

袁鹏丽,覃佳宇,周雨茜,等.旱改水型耕地红壤团聚体稳定性及影响因素研究[J].华中农业大学学报,2025,44(4):47-57.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.005

## 旱改水型耕地红壤团聚体稳定性及影响因素研究

袁鹏丽,覃佳宇,周雨茜,龙新路,周勇,江立庚

广西高校作物栽培与生理重点实验室/广西农业环境与农产品安全重点实验室/广西大学农学院,南宁 530004

**摘要** 为探究南方红壤地区旱地改水田(旱改水)对土壤团聚体稳定性的影响,在广西典型旱改水地区选取传统旱地(HS0)、旱改水1 a稻田(HS1)、旱改水5 a稻田(HS5)和当地传统稻田(CK),采用干筛法和湿筛法对比分析耕层土壤团聚体性状。结果显示:传统旱地和实施旱改水后,HS0、HS1、HS5和CK处理下机械团聚体和水稳团聚体中 $>0.25$  mm土壤团聚体含量( $R_{>0.25}$ )分别为90.0%、94.0%、95.8%、98.1%和81.0%、70.6%、76.0%、95.4%;平均质量直径(mean weight diameter,  $\Phi_{MWD}$ )分别为3.35、3.63、3.69、4.73 mm和2.25、0.94、1.54、4.63 mm。与HS0相比较,HS1处理的水稳团聚体中几何平均直径(geometric mean diameter,  $\Phi_{GMD}$ )降低了68%。与HS0相比较, $>0.25$  mm团聚体的破坏率(percentage of aggregate destruction,  $r_{PAD}$ )随旱改水年限先增长后减小,HS1和HS5分别增加61%和34%,而CK显著降低76%。结构方程模型和随机森林分析结果表明,土壤阳离子交换量和全氮含量是影响旱改水农田耕层土壤团聚体稳定的重要因素。

**关键词** 旱改水;红壤;耕地;土壤团聚体;团聚体稳定性;土壤结构

**中图分类号** S151.9; S152.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0047-11

近年来随着我国城市化和工业化的快速发展,大量的耕地变成非农业用地,导致了耕地损失<sup>[1]</sup>。据报道,2002—2010年我国共计增加349万 $\text{hm}^2$ 建设用地,在此期间每年损失耕地约20万 $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>,严重威胁到我国的耕地面积和粮食安全。2015年国家出台了将旱地改造成水田(旱改水)的土地治理政策,要求非农建设用地经批准占用耕地后,必须有新的耕地面积来补充被占用的耕地面积<sup>[3]</sup>。近几年在南方红壤地区旱改水成为应对耕地过快损失和维护粮食安全的土地整治主要模式<sup>[4-6]</sup>。

土壤团聚体是组成土壤结构的基本单元,其数量与分布可以调控土壤肥力、保水能力和通气性,同时对提高土壤生产能力、抵抗外界侵蚀能力、促进作物生长和防治土壤退化等方面起着重要作用<sup>[6]</sup>。研究发现,土地利用变化会导致团聚体稳定性发生改变,如林地转变成农田后,随着作物种植年限的增加土壤团聚体稳定性下降、土壤质量退化<sup>[7]</sup>。肖盛杨等<sup>[8]</sup>研究发现,林草间作模式对防止喀斯特峡谷区土壤结构退化具有重要作用。团聚体稳定性的提高与适宜的粒径分布对于减少土壤退化、增加土壤肥力

具有重要意义。当前,评价团聚体稳定性的指标主要有团聚体平均质量直径(mean weight diameter,  $\Phi_{MWD}$ )、几何平均直径(geometric mean diameter,  $\Phi_{GMD}$ )、稳定性团聚体( $R_{>0.25}$ )比例、团聚体破坏率(percentage of aggregate destruction,  $r_{PAD}$ )以及分形维数等<sup>[9]</sup>。一般来说, $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GMD}$ 以及 $R_{>0.25}$ 比率越大,团聚体的稳定性和分布状况也越好<sup>[10]</sup>;而 $r_{PAD}$ 和分形维数越小,则土壤结构稳定性越强,抗侵蚀能力越强<sup>[11]</sup>。

南方红壤区气候独特、自然生态条件优越,成为水稻优生区,旱地改水田能够有效促进耕地资源可持续利用,经过合理的规划改造,旱改水田能提高土地生产能力、有效改善农业生产条件<sup>[12]</sup>。然而,在南方红壤地区,旱地大多为高度不同的坡耕地,在旱改水土地整治过程中,需要机械扰动土壤,将原来不平坦的旱地改为平坦的水田便于水田耕种管理。在土地整治工程过程中,耕作致密的土壤颗粒结构变得松散,土壤团聚体遭到破坏,土壤结构退化,土壤保水保肥性能下降。生产上常出现灌水1~2 d后田面明水层消失、稻田出现龟裂板结现象,造成水稻秧苗

收稿日期:2024-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(32160500)

袁鹏丽, E-mail: pengliyuan@gxu.edu.cn

通信作者: 江立庚, E-mail: jiang@gxu.edu.cn

僵苗坐蔸、营养缺乏、产量下降等一系列生产问题,制约着水稻生产和旱改水田的可持续发展<sup>[13]</sup>。目前对旱改水型耕地红壤质量的研究多集中在短期旱改水后农田土壤有机碳库和温室气体排放状况方面<sup>[14-15]</sup>,而旱改水后,以团聚体稳定性为代表的土壤质量变化过程及变化趋势鲜有探究,目前仍然缺乏对旱改水型耕地红壤质量变化的全面认识。本研究在广西典型旱改水地区选取传统旱地(HS0)、旱改水1 a稻田(HS1)、旱改水5 a稻田(HS5)和当地传统稻田(CK),采用干筛法和湿筛法对比分析耕层土壤团聚体性状,探讨旱改水农田土壤的理化性质与团聚体稳定性的关系,以期对南方旱改水型耕地红壤可持续生产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验地位于广西壮族自治区南宁市西乡塘区双定镇(23°00'N, 108°12'E),属于盆地丘陵交接地带,平均海拔32 m,年平均气温为21.6℃,年平均降水量为1 200 mm,霜少无雪,气候温和,夏长冬短。该地属于亚热带季风气候,其特点是日照充足、降雨充沛。近年来双定镇旱改水型耕地面积迅速增加,2023年约200 hm<sup>2</sup>,当地的旱改水型耕地主要是甘蔗田通过土地整治转变为稻田。该地区土壤类型为潮土,砂壤质地,成土母质为河流冲积物。

### 1.2 样品采集与方法

采集时间为2023年2月,选择自然生态条件相同,当地传统的甘蔗田(HS0)、旱改水年限分别为1 a的新稻田(HS1)、旱改水5 a的稻田(HS5)和当地连续种植水稻30 a以上的传统稻田(CK)作为研究对象,每个年限稻田选取3个田块作为试验重复。最近3 a该地区稻田每年种植1季中稻,水稻收获后农田一直处于休闲期,到第2年的5月再重新种植水稻。通过调查走访农户,了解水稻生产过程中的生产资料投入和田间管理情况。水稻品种为广粮香2号,HS1、HS5和CK处理的水稻产量分别为3 000、4 600和6 000 kg/hm<sup>2</sup>。在水稻生长期施肥管理为尿素(46%N) 326 kg/hm<sup>2</sup>、过磷酸钙(12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 460 kg/hm<sup>2</sup>、氯化钾(60% K<sub>2</sub>O) 200 kg/hm<sup>2</sup>。水稻收获后,所有处理的秸秆采用原地全量覆盖还田方式,HS1、HS5和CK处理的秸秆还田量分别为6 000、8 000和9 000 kg/hm<sup>2</sup>,在第2年水稻种植前进行翻压耙地。其他田间管理遵循当地常规管理措施进行。

于水稻收获后进行取样,在每个田块选取5个点,采用“S”形五点取样法挖取土壤剖面,按照0~10、10~20、20~30 cm逐层采集原状土,为防止原状土在运输过程中受外力挤压破坏,将土壤样品装入硬质材料盒中保存。将所采集土样运回室内,去除碎石以及动植物残体,将原状土中沿着土壤裂纹分离成直径大约为2 cm的土块,在阴凉处自然风干备用。土壤样品一部分用于团聚体筛分,另外部分用于测定土壤理化性质。本研究中农田土壤基本理化性质详见表1。

### 1.3 样品分析

土壤样品团聚体组成测定分别用干筛法和湿筛法。干筛时称取200 g风干土,用孔径分别为2.00、0.25、0.053 mm的套筛,在振动筛分仪上(ZBSX-92A型,河北同力仪器设备有限公司)以30次/min筛分2 min,将留在每级筛子上的团聚体称质量,计算各级团聚体占土样总量的百分含量。在湿筛时先将土壤样品充分润湿5 min后,再用孔径分别为2.00、0.25、0.053 mm的套筛,在土壤团聚体分析仪(TTF-100型,浙江省上虞市舜龙实验器厂)上以30次/min筛分30 min(振幅5 cm)。筛分完成后将留在各级筛孔上的团聚体用水洗入铝盒中,在40℃烘干至质量恒定后称质量,计算水稳性团聚体组成。其中<0.053 mm的部分用差减法计算。

土壤有机碳、土壤全氮分别采用硫酸-重铬酸钾加热法和凯氏定氮法测定,样品的机械组成采用比重计法测定。

### 1.4 土壤团聚体评价

土壤大团聚体机械稳定性及水稳性特征可根据公式(1)计算:

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, $R_{>0.25}$ 为大团聚体含量,%; $M_{>0.25}$ 为>0.25 mm的团聚体质量,g; $M_0$ 为全部粒级土粒质量之和,g。

土壤团聚体平均质量直径( $\varphi_{MWD}$ )、几何平均直径( $\varphi_{GMD}$ )的计算:

$$W_i = \frac{M_i}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\bar{d}_i = \frac{N_{\max} + N_{\min}}{2} \quad (3)$$

$$\Phi_{MWD} = \sum_{i=1}^n W_i \bar{d}_i \quad (4)$$

$$\Phi_{GMD} = e^{\left\{ \sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{d}_i \right\}} \quad (5)$$

式(2)~(5)中, $W_i$ 为第*i*粒级团聚体的质量比

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil treatments

处理 Treatments	土壤深度/cm Soil layer	pH	有机碳/(g/kg) Soil organic carbon(SOC)	全氮/% Total N (TN)	阳离子交换量/ (cmol/kg) Cation ex- change capacity(CEC)	砂粒/% Sand (2.0~0.02 mm)	粉粒/% Silt (0.02~0.002 mm)	黏粒/% Clay (<0.002 mm)
HS0	0~10	5.48	9.33	0.052	8.27	62.3	7.7	30.0
	10~20	5.58	8.36	0.030	7.29	56.2	5.8	38.0
	20~30	5.62	5.36	0.020	7.45	51.7	6.3	42.0
	0~30	5.56	7.68	0.034	7.67	56.7	6.6	36.7
HS1	0~10	5.94	8.11	0.063	10.93	80.0	1.2	18.8
	10~20	6.11	2.51	0.024	8.40	77.7	2.5	19.8
	20~30	6.14	4.77	0.030	11.93	74.3	3.9	21.8
	0~30	6.06	5.13	0.039	10.42	77.3	2.5	20.1
HS5	0~10	7.42	9.65	0.068	9.38	57.1	5.8	37.1
	10~20	7.72	8.91	0.067	9.55	65.7	2.0	32.3
	20~30	7.59	8.71	0.064	8.62	57.0	5.2	37.8
	0~30	7.58	9.09	0.066	9.18	59.9	4.3	35.7
CK	0~10	7.2	18.90	0.104	15.29	67.0	12.7	20.3
	10~20	7.46	20.10	0.111	13.86	69.7	9.9	20.4
	20~30	7.71	6.20	0.080	14.59	77.1	3.4	19.5
	0~30	7.46	15.10	0.098	14.58	71.3	8.7	20.1

注:HS0、HS1、HS5 和 CK 分别表示传统蔗田、旱改水 1 a 稻田、旱改水 5 年稻田和种植水稻 30 年以上的传统稻田。0~30 cm 土层中各指标值是取 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层的平均值。下同。Note:HS0, HS1, HS5 and CK denote traditional sugarcane field, one-year rice fields converted from dry-land to paddy field, five-year rice fields converted from dry-land to paddy and traditional rice fields grown for more than 30 years, respectively. The values of each index in the 0-30 cm soil layer are the average values of 0-10, 10-20, and 20-30 cm soil layers. The same as below.

例,%; $M_i$ 为*i*级土壤团聚体质量,g; $\bar{d}_i$ 为*i*级土壤团聚体的平均粒径,mm。 $N_{\max}$ 为某粒级上限; $N_{\min}$ 为某粒级下限; $n$ 为粒级数量。

土壤分型维数( $D$ )的计算采用杨培岭等<sup>[16]</sup>的推导公式:

$$D=3-\frac{\lg(W_i/M_0)}{\lg[\bar{d}_i/d_{\max}]}$$

(6)

式(6)中, $d_{\max}$ 为最大粒级土壤团聚体的平均直径,mm。

团聚体破坏率( $r_{\text{PAD}}$ )

$$r_{\text{PAD}}=\frac{R_{>0.25,\text{m}}-R_{>0.25,\text{w}}}{DR_{>0.25}}\times 100\%$$

(7)

式(7)中, $R_{>0.25,\text{m}}$ 表示大于 0.25 mm 机械团聚体所占比重,%; $R_{>0.25,\text{w}}$ 表示大于 0.25 mm 水稳性团聚体所占比重,%。

1.5 数据分析方法

数据整理在 Excel 2018 进行。使用 R 语言进行方差分析,多重比较采用 Duncan’s 检验。使用 R 软件中的 Lavaan 软件包进行结构方程建模。随机森林是使用 R 软件(版本 4.1.1, R Core Team)中的 R “randomForest” “randomforestinterpreter” 和 “rfPer-

mute”包执行。使用 Origin2019 软件作图。

2 结果与分析

2.1 旱改水型耕地红壤机械稳定性团聚体变化状况

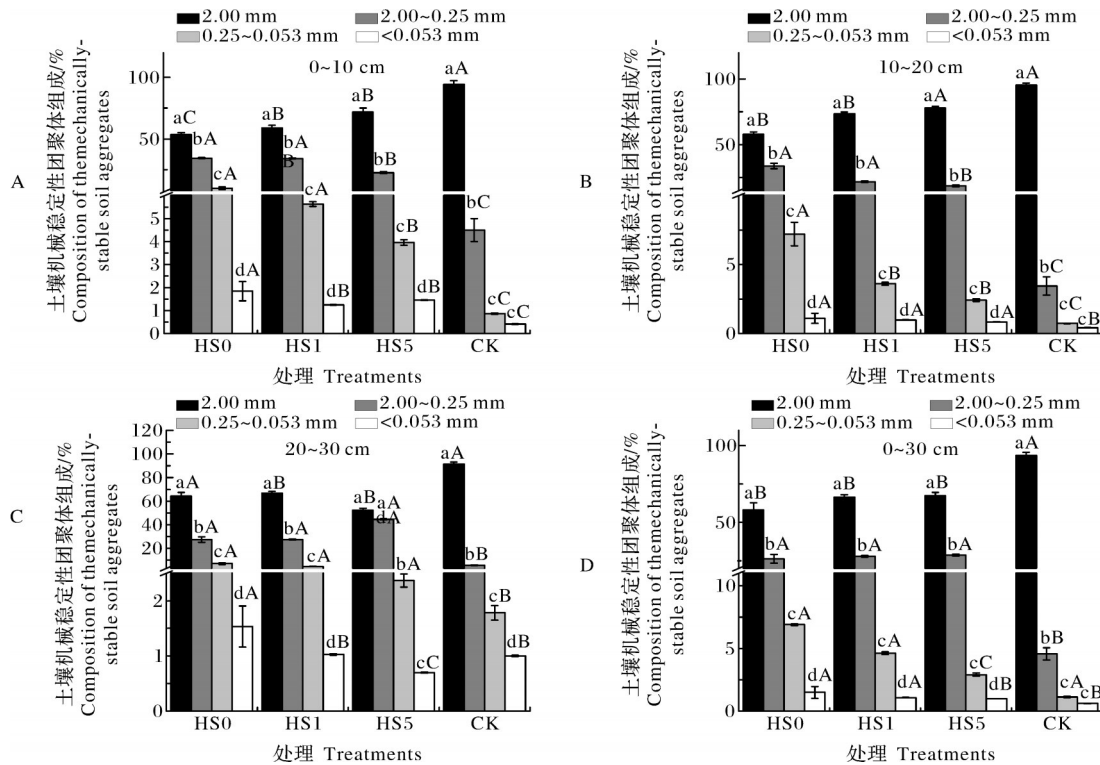
由图 1 可见,在 0~10 cm 土层,传统蔗田(HS0)、旱改水 1 a 的稻田(HS1)、旱改水 5 a 的稻田(HS5)和连续种植水稻 30 a 以上的传统稻田(CK)中>2.00 mm 的大团聚体和 2.00~0.25 mm 较大团聚体分别占总团聚体的 53.6%、58.9%、71.9%、94.2% 和 34.5%、34.0%、22.7%、4.5%,各处理土壤干筛团聚体以直径>2.00 mm 的大团聚体为主,均达到 53% 以上。与 HS0 相比较,HS1、HS5 和 CK 处理中<0.053 mm 的小团聚体含量分别为减少了 32.4%、21.3% 和 77.7%,HS0、HS1 和 HS5 处理显著高于 CK 处理( $P<0.05$ ) (图 1A)。在 20~30 cm 的土层中,HS5 处理中>2.00 mm 团聚体含量最低,而 2.00~0.25 mm 的团聚体含量最高。直径<0.053 mm 的团聚体分布随着旱改水年限的增长,呈现出先减少后增加的趋势(图 1C)。在所有处理的 0~30 cm 耕层中,土壤团聚



体的粒径分布规律与0~10 cm土层的分布规律一致(图1D)。

直径>2.00 mm团聚体在土体中有利于土壤形成较大的孔隙,改善土壤的透气性。直径<0.25 mm的团聚体含量过高,土壤耕层透气性差,微生物活动

降低。在0~30 cm土壤耕层,与HS0相比较,随着旱改水年限的增加,>2.00 mm的团聚体含量逐渐增加,而<0.25 mm的团聚体逐渐减少。从旱地改造为水田初期,耕层土壤农艺质量有明显下降的趋势,20~30 cm土层下降幅度最大。



不同小写字母和同大写字母分别表示相同处理下不同粒级团聚体含量、相同粒级团聚体在不同处理间含量差异显著( $P < 0.05$ )。下同。 Different lowercase letters and different uppercase letters indicate the content of agglomerates of different grain sizes under the same treatment, and the content of agglomerates of the same grain size differed significantly among treatments, respectively ( $P < 0.05$ ). The same as below.

图1 不同年限旱改水土壤耕层机械稳定性团聚体组成

Fig. 1 Composition of the mechanically-stable soil aggregates in the tillage profile of dry-land to paddy field converted soils in different years

由表2可见,随着旱改水年限的增加,直径>0.25 mm的团聚体含量逐渐增加,与HS0处理相比较,HS1、HS5和CK在0~10 cm土层分别显著增加了5.4%、7.0%和11.9%。在0~30 cm整个耕层中>0.25 mm土壤团聚体含量在3个处理中的排列顺序为:HS0<HS1<HS5<CK,且各处理之间的差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。这表明传统蔗田和新的旱改水农田土壤机械团聚稳定性较弱,随着水稻种植年限的增加,土壤团聚体结构逐渐得到改善(表2)。

在0~30 cm的耕层,与HS0相比较,HS1处理的 $\Phi_{GWD}$ 增加8.3%,且差异显著( $P < 0.05$ );在0~30 cm土层,HS0和HS1处理中团聚体 $\Phi_{GWD}$ 值显著低于HS5和CK处理( $P < 0.05$ )。分型维数D在0~30 cm土层中HS0、HS1和HS5显著高于CK,且

HS0中D值最大,而HS1和HS5之间没有显著差异。

## 2.2 旱改水型耕地红壤团聚体水稳定性变化状况

如图2所示,在0~10 cm土层,HS1处理中,直径>2.00 mm的团聚体含量为2.45%,直径为0.25~0.053 mm的微团聚体和<0.053 mm粉黏团聚体含量分别为16.5%和15.2%,占整个团聚体质量的32%左右;在HS5处理中>2.00 mm的团聚体数量有所增加,达19.3%;HS0处理中>2 mm为22.4%;而传统稻田CK中>2.00 mm的团聚体含量显著增高,达89.8%,作为优势粒级(图2A)。与0~10 cm土层相比较,在10~20 cm土层,HS1、HS5和CK处理中>2.00 mm的土壤团聚体含量均有所上升,但各粒级团聚体变化规律与0~10 cm土层基本相似(图

表 2 不同年限旱改水土壤耕层剖面土壤团聚体机械稳定性

Table 2 Mechanically-stable aggregate indexes of soils in the tillage profile of dry-land to paddy field converted soils in different years

处理 Treatments	土壤深度/cm Soil layer	团聚体机械稳定性 Mechanical-stable aggregate			
		$R_{>0.25, m}/\%$	$\Phi_{MWD}/mm$	$\Phi_{GWD}/mm$	$D$
HS0	0~10	88.1bD	3.08cD	2.04cC	1.49bA
	10~20	88.5bD	3.34bD	2.30bD	1.71aA
	20~30	94.6aC	3.72aB	2.85aB	1.57bA
	0~30	90.0D	3.35C	2.36C	1.59A
HS1	0~10	92.9cC	3.33cC	2.31cC	1.07bC
	10~20	95.2aC	3.92aC	3.02aC	1.18aB
	20~30	94.0bC	3.64bB	2.66bB	1.12aB
	0~30	94.00C	3.63B	2.66C	1.12B
HS5	0~10	94.3bB	3.84bB	2.87bB	1.17aB
	10~20	96.4aB	4.10aB	3.31aB	1.22aB
	20~30	96.7aB	3.12cC	2.28cC	1.02bC
	0~30	95.8B	3.687B	2.82B	1.13B
CK	0~10	98.6aA	4.75aA	4.43aA	1.05bD
	10~20	98.8aA	4.81aA	4.53aA	1.04aC
	20~30	97.0bA	4.63aA	4.08bA	1.08cD
	0~30	98.1A	4.73A	4.35A	1.06C

注：不同小写字母和大写字母表示相同处理下不同土层团聚体不同土层和不同处理相同土层团聚体机械稳定性差异显著( $P<0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters and capital letters indicate significant difference at 5% level in mechanically-stable aggregate between different soil layer in the same treatment and between different treatments of the same of soil layer, respectively. The same below.

2B)。在 20~30 cm 土层中,直径 $>0.25$  mm 较大团聚体在 HS0、HS1、HS5 和 CK 处理中的分别占 78.5%、70.4%、77.4% 和 96.3%(图 2C)。在整个 0~

30 cm 土壤耕层内,各处理下直径 $>2.00$  mm 的大团聚体数量随旱改水年限先降低后增加,HS1 处理值最低为 3.07%( $P<0.05$ )(图 2D)。

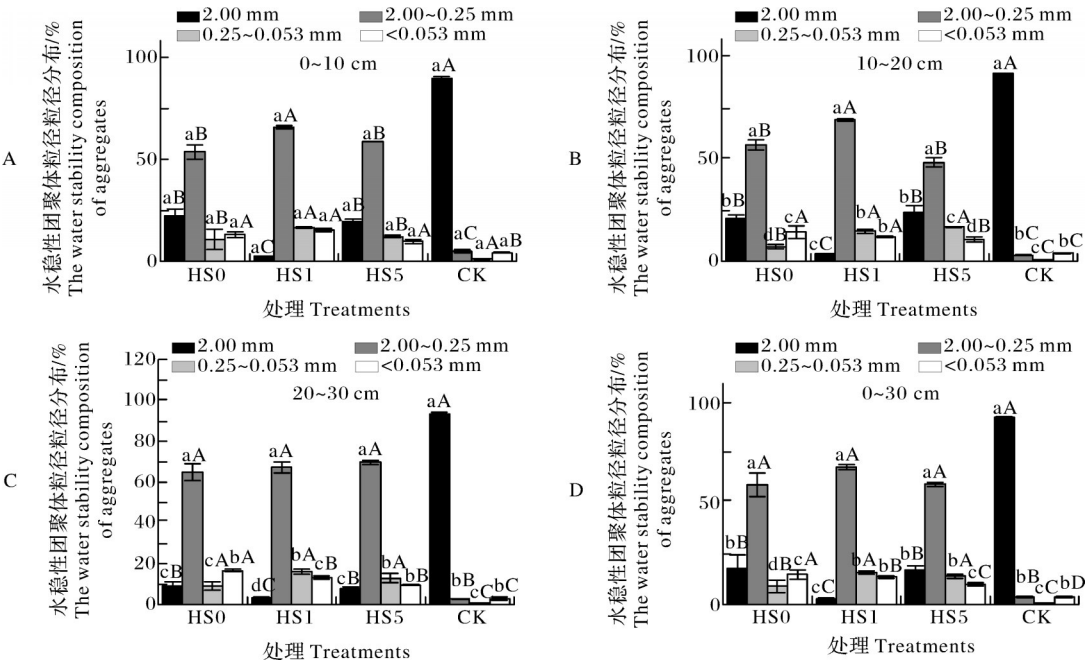


图 2 不同年限旱改水土壤耕层剖面水稳性团聚体组成

Fig. 2 Water-stable soil aggregates composited in the orchards in the tillage profile of dry-land to paddy field converted soils in different years

如表3所示,在0~30 cm耕层内,HS1处理中 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量 $R_{>0.25,w}$ 为68.3%~73.0%,较HS0处理降低了9.4~18.6百分点;HS5处理中 $R_{>0.25,w}$ 变化范围为72.5%~78.0%,与HS0相比较,在0~10 cm土层 $R_{>0.25,w}$ 增加了2.4百分点,在10~20 cm和20~30 cm土层 $R_{>0.25,w}$ 分别减少了10和10.6百分点。随着旱改水年限的增长, $R_{>0.25,w}$ 降低幅度变小。在相同的土层,传统稻田CK的土壤 $\Phi_{MWD}$ 和 $\Phi_{GMD}$ 均显著大于HS0、HS1和HS5处理( $P<0.05$ ),而HS0中 $\Phi_{MWD}$ 和 $\Phi_{GMD}$ 均显著大于HS1和HS5( $P<0.05$ )。从传统蔗田(HS0)到新旱改水田(HS1)再到传统稻田(CK)分形维数 $D$ 呈现显著递减态势( $P<0.05$ )。旱地和新旱改水田土壤水稳性团聚性较传统稻田差,但是随旱改水年限的延长,水稳性团聚稳定性逐渐得到改善。

表3 不同年限旱改水土壤耕层剖面  
水稳性土壤团聚体特征

Table 3 Characteristics of water-stable aggregates in the tillage profile of dry-land to paddy field converted soils in different years.

处理 Treatments	土层深度/ cm Depth	团聚体水稳性 Water-stable aggregate			
		$R_{>0.25,w}/\%$	$\Phi_{MWD}/\text{mm}$	$\Phi_{GWD}/\text{mm}$	$D$
HS0	0~10	76.2cB	1.74bB	1.25bC	1.80aB
	10~20	80.6bB	1.90bB	1.42bB	1.59aB
	20~30	86.6aB	3.12aB	2.38aB	2.86aB
	0~30	81.10C	2.25B	1.67B	1.87A
HS1	0~10	68.3bC	0.89cC	0.47cD	1.23aB
	10~20	73.0aD	0.99aC	0.56aD	1.23bB
	20~30	70.5aC	0.95bD	0.52bC	1.24bB
	0~30	70.6C	0.94D	0.52C	1.20B
HS5	0~10	78.0aB	1.65cB	0.81bB	1.28bA
	10~20	72.5bC	1.77bB	0.88aC	1.20aA
	20~30	77.4aC	1.19aC	0.68cC	1.14bA
	0~30	76.0B	1.54C	0.79C	1.17C
CK	0~10	94.7cA	4.55bA	3.58cA	1.02aB
	10~20	95.2bA	4.64aA	3.77bA	1.09aB
	20~30	96.3aA	4.71aA	4.00aA	1.04aB
	0~30	95.4A	4.63A	3.78A	1.09A

### 2.3 旱改水型耕地红壤团聚体稳定性特征

对比表2和表3,南方红壤地区传统蔗田(HS0)、旱改水1 a的稻田(HS1)和旱改水5 a稻田(HS5)中耕地红壤的团聚体机械稳定性与水稳性的各指标差异大,团聚体机械稳定性中 $R_{>0.25,m}$ 、 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 和 $D$ 值分别是团聚体水稳性的1.10~1.36倍、2.31~3.98

倍、3.35~4.86倍和0.96~1.14倍,而该地区传统的双季稻田(CK)处理中机械稳定性团聚体中 $>0.25$  mm团聚体 $R_{>0.25,m}$ 、 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 和 $D$ 值分别是水稳性团聚体的1.00~1.04倍、0.98~1.05倍、1.02~1.24倍和0.85~0.97倍,说明旱地和旱地改水田耕地土壤团聚体的水力学稳定性较差,而传统的稻田经过多年的水耕熟化作用,土壤团聚体的水力学特性基于稳定,抵抗外界环境的干扰和破坏的能力较强且趋于稳定。

如图3所示,从HS0、HS1、HS5到CK处理下的土壤, $r_{PAD}$ 值先增加后逐渐降低,只是在不同土层其变化幅度有所差异。在0~30 cm耕层,各处理耕地土壤的 $r_{PAD}$ 值排序为:HS1>HS5>HS0>CK,且各处理之间差异显著( $P<0.05$ )。0~10 cm土层中,HS1处理中的 $r_{PAD}$ 值最高为26.69%,分别是HS0、HS5和CK土壤的1.96倍、1.52倍和6.57倍,而在10~20 cm土层,HS1和HS5处理 $r_{PAD}$ 值显著高于HS0和CK处理( $P<0.05$ ),且HS0处理显著高于CK处理( $P<0.05$ )。结果表明,在旱地改水田耕地土壤向传统水稻田土壤转变的过程中0~30 cm土层范围内,农田土壤团聚体水力学稳定性逐渐提高。

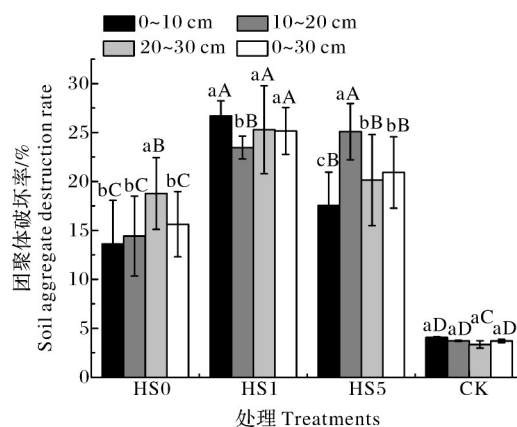


图3 不同年限旱改水土壤耕层剖面  
团聚体破坏率

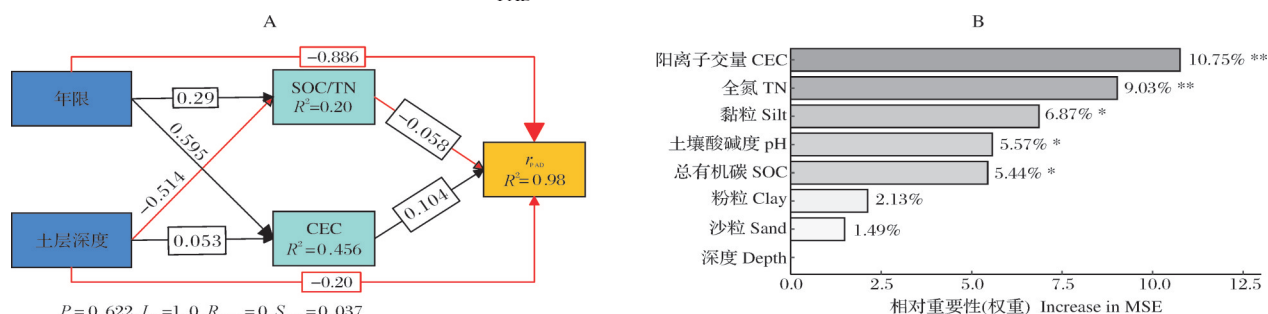
Fig. 3 The rate of agglomeration destruction in the tillage profile of dry-land to paddy field converted soils in different years

### 2.4 旱改水型耕地红壤性质与团聚体破坏率之间的关系

如图4所示,对旱改水型耕地红壤理化性质和土壤团聚体破坏率( $r_{PAD}$ )进行结构方程模型分析和随机森林分析,结果显示,旱改水年限与 $r_{PAD}$ 显著负相关,旱改水年限越短, $r_{PAD}$ 值越大,团聚体越不稳定,破坏率越高。同时,旱改水年限通过调节土壤黏粒含量来间接影响 $r_{PAD}$ 值。用随机森林法分析土壤理

化性质对 $r_{PAD}$ 的影响的权重,结果表明,土壤阳离子交换量(CEC)和土壤全氮含量(TN)对 $r_{PAD}$ 影响最

重要,达到极显著水平,其次为Silt、pH和SOC达到显著水平(图4B)。



A: 结构方程模型 (SEM) 显示不同处理下土壤理化性质和团聚体破坏率之间的关系和相互作用。矩形代表观测变量, 箭头中的数字为归一化路径系数。每个路径系数的大小用箭头的粗细表示, 虚线和实线分别表示在 0.05 水平下显著和不显著。红色表示负相关, 黑色表示正相关。B: 随机森林模型揭示土壤理化性质对团聚体破坏率的影响。\*、\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下显著。A: Structural equation modelling (SEM) showing the relationship and interactions between soil physicochemical properties and aggregate destruction rates under different treatments. The rectangles represent the observed variables and the numbers in the arrows are the normalised path coefficients. The thickness of the arrows is used to indicate the magnitude of the path coefficients, and the solid and dashed lines indicate significance and non-significance at the  $P<0.05$  level, respectively. The black and red lines indicate positive and negative correlations, respectively. B: Random forest model reveals the effect of soil physicochemical properties on agglomerate destruction rate. \*:  $P<0.05$ , \*\*:  $P<0.01$ .

图4 土壤性质与团聚体破坏率之间的关系

Fig.4 Relationship between soil properties and percentage of aggregate destruction

### 3 讨论

#### 3.1 旱改水型耕地红壤团聚体状况评价

在南方红壤地区旱改水后,土壤结构发生变化。主要体现在旱改水 1 a 的稻田(HS1)土壤中直径 $>2.00$  mm 的水稳定团聚体几乎全部被破坏,农田抵御风蚀、水蚀的能力极低,水土流失的风险大大增加。而随着旱改水农田种植水稻的年限增加,旱地土壤逐渐向水田耕地土壤转化,通过长期的水耕熟化作用,旱改水农田耕层土壤的团粒结构得到改善,向熟化的水稻土演变。

本研究结果发现,在 HS0、HS1、HS5 和 CK 处理中 0~10 cm 土壤 pH 值分别为 5.56、5.94、7.42 和 7.20,传统蔗田和新旱改水农田土壤酸化,随着旱改水年限的增加,土壤酸性得到缓解。在旱改水过程中,土层扰动较大,大部分地区较少采用土层剥离和回填技术<sup>[17]</sup>,更多的是将不平整的坡耕地通过机械推挖平整,新的旱改水农田没有较为肥沃的耕作层,在旱改水新农田开始种植时,农户会施用大量的化肥来培肥表层土壤,满足当下的作物生长需求,因此造成新旱改水田表层土壤的酸化<sup>[18]</sup>。同时,南方传统的蔗田也由于大量的化学肥料投入导致土壤酸化严重<sup>[19]</sup>。而随着旱改水年限的增加,农田逐渐形成较为肥沃的水田耕层土壤,水稻种植施用的化肥显著减少,土壤的酸性等到缓解。

研究表明,干筛后团聚体中 $>0.25$  mm 的团粒结构的含量( $R_{>0.25}$ )占比越大、 $\Phi_{MWD}$ 和 $\Phi_{GWD}$ 值越高,土壤结构越稳定。但是土壤分型维数 $D$ 值越小,团聚体越稳定,土壤结构越好<sup>[20]</sup>。南方红壤地区旱地土壤耕层质量差,土壤团粒结构较差,传统蔗田和旱改水后农田耕层机械稳定性团聚体 $R_{>0.25,m}$ 、 $\Phi_{MWD}$ 和 $\Phi_{GWD}$ 等值均随旱改水年限的延长而增大,随着土层深度的增加而减小, $D$ 值则相反,这说明旱地和旱改水后土壤团聚体的机械稳定性相对较差,旱改水年限越短机械稳定性越差。在 0~10 cm 土层,HS0、HS1、HS5 和 CK 处理中土壤机械稳定性团聚体 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 均小于 10~20 cm 土层,主要是由于表土层是耕作层,是人类管理农田主要活动的土层,极易翻动,有机质易暴露在空气中,分解速度加快削弱了对团聚体的胶结作用<sup>[21]</sup>。但在 20~30 cm 土层,4 个处理下的机械稳定性团聚体的 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 又显著降低,这表明在更深的土层,有机质的来源降低,有机质含量对土壤团聚体机械稳定性起主导作用<sup>[22]</sup>。在 0~30 cm 土层,HS2 处理相较于 HS1 处理的机械稳定性团聚 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 有所增高但没有显著差异,但 HS0、HS1 和 HS5 处理中 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 均低于 CK 处理且差异显著。这主要是旱改水过程中,对耕层土壤的结构破坏比较严重,在长期的水耕熟化过程中缓慢的形成较为理想的耕层土壤结构。



耕层土壤中水稳性团聚体较大粒径的团粒结构含量越多,土壤结构越稳定,这作为农田土壤抗侵蚀能力的重要指标<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,在干筛后,HS0和HS1和HS5处理的优势粒级分别为 $>2.00$  mm和 $2.00\sim 0.25$  mm粒径的团聚体;但是在湿筛方式下,这3个处理 $>2.00$  mm粒径的团聚体数量急剧下降,仅占团聚体含量的 $2\%\sim 24\%$ , $0.25\sim 0.053$  mm和 $<0.053$  mm粒径团聚体数量显著增加。这表明团聚体在农田淹水环境中抵抗外界破坏的能力减小,在进行湿筛时,90%以上的非水稳性团聚体浸水破裂,转化成为小粒径水稳性团聚体。前人研究表明,人为的干扰和土地利用发生改变均会造成团聚体的水稳性发生较大改变<sup>[24]</sup>。南方红壤地区旱改水后,短时间内土壤水稳性团聚体 $\Phi_{MWD}$ 、 $\Phi_{GWD}$ 和 $R_{>0.25,w}$ 小于传统稻田土壤, $D$ 和 $r_{PAD}$ 值均显著升高,但是随着旱改水年限的增加,农田耕层水稳性团聚体稳定性逐渐得到改善,说明旱改水后,农田土壤短时间内土壤水稳性降低,土壤结构的稳定性、抗侵蚀性能降低,随着旱改水年限的增加,土壤水稳性团聚体的稳定性逐步增强,这与马原等<sup>[25]</sup>对东北黑土旱地改稻田后土壤水稳性团聚体稳定性的研究结果一致。这主要是由于土地整治过程中,外界机械扰动使耕层土壤的水稳性团聚体结构遭到挤压和拉扯,团聚体水稳性遭到破坏;但是随着旱改水后稻田水耕耙耨耕作年限的增加,被破坏的土壤团聚体又在稻田环境下形成较为稳定的水稳性团聚体。另一方面,与旱地相比较,水田的氧化还原反应剧烈,作物残茬与枯枝落叶返还到农田中以有机质的形式储藏起来<sup>[26]</sup>,有机质是团聚体的主要胶结物质之一,随着有机质的增加,粒径较小的土壤团聚体黏结成为粒径较大的团聚体,土壤团聚体结构和团聚体稳定性逐渐变好<sup>[27]</sup>。

### 3.2 土壤团聚体稳定性的影响因素

土壤团聚体是土壤重要的物理结构组成。土壤团聚体能够协调土壤的水肥气热、稳定土壤疏松层等<sup>[28]</sup>。研究表明,90%以上的土壤有机碳储藏在耕层土壤团聚体内<sup>[29]</sup>,而农田耕作活动主要在耕作层进行,因此,有必要探究农田耕作活动对土壤耕层物理结构的影响。Tisdall等<sup>[30]</sup>认为,团聚体的胶结物质从暂时稳定的多糖类物质向短时稳定的菌丝根系类等物质和持久稳定的芳香类物质转变的过程中,团聚体逐渐由微团聚体转变为大团聚体。Regelink等<sup>[31]</sup>认为,土壤中的金属氧化物可以通过影响土壤

矿物氢键、离子交换、晶体结构、比表面积等调控黏土矿物对SOC的吸附,与SOC形成有机-无机复合体的大团聚体结构。不同粒径团聚体之间的相互转化和分布受土地利用方式和农田耕地方式的影响,从旱地转变为水田,外界人为干扰、作物类型、田间施肥、耕作措施和田间小气候等变化均是驱动农田土壤团聚体状况发生改变的动力。与传统稻田相比,南方红壤区旱地、旱改水短期内,0~30 cm土层中SOC、全氮含量和阳离子交换量较低(表1),土壤团聚体形成和发育的环境条件发生改变后,土壤的集聚作用会受到显著影响。

本研究结果表明,CEC、TN、粉粒、pH和SOC显著影响农田土壤团聚稳定性,主要是由于阳离子会在黏土矿物和有机分子之间形成桥键,土壤pH影响团聚体形成、改变矿物表面吸附的有机质厚度和土壤胶体颗粒之间的结合强度<sup>[31]</sup>。红壤中SOC含量的增加伴随着团聚体稳定性的提升,主要是SOC作为有机胶结物质增加了团聚体的稳定性<sup>[32]</sup>。通过干筛法,各处理土壤中 $>2.00$  mm的大团聚体质量占全土层质量的60%以上,但湿筛后,HS0、HS1和HS5处理中 $>2.00$  mm的大团聚体数量急剧减少,0~30 cm土层的大团聚体含量 $<5\%$ ,这可能是因为本研究区土壤中所含的SOC量少,SOC主要是不稳定胶结剂的组分,泡水后极易流失<sup>[33]</sup>。大量研究表明,土壤团聚体水稳性增强主要与有机质含量上升密切相关<sup>[33-36]</sup>,有机质数量减少使得团聚体稳定性降低,物理性质变劣,因此,增加农田土壤有机质对促进团聚体稳定、防止土壤侵蚀有重要意义。

研究者认为,土壤质地是重要的土壤结构形成因素,土壤质地颗粒表面与有机聚合物配位基团之间的多价阳离子桥键是土壤团聚体形成的重要机制<sup>[35]</sup>。土壤质地中的黏粒和粉粒也是团聚体主要的胶结物质,与土壤团聚体的稳定性密切相关。本研究表明,土壤粉粒含量与团聚体破坏率 $r_{PAD}$ 密切相关(图4),这与张磊等<sup>[37]</sup>的研究结果相似。这是由于有机质含量丰富时,砂粒、粉粒可以通过黏团和有机质结合并形成良好的团粒结构,团粒结构良好的土壤具有储水、透水、通气性能佳的优点;相反,缺乏有机质,团粒结构不稳定,分散的粉黏粒等会堵塞土壤的孔隙,降低土壤的通气、透水功能,造成雨量小时易被冲刷、干时板结的现象<sup>[38]</sup>。本研究中土壤黏粒的含量与团聚体的稳定性有明显的相关关系,这是由于南方红壤地区农田实施旱改水,经过土地整治后



土壤耕层受机械扰动剧烈,外力干扰、土地利用变化通过对耕层土壤黏粒沉降的影响来改变团聚体稳定性。旱改水后农田管理措施和农田土壤环境的改变使得新聚合成的土壤团聚体的发育和形成受到影响。

综上,南方红壤地区通过土地整治工程将旱地改为水田,传统旱地和旱改水1a农田0~30 cm土层土壤水稳性团聚体组成中 $>2.00$  mm粒径的大团聚体数量减少,土壤结构退化,农田土壤抗侵蚀和保水保肥能力变差。但是随着旱改水年限的延长,旱改水5a的农田0~30 cm土层团聚体水稳性、抗侵蚀能力均得到改善。南方红壤区旱改水田土壤团聚体机械稳定性受土壤黏粒含量和有机碳含量显著影响;对土壤水稳性团聚体起重要作用的是土壤阳离子交换量、全氮、土壤粉粒、pH和土壤有机碳。土壤阳离子交换量和pH通过调节土壤团聚体表面阳离子含量来影响黏土矿物及与有机分子之间形成桥键从而影响团聚体形成。全氮和有机碳作为水稳性团聚体主要胶结物质,显著影响团聚体稳定性,粉黏粒起主要调节作用。因此,在南方红壤地区实施旱改水土地整治政策,应该通过施用有机肥等农田管理措施,提高土壤结构稳定性,促进南方旱改水田土壤生产力可持续发展。

## 参考文献 References

- [1] ZHAO Y J. China's land tenure reform: time for a new direction? [J]. China review: an interdisciplinary journal on greater China, 2011, 11: 125-151.
- [2] 严金明. 中国土地利用与规划战略实证研究[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010. YAN J M. An empirical study on land use and planning strategy in China[M]. Beijing: China Land Press, 2010 (in Chinese).
- [3] 王玉莹, 金晓斌, 范业婷, 等. 农村土地整治对促进农业现代化水平的影响分析[J]. 中国土地科学, 2017, 31(8): 69-76. WANG Y Y, JIN X B, FAN Y T, et al. The impact of rural land consolidation program on promoting the level of agricultural modernization[J]. China land sciences, 2017, 31(8): 69-76 (in Chinese with English abstract).
- [4] YU Q W, ZENG Q, YU G M. The influence of land consolidation on biomass and ecological environment[J]. Research journal of applied sciences, engineering and technology, 2014, 7(17): 3656-3662.
- [5] KOLIS K, HIIRONEN J, RIEKKINEN K, et al. Forest land consolidation and its effect on climate[J]. Land use policy, 2017, 61: 536-542.
- [6] 张正峰, 杨红, 谷晓坤. 土地整治对平原区及丘陵区田块利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 1-8. ZHANG Z F, YANG H, GU X K. Effects of land consolidation in Plains and hills on plots use[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [7] SCHWEIZER S A, FISCHER H, HÄRING V, et al. Soil structure breakdown following land use change from forest to maize in Northwest Vietnam [J]. Soil and tillage research, 2017, 166: 10-17.
- [8] 肖盛杨, 舒英格. 土地利用方式对喀斯特峡谷区土壤水稳性团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 73-79. XIAO S Y, SHU Y G. The effects of land usage on water-stable soil aggregates in Karst canyon region[J]. Journal of irrigation and drainage, 2021, 40(4): 73-79 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陈昊, 马帅, 王小治. 土壤团聚体形成和稳定机理研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(2): 150-155. CHEN H, MA S, WANG X Z. Research progress on formation and stability mechanism of soil aggregates[J]. Modern agricultural science and technology, 2023(2): 150-155 (in Chinese with English abstract).
- [10] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347. QI Y C, WANG Y Q, LIU J, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 340-347 (in Chinese with English abstract).
- [11] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 265-270. JIANG M, LIU Y, LIU C, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of soil and water conservation, 2016, 30(6): 265-270 (in Chinese with English abstract).
- [12] 杨卫君, 惠超, 陈雨欣, 等. 生物质炭施用下灌溉农田土壤团聚体稳定性及分型特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 323-329. YANG W J, HUI C, CHEN Y X, et al. Stability and fractal features of soil aggregate in irrigated farmland under bio-char application [J]. Journal of soil and water conservation, 2022, 36(6): 323-329 (in Chinese with English abstract).
- [13] YU D, RAMSEY R D, ZHAO X M, et al. Feasible conversion degree of dryland to paddy field in Jinxian County, Jiangxi Province, China[M]. Geocarto international, 2019, 34(9): 1042-1053.
- [14] 周健平, 卢洁, 兰志斌, 等. 广西来宾市旱改水稻田水稻黄化病因调查与综合诊断[J]. 西南农业学报, 2022, 35(10): 2334-2342. ZHOU J P, LU J, LAN Z B, et al. Etiology survey and comprehensive diagnosis about rice yellowing disease in paddy field transformed from dryland in Laibin City, Guangxi [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2022, 35(10): 2334-2342 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈浮, 李肖肖, 马静, 等. 旱改水型农田整治对土壤碳排放的

- 短期影响[J].生态学报,2021,41(19):7725-7734.CHEN F, LI X X, MA J, et al.Short-term effects of land consolidation of dryland-to-paddy conversion on soil carbon flux[J].Acta ecologica sinica,2021,41(19):7725-7734 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.YANG P L, LUO Y P, SHI Y C.Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J].Chinese science bulletin,1993,38(20):1896-1899 (in Chinese).
- [17] 刘云,李海峰,屠代豪.南昌市非农建设占用耕地耕作层土壤剥离潜力与再利用方向[J].湖北农业科学,2021,60(19):43-48.LIU Y, LI H F, TU D H.Potential evaluation and reuse scheme of plow layer soil-stripping of cultivated land occupied by non-agricultural construction in Nanchang City[J].Hubei agricultural sciences,2021,60(19):43-48 (in Chinese with English abstract).
- [18] 潘彩芳.大新县“旱改水”项目基地水稻种植现状及对策[J].南方农业,2023,17(7):167-169.PAN C F.Present situation and countermeasures of rice planting in Daxin County's "Drought to Change the Water" Project Base[J].South China agriculture,2023,17(7):167-169 (in Chinese with English abstract).
- [19] 谭宏伟,周柳强,谢如林,等.红壤区不同施肥处理对蔗区土壤酸化及甘蔗产量的影响[J].热带作物学报,2014,35(7):1290-1295.TAN H W, ZHOU L Q, XIE R L, et al.Effect of different fertilizers on soil acidification and sugarcane yield in red soil region[J].Chinese journal of tropical crops,2014,35(7):1290-1295 (in Chinese with English abstract).
- [20] LI X X, HUI N, YANG Y J, et al. Short-term effects of land consolidation of dryland-to-paddy conversion on soil CO<sub>2</sub> flux[J/OL]. Journal of environmental management,2021,292,112691 [2024-11-07]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112691>.
- [21] 石宗琳,王加旭,梁化学,等.渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J].土壤学报,2017,54(2):387-399.SHI Z L, WANG J X, LIANG H X, et al.Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei[J].Acta pedologica sinica,2017,54(2):387-399 (in Chinese with English abstract).
- [22] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.LUO X H, WANG Z F, LU C, et al.Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J].Environmental science,2019,40(8):3816-3824 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张钦弟,刘剑荣,杨磊,等.半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J].生态学报,2022,42(22):9057-9068.ZHANG Q D, LIU J R, YANG L, et al.Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J].Acta ecologica sinica,2022,42(22):9057-9068 (in Chinese with English abstract).
- [24] 宛馨雨,王海龙,王月,等.不同土地利用转变和利用方式对土壤团聚体稳定性的影响[J].安徽科技学院学报,2022,36(5):88-95.WAN X Y, WANG H L, WANG Y, et al.Effects of different land use conversion and pattern on soil aggregate stability[J].Journal of Anhui science and technology university,2022,36(5):88-95 (in Chinese with English abstract).
- [25] 马原,迟美静,张玉玲,等.黑土旱地改稻田土壤水稳性团聚体有机碳和全氮的变化特征[J].中国农业科学,2020,53(8):1594-1605.MA Y, CHI M J, ZHANG Y L, et al.Change characteristics of organic carbon and total nitrogen in water-stable aggregate after conversion from upland to paddy field in black soil[J].Scientia agricultura sinica,2020,53(8):1594-1605 (in Chinese with English abstract).
- [26] CHEN X B, HU Y J, XIA Y H, et al.Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils[J].Global change biology,2021,27(11):2478-2490.
- [27] 张斌,张福韬,陈曦,等.土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J].土壤与作物,2022,11(3):235-247.ZHANG B, ZHANG F T, CHEN X, et al.Soil organic matter turnover and controlling mechanisms of mineralogy and aggregation:new insights[J].Soils and crops,2022,11(3):235-247 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.LIU Y L, WANG P, WANG J K.Formation and stability mechanism of soil aggregates:progress and prospect[J].Acta pedologica sinica,2023,60(3):627-643 (in Chinese with English abstract).
- [29] HUANG X, DUAN Y T, TAO Y H, et al.Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon storage in the Beihai coastal wetlands of China[J/OL].Frontiers in marine science,2022,9:890811[2027-11-07].<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.890811>.
- [30] TISDALL J M, OADES J M.The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth[J].Soil research,1980,18(4):423-433.
- [31] REGELINK I C, STOOF C R, ROUSSEVA S, et al.Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J].Geoderma,2015,247:24-37.
- [32] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J].土壤学报,1997,34(4):359-366.ZHANG M K, HE Z L, CHEN G C, et al.Formation of water-stable aggregates in red soils as affected by land use[J].Acta pedologica sinica,1997,34(4):359-366 (in Chinese with English abstract).
- [33] 魏彬萌,王益权,石宗琳,等.渭北苹果园土壤钙素退化状态[J].中国农业科学,2015,48(11):2199-2207.WEI B M, WANG Y Q, SHI Z L, et al.Calcium degradation status of orchard soil in Weibei Region, Shaanxi Province, China[J].Scientia agricultura sinica,2015,48(11):2199-2207 (in Chinese with English abstract).

- [34] 李映雪, 臧真凤, 张瑜, 等. 退耕还草对土壤碳库活度及团聚体活性有机碳组分分布的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 241-249. LI Y X, ZANG Z F, ZHANG Y, et al. Changes in soil carbon pool activity and distribution of labile organic carbon composition in soil aggregates following conversion of farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. Research of soil and water conservation, 2023, 30(5): 241-249 (in Chinese with English abstract).
- [35] 周琦娜, 黄尚书, 林小兵, 等. 耕作方式与有机物投入对旱地红壤水稳性团聚体和作物产量的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 35(2): 76-82. ZHOU Q N, HUANG S S, LIN X B, et al. Effects of tillage methods and organic input on water-stable aggregates and crop yield in upland red soil[J]. Acta agriculturae Jiangxi, 2023, 35(2): 76-82 (in Chinese with English abstract).
- [36] EDWARDS A P, BREMER J M. Microaggregate in soils [J]. Soil science, 1967, 33: 141-163.
- [37] 张磊, 王嘉学, 代云川, 等. 滇东喀斯特地区红裸土表层团聚体稳定性及其影响因素研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 790-796. ZHANG L, WANG J X, DAI Y C H, et al. Study on stability and influential factor on surface-layer aggregates of red bare soil in Karst Area of East Yunnan, China[J]. Soils, 2015, 47(4): 790-796 (in Chinese with English abstract).
- [38] 杨慧, 张连凯, 于爽, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 265-271. YANG H, ZHANG L K, YU S, et al. Effects of different land-uses on the features of water-stable aggregates in Karst and clastic areas in Maocun, Guilin[J]. Carsologica sinica, 2012, 31(3): 265-271 (in Chinese).

## Stability and affecting factors of red soil agglomerates in dryland converted paddy fields

YUAN Pengli, QIN Jiayu, ZHOU Yuxi, LONG Xinlu, ZHOU Yong, JIANG Ligeng

*Guangxi Universities Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/  
Guangxi Key Laboratory of Agricultural Environment and Agricultural Product Safety/  
College of Agronomy, Guangxi University, Nanning 530004, China*

**Abstract** The traditional dryland (HS0), dryland converted paddy field in 1 year (HS1), dryland converted paddy field in 5 year (HS5) and local traditional paddy field (CK) in typical dryland-to-paddy area of Guangxi Zhuang Autonomous Region were selected to study the effects of dryland converted paddy field (dryland-to-paddy) on soil aggregates in southern red soil areas. Methods including dry screening and wet screening were used to compare and analyze the properties of soil aggregates in the tillage layer. The results showed that the content of soil aggregates  $>0.25$  mm ( $R_{>0.25}$ ) in mechanical aggregates and water-stable aggregates in HS0, HS1, HS5 and CK was 90.0%, 94.0%, 95.8%, 98.1% and 81.0%, 70.6%, 76.0% and 95.4% in the traditional arid land and after dryland-to-paddy, with the mean weight diameter ( $\Phi_{MWD}$ ) of 3.35 mm, 3.63 mm, 3.69 mm, 4.73 mm and 2.25 mm, 0.94 mm, 1.54 mm, 4.63 mm, respectively. The geometric mean diameter ( $\Phi_{GMD}$ ) of the water-stable aggregates in HS1 decreased by 68% compared with that in HS0. The percentage of aggregate destruction ( $r_{PAD}$ ) of  $>0.25$  mm aggregate increased first and then decreased with the years of dryland-to-paddy compared with that in HS0, with the increase in HS1 and HS5 by 61% and 34%, while there was a significant decrease of 76% in CK. The results of structural equation model and random forest analyses indicated that the cation exchange capacity (CEC) and the content of total nitrogen (TN) in soil were the important factors affecting the stability of soil aggregates in the tillage layer of dryland converted paddy fields.

**Keywords** dryland converted paddy fields; red soil; arable land; soil aggregates; stability of aggregates; soil structure

(责任编辑: 张志钰)