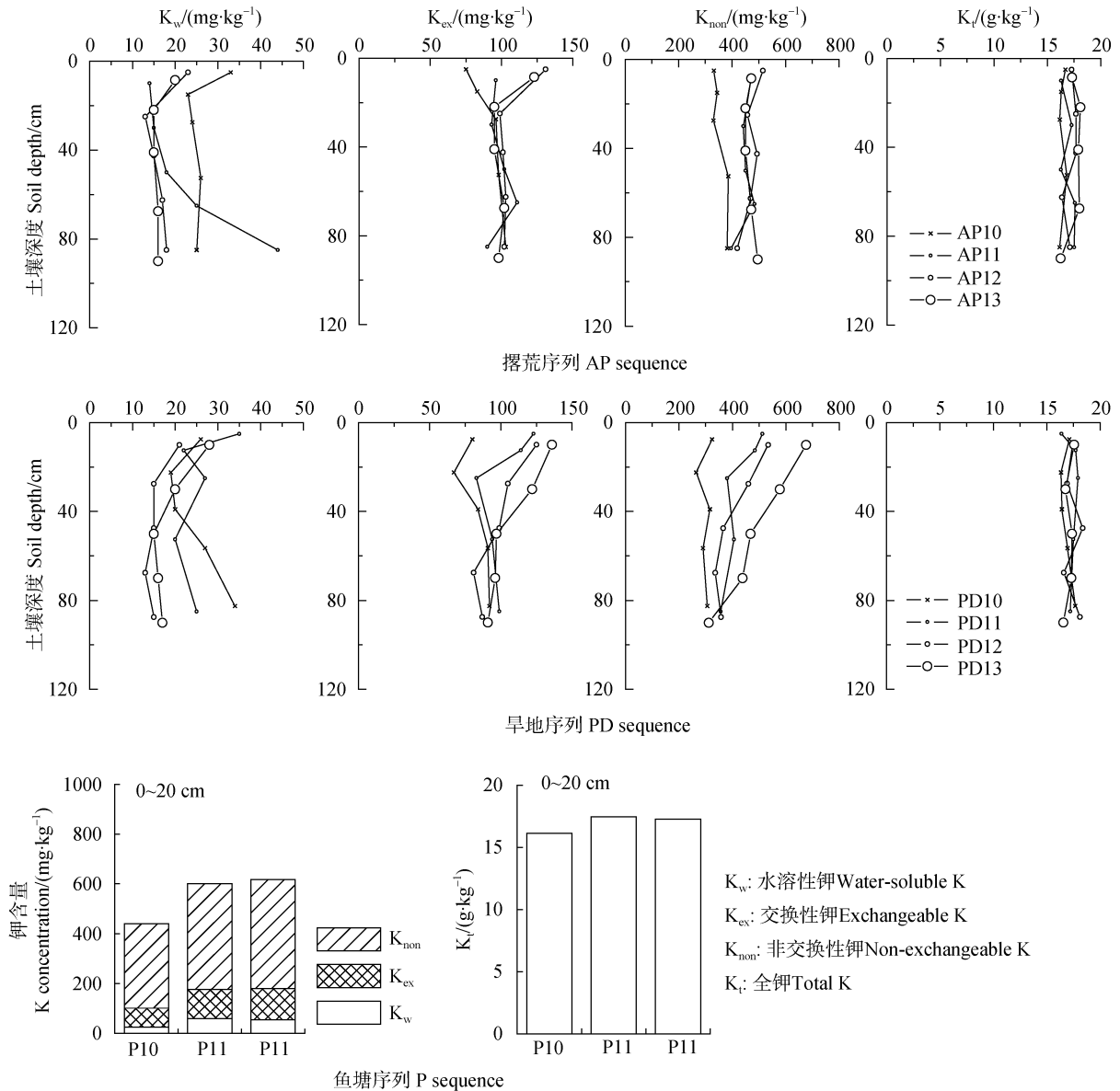


图 2 不同土地利用方式下土壤不同形态钾剖面分布

Fig. 2 Different K form distributions in purple paddy soil profiles relative to chronosequence and land use

稳定。耕作层或表层以下随着撂荒时间的增加几乎未发生变化。整个剖面非交换性钾在 12 a 内增加明显, 之后趋于稳定。紫色水稻土旱作后, 剖面下层水溶性钾有所降低, 基本体现了随旱作时间的增加而逐渐降低的趋势, 但剖面上层降低不明显, 甚至有所增加(图 2)。交换性钾和非交换性钾的演变趋势比较类似, 整个剖面随着旱作时间的增加而逐渐增加, 但增加幅度要较撂荒土壤更高。紫色水稻土改为鱼塘后, 表层水溶性钾、交换性钾和非交换性钾在 5 a 内增加比较明显, 之后趋于稳定(图 2)。相比较而言, 非交换性钾的增加幅度要明显低于撂荒和旱作土壤。从不同形态钾剖面演变特征来看, 紫色水稻土改为鱼塘 5 a 后或撂荒 12 a 后土壤不同形态钾之间可以达到大致的平衡, 而旱作 20 a 后土壤不同形态钾之间仍未达到大致平衡。

2.3 土地利用方式改变后不同形态钾密度的演变特征

紫色水稻土撂荒后交换性钾和非交换性钾密度随撂荒时间的增加而增加(图 3)。上层土壤(0~20 cm)交换性钾和非交换性钾密度在撂荒 12 a 内增加速率较快(平均速率分别为 1.2 和 5.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 之

后增加速率明显降低(平均速率分别为 0 和 0.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。下层土壤(20~80 cm)交换性钾和非交换性钾密度在撂荒 20 a 内增加速率相对稳定(平均速率分别为 0.9 和 9.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。紫色水稻土旱作后交换性钾和非交换性钾密度增加速率要高于撂荒土壤, 在 20 a 内的增加速率相对稳定(上层土壤平均速率分别为 1.2 和 6.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 下层土壤平均速率分别为 2.0 和 12.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。紫色水稻土改鱼塘后, 上层土壤交换性钾和非交换性钾密度在 5 a 内有一定的增加(平均速率分别为 0.6 和 0.7 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 但增加速率要明显低于撂荒和旱作土壤, 之后保持稳定。

3 讨论

为理解土壤属性对土壤钾赋存形态的影响, 将耕作层或表层土壤属性与各种形态钾进行相关分析(表 3)。结果显示水溶性钾与地下水位呈显著负相关, 这说明水溶性钾和土壤水分状况密切相关。撂荒或旱作后土壤缺少周期性淹水, 土壤水分减少不利于水溶性钾提升。交换性钾与 SOM 含量呈显著负

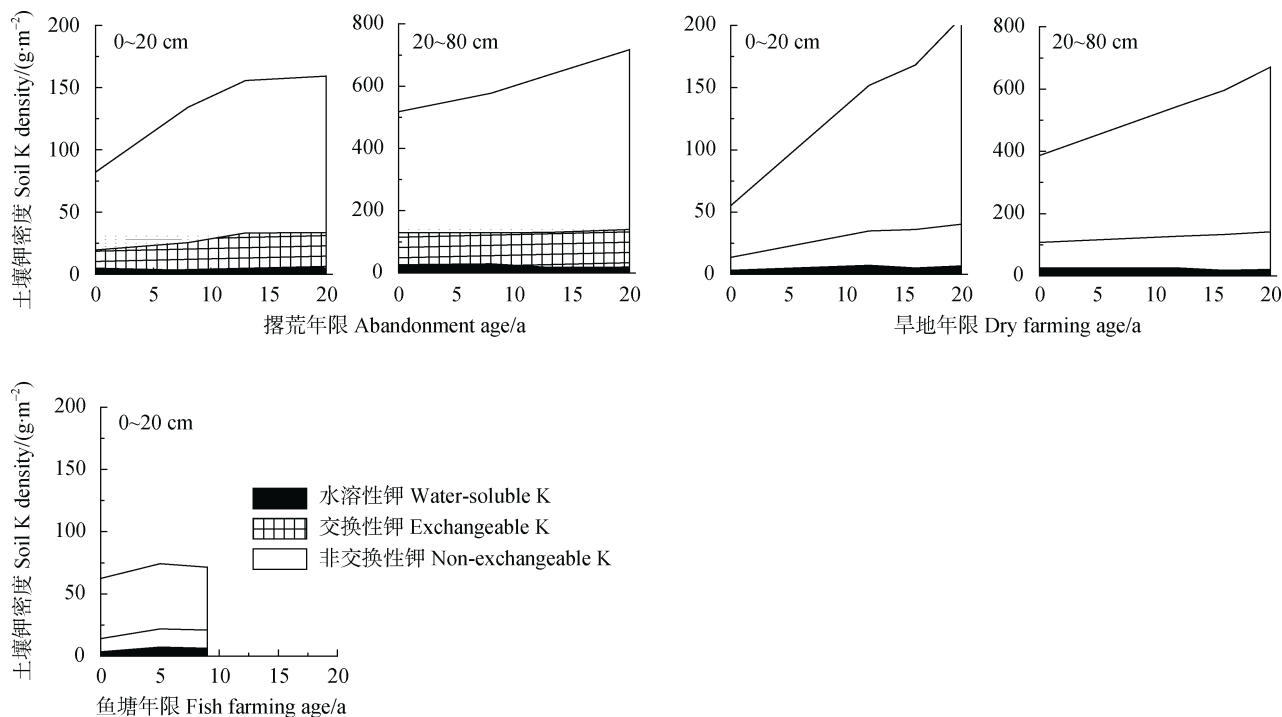


图 3 不同土地利用方式下土壤不同形态钾密度演变特征

Fig. 3 Evolution characteristics of the density of soil potassium (SKD) in purple paddy soils relative to land use

相关。非交换性钾与黏粒含量和黏粒中伊利石含量呈显著正相关,而与 SOM 含量以及黏粒中高岭石和绿泥石含量呈显著负相关。在土壤体系内,各种形态钾之间可以互相转化。SOM 和高岭石中的吸附点位对钾的选择性很弱^[18],而且 SOM 还能占据 2:1 型层状硅酸盐矿物层间的一些吸附点位^[19],限制钾离子 (K^+) 在矿物层间的扩散和吸附^[20-21]。紫色水稻土利用方式改变后引起的 SOM 损失能提高黏粒交换点位对 K^+ 的吸附,利于土壤交换性钾和非交换性钾的提升。这也解释了为什么 SOM 与交换性钾和非交换性钾呈显著负相关。相比较而言,2:1 型层状硅酸盐矿物中的吸附点位对 K^+ 的选择性比较强^[22]。紫色水稻土撂荒后,缺少外源性钾输入,黏粒矿物新吸附的 K^+ 主要来自原生矿物的风化。蛭石对 K^+ 的吸附能力相对较强,固定的钾较多,其相对含量有所增加。紫色水稻土早作后,有外源性钾肥的持续输入。在钾源相对充足的条件下,蛭石等吸钾能力较强的矿物能固定更多的钾,并能够进一步向伊利石矿物转化^[23-24]。Officer 等^[25]的研究也证实了经常施用钾肥的草地土壤,其伊利石和蒙脱石-伊利石的混层矿物含量增加,蛭石和膨胀性矿物的含量降低。紫色水稻土改为鱼塘后,其交换性钾和非交换性钾有所增加,但增加幅度和增加速率均没有撂荒和早作土壤高。这可能主要是因为鱼塘灌水量很大,长期稀释,改变了土壤体系中原有不同形态钾之间的平衡,使得交换性钾和非交换钾难以大幅度提升,

同时也解释了其黏粒含量和黏粒矿物的变化没有撂荒和早作土壤明显。说明紫色水稻土利用方式改变后,土壤黏粒含量和黏粒矿物的动态变化与土壤中的钾平衡有关。紫色水稻土利用方式改变导致的 SOM 损失可能会影响土壤钾的赋存形态和动态平衡,进而引起土壤黏粒的富集和黏粒矿物的变化,今后要加强这些方面的研究。一般而言,周期性氧化还原能促进水稻土钾的释放,提高矿物钾的有效性^[26]。紫色水稻土撂荒和早作后,土壤水分状况发生改变,不利于其矿物钾的释放。但紫色水稻土撂荒后其交换性钾和非交换性钾的增加速率仍然很快,上层土壤(0~20 cm)平均每年可增加交换性钾和非交换性钾 $62 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这说明自然状态下紫色水稻土矿物钾的释放仍然相对比较快,要重视土壤自身钾素的有效利用。与撂荒土壤相比,早作土壤非交换性钾的增加速率更快。这可能主要是由于施肥引起的。当地农民为了缩短蔬菜的生长周期和维持高产,化肥的年施用量通常为水稻生产的 2 倍以上。早作土壤非交换性钾的增加速率远超撂荒土壤,这表明早作过程中钾肥的施用量过大,要注意节肥。需要特别指出的是当前研究仍然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的有效性。需要更多的工作来精确度量紫色水稻土利用方式改变后土壤钾释放的动力学特征和影响机制,以促进土壤钾素的释放并加以合理利用。

表 3 耕作层土壤属性和不同形态钾之间的相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between soil properties and the extracted K in the cultivation horizon

	有机质 SOM	黏粒 Clay	蒙脱石 Montmorillonite	蛭石 Vermiculite	伊利石 Illite	高岭石 Kaolinite	绿泥石 Chlorite	石英 Quartz	地下水位 Water table
水溶性钾 ^①	0.103	-0.178	0.549	-0.596	-0.092	0.247	0.227	-0.046	-0.824**
交换性钾 ^②	-0.817**	0.540	-0.301	0.065	0.527	-0.395	-0.539	-0.036	0.108
非交换性钾 ^③	-0.879**	0.660*	-0.526	0.218	0.653*	-0.673*	-0.806**	0.199	0.428

①Water-soluble K, ②Exchangeable K, ③Non-exchangeable K.

4 结 论

紫色水稻土利用方式改变后土壤水溶性钾与土壤水分状况密切相关。撂荒和早作均会降低土壤水溶性钾含量,改为鱼塘能提升土壤水溶性钾含量。

3 种土地利用方式均能提升土壤交换性钾和非交换性钾含量,提升幅度和提升速率为早作>撂荒>养鱼。紫色水稻土改为鱼塘 5 a 后或撂荒 12 a 后土壤不同形态钾之间可以达到大致平衡,而早作 20 a 后土壤不同形态钾之间仍未达到大致平衡。紫色水稻土利

用方式改变后土壤黏粒含量和黏粒矿物的动态变化与土壤中的钾平衡有关。土地利用方式改变导致的 SOM 损失可能会影响土壤钾的赋存形态和动态平衡,进而引起土壤黏粒的富集和黏粒矿物的变化,今后要加强这些方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] de Xu D, Guo S L, Xie F T, et al. The impact of rural laborer migration and household structure on household land use arrangements in mountainous areas of Sichuan Province, China[J]. *Habitat International*, 2017, 70: 72—80.
- [2] Xu D D, Zhang J F, Rasul G, et al. Household livelihood strategies and dependence on agriculture in the mountainous settlements in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(5): 4850—4869.
- [3] Xu D D, Zhang J F, Xie F T, et al. Influential factors in employment location selection based on “push-pull” migration theory—A case study in Three Gorges Reservoir Area in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12 (6): 1562—1581.
- [4] China National Statistical Bureau (CNSB). China yearbook of household survey in 2014 [M]. Beijing: China Statistical Press. [中国国家统计局. 中国住户调查年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.]
- [5] Department of Agriculture and Animal Husbandry of Sichuan Province, Soil Survey Office of Sichuan Province. Soil species in Sichuan [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. [四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [6] Gong Z T, Chen Z C, Shi X Z, et al. Chinese Soil Taxonomy: Theory-Methodology-Practice [M]. Beijing: Science Press, 1999.[龚子同, 陈志诚, 史学正, 等. 中国土壤系统分类: 理论方法实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [7] 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, 237/238: 199—210.
- [8] Moritsuka N, Nishikawa T, Yamamoto S, et al. Changes in soil physicochemical properties following land use change from paddy fields to greenhouse and upland fields in the southeastern basin of Dianchi Lake, Yunnan Province, China[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(2): 169—176.
- [9] Zhang Q, Li Z W, Huang B, et al. Effect of land use pattern change from paddy soil to vegetable soil on the adsorption-desorption of cadmium by soil aggregates[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (3): 2734—2743.
- [10] Han G Z, Zhang G L, Huang L M, et al. Responses of organic carbon and total nitrogen in hydric anthrosols to variation of water regime and cultivation in age[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6): 1300—1308. [韩光中, 张甘霖, 黄来明, 等. 水耕人为土有机碳和全氮对水分状况和耕作时间的响应[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (6): 1300—1308.]
- [11] Wu S R, Wei J, Qiu L X, et al. Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of farmland soil in fujian province based on the large scale soil database [J]. *Acta Pedologic Sinica*, 2022, 59 (5): 1293—1305. [吴世蓉, 位佳, 邱龙霞, 等. 基于大比例尺数据库的福建省耕地土壤固碳速率和潜力研究[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (5): 1293—1305.]
- [12] Wang A H, Su Y R, Li Y, et al. Characteristics of mineralization of soil organic carbon in paddy and upland with rice straw incorporated and differences [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (5): 979—987. [王媛华, 苏以荣, 李杨, 等. 稻草还田条件下水田和旱地土壤有机碳矿化特征与差异[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (5): 979—987.]
- [13] Huang S, Rui W Y, Peng X X, et al. Responses of soil organic carbon content and fractions to land-use conversion from paddy field to upland[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4): 1146—1151. [黄山, 芮雯奕, 彭现宪, 等. 稻田转变为旱地土壤有机碳含量及其组分的变化特征[J]. *环境科学*, 2009, 30 (4): 1146—1151.]
- [14] 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.]
- [15] Egnér H, Riehm H, Domingo W R. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung [J]. *Kungl Lantbr Högsk Ann*, 1960, 26: 199—215.
- [16] Brown G, Brindley G W. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification[M]//Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification. Colchester and London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 1980.
- [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] 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.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Ehlers W, Gebhardt H, Meyer B. K exchange and crystallographic behaviour of three-layer clay minerals (Contribution to K exchange in soil) [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1967, 117: 29—53.
- [23] Hinsinger P, Elsass F, Jaillard B, et al. Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral *Mica* in the rhizosphere of rape[J]. *Journal of Soil Science*, 1993, 44 (3): 535—545.
- [24] Hinsinger P, Jaillard B. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass[J]. *Journal of Soil Science*, 1993, 44 (3): 525—534.
- [25] Officer S J, Tillman R W, Palmer A S, et al. Variability of clay mineralogy in two New Zealand steep-land topsoils under pasture[J]. *Geoderma*, 2006, 132 (3/4): 427—440.
- [26] 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.

(责任编辑：檀满枝)