

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.029; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.029.

盛丰, 沈新霞, 盛鑫斌. 不同粉碎程度的秸秆还田对红壤理化性质和水流运动特征的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 131-139.

Sheng Feng, Shen Xinxia, Sheng Xinbin. Effects of the returned straws with different crushing degrees on the physical and chemical properties and water flow characteristics of red soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 131-139.

## 不同粉碎程度的秸秆还田对红壤理化性质和 水流运动特征的影响

盛丰<sup>1,2</sup>, 沈新霞<sup>1,2</sup>, 盛鑫斌<sup>1,3</sup>

(1.长沙理工大学 水利与环境工程学院, 长沙 410114; 2.水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,  
长沙 410114; 3.洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114)

**摘要:** [目的] 阐明不同粉碎程度的秸秆还田对红壤理化性质和水流运动特征的影响, 为南方红壤区秸秆还田管理提供参考。 [方法] 通过室内进行的秸秆还田试验研究了不同破碎程度(粉末状、3~5 cm 切碎状和 30 cm 整根状)的玉米和水稻秸秆还田对红壤有机质和养分含量、团聚体稳定性、容重和水流运动非均匀系数的影响。 [结果] 3 种秸秆还田处理均增大了秸秆还田层和底土层的土壤有机质含量, 其中玉米和水稻粉末状秸秆还田处理的还田层土壤有机质含量分别增加了 30.84% 和 41.63%; 秸秆还田处理虽有利于增加土壤中氮、磷、钾等营养元素的含量, 但玉米和水稻秸秆还田处理在秸秆腐解初期的土壤铵态氮含量分别降低了 21.49% 和 27.83%、土壤速效磷含量分别降低了 17.62% 和 23.29%, 因此秸秆还田时需要配施氮肥和磷肥以缓解秸秆腐解初期土壤氮磷元素不足; 3 种秸秆还田处理均增大了秸秆还田层的土壤团聚体平均重量直径、降低了土壤容重, 其中玉米和水稻粉末状秸秆还田处理的土壤团聚体平均重量直径分别增加 176.19% 和 200.95%、土壤容重分别降低 7.50% 和 8.33%; 3 种秸秆还田处理均增大了灌溉入渗水流运动的非均匀性, 其中整根状秸秆还田处理整体和侧面优先流通道弯曲系数分别增大了 1.25~2.02 倍和 5.44~6.05 倍。 [结论] 秸秆的粉碎程度越高, 其对还田土壤理化性质的改良越迅速, 但同时也增大了土壤水流运动的非均匀性。

**关键词:** 红壤; 秸秆还田; 土壤有机质; 土壤养分; 土壤结构; 优先流

中图分类号: S156.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0131-09

## Effects of the returned straws with different crushing degrees on the physical and chemical properties and water flow characteristics of red soil

Sheng Feng<sup>1,2</sup>, Shen Xinxia<sup>1,2</sup>, Sheng Xinbin<sup>1,3</sup>

(1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of  
Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Key Laboratory of Water-Sediment Sciences  
and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3.Key Laboratory of  
Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to illustrate the impacts of the returned straws with different crushing degrees on the physical and chemical properties and the characteristics of water flow movement in red soil, and to provide a reference for the management of straw returned to farmland in the red soil zone of southern China. [Methods] Laboratory experiments with different kinds of straws (corn straw and rice straw) and different degrees of straw crushed (10-mesh size powder, 3~5 cm length chopped and 30 cm length chopped) were conducted to study the effects of straw returning to field on soil physical and chemical properties (i. e. organic matter content, ammonia nitrogen content, available phosphorus content, soil bulk density, aggregate stability and available potassium content) and heterogeneous soil water flow characteristics.

收稿日期: 2024-04-20

修回日期: 2024-07-07

接受日期: 2024-07-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(51579020); 湖南省自然科学基金(2022JJ30602)

第一作者: 盛丰(1981—), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 主要从事非饱和带土壤水动力学与水土环境研究。E-mail: fsaint8586@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

**[Results]** All the three kinds of straw returning methods of corn straw and rice straw increased the soil organic matter content in both returning and non-returning soil layers. Specially, the soil organic matter content increased by 30.84% and 41.63% in the returned soil layers of powered corn straw and rice straw returning, respectively. Though all the three kinds of corn straw and rice straw returning methods had the ability in increasing the content of nitrogen, phosphorus and potassium in soil, ammonia nitrogen decreased by 21.49% and 27.83%, and available phosphorus decreased by 17.62% and 23.29%, in the returned soil layers and at the prophase of corn straw and rice straw returning, respectively. Thus, the application of nitrogen and phosphate fertilizer with straw returning was necessary in engineering to alleviate the deficiency of nitrogen and phosphorus elements in soil at the prophase after straw returning. All the three kinds of straw returning methods of corn straw and rice straw increased the average weight diameter of soil aggregates and decreased soil bulk density in returned soil layer. Specially, the average weight diameter of soil aggregates increased by 176.19% and 200.95%, and the soil bulk density decreased by 7.50% and 8.33% in the returned soil layers of powered corn straw and rice straw returning, respectively. All the three kinds of straw returning methods of corn straw and rice straw increased the preferential soil water flow heterogeneity. Specially, the overall and lateral preferential flow heterogeneity coefficient increased by 1.25~2.02 times and 5.44~6.05 times of integral corn straw and rice straw returning, respectively. **[Conclusion]** The higher the degree of straw crushed, the faster it improves the physical and chemical properties of the soil, but it also increases the heterogeneity of water flow movement.

**Keywords:** red soil; straw returning; soil organic matter; soil nutrients; soil structure; soil property; preferential flow

红壤是湖南省的典型土壤类型之一,是区域内主要土地资源,但其质地黏重、易板结、保水性差且容易干旱,加之其酸性和弱酸性特征,降低了红壤的质量和土地生产能力<sup>[1]</sup>。因此,改善红壤的理化性质和持水能力对保障和提高区域农业生产至关重要。中国是世界第一秸秆产量大国,每年的秸秆产量已经超过 7.6 亿 t,占全球秸秆总产量 18.50%<sup>[2]</sup>。我国秸秆种类繁多,主要作物秸秆就有近 20 种,其中以水稻、小麦和玉米三大作物的秸秆产量最多,占到全部秸秆总量的 77.2%<sup>[3]</sup>。自 20 世纪末以来,我国秸秆的主要处理方式都是在农田里直接焚烧;而秸秆焚烧不仅直接造成大量的生物资源损失和严重的大气污染,同时因焚烧产生的烟雾间接造成的交通事故和火灾事故等一系列无法具体统计的损失制约了国家社会发展<sup>[4]</sup>。现在主流的秸秆处理方式是将秸秆直接还田。秸秆还田通常是指农作物收获后,将秸秆以不同的方式返还到田地,使得秸秆中的碳、氮、磷、钾等营养元素得以返还土壤,不仅能够增加土壤养分、培肥土壤,还可以增加土壤有机质含量、改善土壤理化性质、优化农田生态环境、提高作物产量和品质<sup>[5]</sup>。因此,秸秆还田是一种有效的农田培肥措施,不但可以解决秸秆的环境污染问题,也可以促进农村养分资源的循环利用和农业可持续发展,是秸秆资源利用中最

为经济且可持续的方式<sup>[6]</sup>。按还田方式,秸秆还田可分为秸秆直接还田和秸秆间接还田两类;秸秆直接还田主要包括秸秆覆盖还田和秸秆碎粉还田等方式,秸秆间接还田主要包括秸秆过腹还田、秸秆堆腐还田和秸秆炭化还田等方式<sup>[7]</sup>。目前,国内外学者对不同秸秆还田方式的生态环境效应开展了大量的研究,主要涉及土壤理化性质<sup>[8]</sup>、土壤温度和保墒<sup>[9]</sup>、土壤微生物数量及土壤酶活性<sup>[10]</sup>、作物产量<sup>[11]</sup>、温室气体排放<sup>[12]</sup>、水土保持效应等<sup>[13]</sup>方面。对比研究结果显示,秸秆碎粉还田是最简便和有效的一种秸秆还田方式<sup>[14]</sup>。秸秆碎粉还田可直接在田间采用机械一次性作业,在进行秸秆碎粉的同时进行灭茬;随翻耕作业埋入土壤中的粉碎秸秆具有较高的腐解速度,被土壤充分吸收利用后可有效改善土壤的团粒结构和田间理化性质、增加土壤肥力<sup>[7]</sup>。然而,目前有关秸秆碎粉还田的研究主要集中在耕作方式(如免耕、旋耕、深松等)对秸秆还田效应的影响等方面<sup>[15]</sup>,而没有研究秸秆自身的粉碎程度对还田土壤理化性质尤其是对灌水和降雨在土壤中流动结构的影响。而不论是还田的秸秆自身,还是还田秸秆所引起的农田土壤生物化学活性和物质成分的变化,都改变了农田土壤结构和性质,从而增大了入渗水流运动的不确定性并可能促进优先流的发育,但目前国内外对此都还缺乏研

究。优先流是指溶质与水分绕过土壤基质而在土体内的优先通道快速运动的现象<sup>[16]</sup>。由于优先流仅在局部土壤中快速运动,化肥、农药和污染物等来不及降解和过滤便直接进入地下水系统,增加了土壤养分流失和地下水污染的风险。本文拟通过室内模拟秸秆还田试验探究不同粉碎程度的秸秆还田对红壤理化性质以及水流运动特征的影响,以期为湖南红壤区秸秆资源利用与还田管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

为研究不同种类及不同破碎程度的秸秆还田后对红壤理化性质以及水流运动特征的影响,共设计 7 种不同处理的秸秆还田试验,分别为玉米和水稻粉末状秸秆还田处理 YT<sub>1</sub>及 ST<sub>1</sub>、玉米和水稻切碎成3~5 cm 长秸秆还田处理 YT<sub>2</sub>及 ST<sub>2</sub>、玉米和水稻整根状

(长度 30 cm 左右)秸秆还田处理 YT<sub>3</sub>及 ST<sub>3</sub>和不添加秸秆的空白处理 CK。各处理条件下均开展两个重复试验以减少单次试验可能带来的误差。各处理条件设置见表 1。

试验采用室内模拟秸秆还田方法,将秸秆与土壤混合覆盖于人工填充的土柱上层进行灌水试验研究。试验土壤采集于长沙理工大学云塘校区附近,为湖南省典型红壤土,土壤物理和水动力参数见表 2。试验前将采集的土壤过 2 mm 筛并风干至恒重,以备土柱填充使用。为便于观测优先流结构,试验入渗框采用透明有机玻璃板制成,内壁尺寸(长×宽×高)为 0.3 m×0.3 m×0.4 m(图 1)。为保证入渗水顺利排出,预先在多孔混凝土板上铺设 4 层纱网(其中,底部两层为 16 目纱网,在其上再铺设两层 30 目纱网),将入渗框垂直置于纱网之上,然后按 5 cm/层在入渗框内分层填充土壤。

表 1 秸秆还田试验条件设置  
Table 1 Test condition settings for straw returning treatments

处理	秸秆种类	试验所用秸秆形状	单次灌水量/mm	单次灌水量/L	灌水次数/次
YT <sub>1</sub>	玉米	粉末状秸秆	20	1.8	5
YT <sub>2</sub>	玉米	3~5 cm 长的秸秆	20	1.8	5
YT <sub>3</sub>	玉米	整根秸秆(30 cm 长)	20	1.8	5
ST <sub>1</sub>	水稻	粉末状秸秆	20	1.8	5
ST <sub>2</sub>	水稻	3~5 cm 长的秸秆	20	1.8	5
ST <sub>3</sub>	水稻	整根秸秆(30 cm 长)	20	1.8	5
CK			20	1.8	5

表 2 试验用土的物理和水动力性质参数  
Table 2 Physical and hydrodynamic properties of soil for test

土壤质地	粒径分布/%			容重/	总孔隙率/	饱和水力传导度/
	>50 μm	>2~50 μm	<2 μm	(g·cm <sup>-3</sup> )	(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	(cm·d <sup>-1</sup> )
粉质壤土	11.48	63.63	24.89	1.45	0.471	7.3

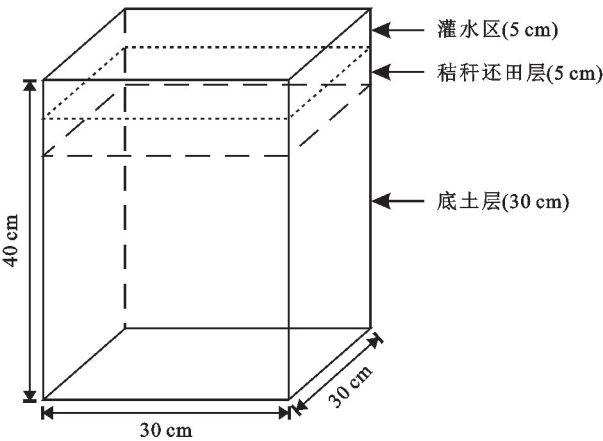


图 1 秸秆还田试验入渗框

Fig. 1 Infiltration frame for experiment with straw returning  
CK 处理土柱仅采用筛分土壤按设计容重(1.45 g/cm<sup>3</sup>,所取土壤在自然条件下的容重)进行填充,均各填充 7 层共 35 cm 高土柱。YT<sub>1</sub>,YT<sub>2</sub>,YT<sub>3</sub>,ST<sub>1</sub>,

ST<sub>2</sub>和 ST<sub>3</sub>处理土柱均先采用筛分后的土壤按设计容重(1.45 g/cm<sup>3</sup>)填充 6 层共 30 cm 高的土柱(即底土层);然后,参考李延亮等的成果<sup>[17]</sup>,按 7 500 kg/hm<sup>2</sup>的秸秆还田量(秸秆全量还田)和 30 kg/hm<sup>2</sup>的秸秆腐熟剂用量分别取 67.5 g 秸秆和 0.252 3 g 秸秆腐熟剂与 6.458 kg 筛分好的土壤混合均匀后填充最后 5 cm 土柱(即秸秆还田层,对应设计容重 1.45 g/cm<sup>3</sup>)。其中,填充 YT<sub>1</sub>,YT<sub>2</sub>,ST<sub>1</sub>及 ST<sub>2</sub>处理土柱最后 5 cm 土层时,先将粉末秸秆(YT<sub>1</sub>和 ST<sub>1</sub>)和切碎秸秆(YT<sub>2</sub>和 ST<sub>2</sub>)分别与筛分土壤混合并经搅拌机拌和均匀后再转移填充至填充土柱中;填充 YT<sub>3</sub>和 ST<sub>3</sub>试验土柱最后 5 cm 土层时,按照一层底土上铺设一层秸秆后再覆盖一层土壤的顺序进行填充。各处理土柱均填充 7 层共 35 cm 高土柱,预留 5 cm 高入渗框用于灌水使用。

为保证秸秆能顺利腐解,从试验第 1 天开始,每 5 d 灌水 1 次,每次灌水为 20 mm(合 1.8 L),共灌水 5 次;在试验开始后的第 26 天,采用 20 mm 深的亚甲基蓝溶液(10.0 g/L)对各试验土柱中的优先流结构进行示踪。为防止土柱表层因灌水出现冲刷坑而造成灌水集中入渗,每次灌水前先在入渗框内铺设防水油布,将灌溉水和染色剂溶液轻轻地注入到防水油布上后再迅速抽去防水油布,使灌溉水和染色剂溶液一次性注入土壤表面。

亚甲基蓝溶液灌入 48 h 后,拍照记录各试验 4 个侧面的染色水流分布模式。侧面拍照结束后,人工开挖水平剖面,剖面间距为 2.5 cm。水平剖面形成后,照相记录亚甲基蓝溶液所显示的各水平剖面上的优先流通道分布模式。照相结束后,用两个环刀在染色区取样,分别用以测定土壤团聚体稳定性和容重分布;同时,用小铝盒在染色区取样,用以测定土壤铵态氮、速效磷、速效钾以及有机质含量分布。

## 1.2 试验指标测定及分析

1.2.1 团聚体稳定性 采用 TPF-100 型团粒结构分析仪对环刀取样的土壤进行湿筛分析<sup>[18]</sup>,根据筛分后各孔径筛网上的土壤团聚体干质量计算采样土壤的团聚体平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)如下<sup>[19]</sup>:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \cdot w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中:MWD 为土壤团聚体平均重量直径(mm); $\bar{x}_i$  为第  $i$  级筛网的平均孔径(mm); $w_i$  为第  $i$  级筛网上的团聚体质量(g)。MWD 越大,表明土壤团聚体的平均直径越大,土壤团聚体越稳定。

1.2.2 容重 采用烘干法测定环刀所取土样的容重。

1.2.3 土壤养分指标 土壤铵态氮、速效磷、速效钾通过 HM-TYA 型土壤养分速测仪测定;土壤有机质含量通过采用燃烧法,利用 SX2-4-10 分体式马弗炉测定。

1.2.4 土壤优先流弯曲系数 采用土壤优先流通道弯曲系数<sup>[20]</sup>描述各试验条件下入渗水流运动的非均匀程度。利用数字图像分析技术<sup>[21]</sup>提取出土壤优先流通道空间分布后,按如下公式计算出各试验土柱内部整体和侧面的优先流通道弯曲系数:

$$C_{v1} = \frac{S_R}{S_H}, \quad C_{v2} = \frac{L_R}{L_H} \quad (2)$$

式中: $C_{v1}$  和  $C_{v2}$  分别为试验土柱内部整体的和侧面的优先流通道弯曲系数; $S_R$  为土柱内部的入渗湿润锋曲面积( $\text{cm}^2$ ); $S_H$  为入渗试验框的水平剖面面积( $\text{cm}^2$ ); $L_R$  为土柱侧面的入渗湿润锋曲线长度(cm); $L_H$  为入渗框的

水平宽度(cm)。 $C_{v1}$  和  $C_{v2}$  越大,表明优先流的非均匀性越强,入渗水流运动的不确定性也越大。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田对土壤有机质含量的影响

表 3 和表 4 显示,玉米和水稻秸秆还田各处理秸秆还田层(0—5 cm)的土壤有机质含量均明显大于底土层(5 cm 以下)的土壤有机质含量,尽管  $YT_2$  和  $YT_3$  处理秸秆还田层的土壤有机质含量与底土层的土壤有机质含量不存在显著性( $p < 0.05$ )差异;而 CK 处理 0—5 cm 深度土层(对应于秸秆还田处理的秸秆还田层)的土壤有机质含量与 5 cm 以下土层(对应于秸秆还田处理的底土层)的土壤有机质含量则近乎完全相等。以上结果表明,3 种秸秆还田处理均有利于增加秸秆还田层中的土壤有机质含量。此外,相对于 CK 处理,3 种秸秆还田处理均增大了秸秆还田层和底土层的土壤有机质含量;其中,玉米秸秆还田处理还田层和底土层的有机质含量增幅分别为 10.98%~30.84% 和 2.27%~6.59%,水稻秸秆还田处理还田层和底土层的有机质含量增幅分别为 8.87%~41.63% 和 2.46%~14.05%。表 3 和表 4 同时显示,秸秆破碎程度越高的处理(按秸秆破碎程度, $YT_1 > YT_2 > YT_3$ ,  $ST_1 > ST_2 > ST_3$ ),其秸秆还田层和底土层的土壤有机质含量均明显更高[其中,水稻秸秆 3 种还田处理间的有机质含量存在显著性( $p < 0.05$ )差异]。以上结果表明,秸秆破碎程度越高越有利于微生物对秸秆的腐解和土壤有机质含量的增加。

表 3 玉米秸秆还田对土壤有机质含量的影响

Table 3 Effects of corn straw returning on soil

处理	organic matter content g/kg	
	0—5 cm	5 cm 以下
$YT_1$	60.63Aa	49.31Ba
$YT_2$	54.02Ab	48.38Aab
$YT_3$	51.43Abc	47.31Abc
CK	46.34Ac	46.26Ac

注:不同大写字母表示同一处理不同土层之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示相同深度土层不同处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),下同。

### 2.2 秸秆还田对土壤养分含量的影响

表 5 和表 6 显示,粉末状( $YT_1$ ,  $ST_1$ )和切碎状( $YT_2$ ,  $ST_2$ )秸秆还田处理秸秆还田层(0—5 cm)的土壤铵态氮、速效磷和速效钾含量均明显高于底土层(5 cm 以下)的土壤铵态氮、速效磷和速效钾含量,尽管其中  $YT_1$  处理秸秆还田层的土壤速效磷含量、 $YT_2$  处理秸秆还田层的土壤速效磷及速效钾含量和  $ST_2$



处理秸秆还田层的土壤铵态氮含量与各处理底土层的相应养分含量之间不存在显著性( $p < 0.05$ )差异;与之相反的是,  $YT_3$  处理秸秆还田层的土壤铵态氮、速效磷和速效钾含量均明显小于底土层的土壤铵态氮、速效磷和速效钾含量,  $ST_3$  处理秸秆还田层的土壤铵态氮和速效磷含量均明显小于底土层的土壤铵态氮和速效磷含量, 但  $ST_3$  处理秸秆还田层的土壤速效钾含量明显大于底土层的土壤速效钾含量。表 5 和表 6 同时显示, 粉末状秸秆还田处理( $YT_1$ ,  $ST_1$ ) 秸秆还田层和底土层的土壤铵态氮、速效磷和速效钾含量均显著( $p < 0.05$ )高于 CK 处理相同土层的相应指标含量; 切碎状玉米秸秆还田处理( $YT_2$ ) 秸秆还田层的土壤铵态氮含量及秸秆还田层和底土层的土壤速效磷和速效钾含量均明显高于 CK 处理相同土层的相应指标含量, 但  $YT_2$  处理底土层的土壤铵态氮含量相对于 CK 处理相同土层的土壤铵态氮含量反而略有下降; 此外, 切碎状水稻秸秆还田处理( $ST_2$ ) 秸秆还田层的土壤铵态氮和速效磷含量及秸秆还田层和底土层的土壤速效钾含量均明显高于 CK 处理

相同土层的相应指标含量, 但  $ST_2$  处理底土层的土壤铵态氮和速效磷含量相对于 CK 处理相同土层的相应指标含量却反而略有下降。与粉末状和切碎状秸秆还田不同的是, 相对于 CK 处理, 玉米和水稻整根秸秆还田处理( $YT_3$  和  $ST_3$ ) 秸秆还田层的土壤铵态氮含量分别减少了 21.49% 和 27.83%、土壤速效磷含量分别减少了 17.62% 和 23.29%, 土壤速效钾含量分别减少了 9.27% 和增加了 23.61%; 而在底土层中, 整根状秸秆还田处理( $YT_3$  和  $ST_3$ ) 与 CK 处理的养分浓度差异较小。

表 4 水稻秸秆还田对土壤有机质含量的影响

Table 4    Effects of rice straw returning on soil		
	organic matter content	g/kg
处理	土壤有机质含量	
	0—5 cm	5 cm 以下
ST <sub>1</sub>	65.63Aa	52.76Ba
ST <sub>2</sub>	53.49Ab	47.54Bb
ST <sub>3</sub>	50.45Ac	47.40Bb
CK	46.34Ad	46.26Ab

表 5 玉米秸秆还田对土壤养分含量的影响

处理	mg/kg					
	铵态氮		速效磷		速效钾	
	0—5 cm	5 cm 以下	0—5 cm	5 cm 以下	0—5 cm	5 cm 以下
$YT_1$	79.08Aa	49.66Ba	46.11Aa	33.28Aa	304.25Aa	233.41Ba
$YT_2$	50.65Ab	35.07Bb	20.51Ab	15.22Ab	228.28Ab	207.36Ab
$YT_3$	31.12Ac	35.04Ab	11.97Ab	14.53Ab	190.70Ac	195.48Ab
CK	39.64Abc	36.28Ab	14.21Ab	14.27Ab	210.18Abc	194.09Ab

表 6 水稻秸秆还田对土壤养分含量的影响

处理	mg/kg					
	铵态氮		速效磷		速效钾	
	0—5 cm	5 cm 以下	0—5 cm	5 cm 以下	0—5 cm	5 cm 以下
$ST_1$	59.10Aa	42.83Ba	37.48Aa	21.33Ba	313.95Aa	258.97Ba
$ST_2$	44.51Ab	35.84Ab	17.52Ab	14.08Bb	263.43Aab	219.33Bb
$ST_3$	28.61Ac	35.97Bb	10.90Ac	14.35Bb	259.80Aab	211.90Bbc
CK	39.64Ab	36.28Ab	14.21Abc	14.27Ab	210.18Ab	194.09Ac

### 2.3 秸秆还田对土壤理化性质的影响

表 7 和表 8 显示, 3 种秸秆还田处理( $YT_1$ ,  $YT_2$ ,  $YT_3$ ,  $ST_1$ ,  $ST_2$  和  $ST_3$ ) 秸秆还田层的土壤团聚体平均重量直径均明显大于底土层的土壤团聚体平均重量直径、秸秆还田层的土壤容重均明显小于底土层的土壤容重; 且粉末状和切碎状秸秆还田处理( $YT_1$ ,  $YT_2$ ,  $ST_1$  和  $ST_2$ ) 秸秆还田层的土壤团聚体平均重量直径均显著( $p < 0.05$ )大于底土层的土壤团聚体平均重量直径、粉末状和切碎状秸秆还田处理( $YT_1$ ,  $YT_2$ ,  $ST_1$  和  $ST_2$ ) 秸秆还田层的土壤容重均显著( $p < 0.05$ )小于底土层的土壤容重; 而整根状秸秆还田处理( $YT_3$  和  $ST_3$ ) 秸秆还田层和底土层中的土壤团

聚体平均重量直径和土壤容重均未表现出在显著性( $p < 0.05$ )差异。表 7 和表 8 同时显示, 相对于 CK 处理, 玉米和水稻秸秆还田处理均增大了还田层的土壤团聚体平均重量直径(增幅分别为 10.48% ~ 176.19% 和 19.05% ~ 200.95%), 降低了土壤容重(降幅分别为 3.33% ~ 8.33% 和 2.50% ~ 7.50%), 且秸秆破碎程度越高处理的土壤团聚体平均重量直径越大, 土壤容重越小。

### 2.4 秸秆还田对土壤水流运动特征的影响

表 9 显示, 3 种秸秆还田处理( $YT_1$ ,  $YT_2$ ,  $YT_3$ ,  $ST_1$ ,  $ST_2$  和  $ST_3$ ) 和 CK 处理条件下, 各土柱整体( $C_{v1}$ ) 和侧面( $C_{v2}$ ) 的优先流通道弯曲系数均大于 1.0, 表明各处理条

件下均有优先流现象产生;此外,玉米和水稻不同破碎程度秸秆还田处理条件下的土壤优先流非均匀程度均表现为整根秸秆还田处理(YT<sub>3</sub>和 ST<sub>3</sub>)>切碎秸秆还田处理(YT<sub>2</sub>和 ST<sub>2</sub>)>粉末状秸秆还田处理(YT<sub>1</sub>和 ST<sub>1</sub>)>非秸秆还田处理(CK),表明秸秆还田后加剧了水流运动非均匀性(整体和侧面优先流通道弯曲系数分别增大了 71.60%~202.40%和 373.20%~605.20%),且秸秆破碎程度越低处理中的土壤优先流运动越明显(整体和侧面优先流通道弯曲系数分别增大 1.25~2.02 倍和 5.44~6.05 倍)。

表 7 玉米秸秆还田对土壤理化性质的影响

Table 7 Effects of corn straw returning on soil structure and properties

处理	团聚体/mm		容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	
	0—5 cm	5 cm 以下	0—5 cm	5 cm 以下
YT <sub>1</sub>	2.90Aa	1.11Ba	1.10Aa	1.23Ba
YT <sub>2</sub>	1.97Aab	1.02Ba	1.16Ab	1.27Bb
YT <sub>3</sub>	1.16Ab	1.11Aa	1.16Aab	1.25Aab
CK	1.05Ab	1.05Aa	1.20Ab	1.29Ab

表 8 水稻秸秆还田对土壤理化性质的影响

Table 8 Effects of rice straw returning on soil structure and properties

处理	团聚体/mm		容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	
	0—5 cm	5 cm 以下	0—5 cm	5 cm 以下
ST <sub>1</sub>	3.16Aa	1.08Ba	1.11Aa	1.22Ba
ST <sub>2</sub>	1.40Aab	1.06Ba	1.16Ab	1.26Bb
ST <sub>3</sub>	1.25Ab	1.13Aa	1.17Ab	1.26Aab
CK	1.05Ab	1.05Aa	1.20Ab	1.29Ab

表 9 玉米和水稻秸秆还田各处理的土壤优先流通道弯曲系数

Table 9 Bending coefficient of preferential flow channel for treatments with corn and rice straw returning

弯曲 系数	玉米			水稻			CK
	YT <sub>1</sub>	YT <sub>2</sub>	YT <sub>3</sub>	ST <sub>1</sub>	ST <sub>2</sub>	ST <sub>3</sub>	
C <sub>v1</sub>	2.147	2.335	2.524	1.993	2.363	3.301	1.277
C <sub>v2</sub>	5.721	6.324	7.980	5.660	6.125	7.366	1.928

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆还田对土壤有机质和养分含量的影响

秸秆在降解过程中,一方面向土壤输送大量有机碳氮物质从而促进微生物的生长繁殖,另一方面秸秆降解过程中会产生多糖、蛋白质、木质素等有机质和氮、磷、钾等营养元素,从而明显提升了还田层的有机质含量和养分含量。秸秆粉碎程度越高,秸秆的表面积越大,微生物越易于粘附在秸秆表面并加速其分解过程。因此,秸秆破碎程度越高越有利于微生物对秸秆的腐解和土壤有机质和养分含量的增加,这与王秋菊等<sup>[22]</sup>研究成果一致。由于本试验设置了每 5 d 一次的灌水来满足秸秆腐解的需水环境,因而表层土壤

中微生物活动所产生的物质会随着入渗水流向深层土壤运动,从而增大了底土层的土壤有机质含量。

秸秆腐解时受到附着在其表面的各类真菌以及微生物活动的影响,而土壤中的氮、磷、钾等营养元素则可以促进微生物活动,因此,秸秆腐解时会吸收土壤中的营养元素以促进其表面微生物的活性<sup>[23]</sup>;而秸秆中也含有丰富的氮、磷、钾元素,这些元素随着秸秆腐解而被释放到土壤中。被分解释放到土壤中的氮、磷、钾等元素不仅弥补了秸秆腐解前期微生物所消耗的土壤中的营养元素,还为土壤补充了更多的营养元素;同时,微生物活动产生的 CO<sub>2</sub>和有机酸等也会促进土壤中氮、磷、钾等元素的释放,使其转化为速效养分<sup>[24-26]</sup>。由于粉末状秸秆的腐解速率最快,在本研究中已经进入到了秸秆腐解补偿土壤养分的阶段,这不仅促进了秸秆还田层内土壤养分含量的显著( $p<0.05$ )增加,同时还有效地促进了底土层土壤养分含量的显著( $p<0.05$ )增加;切碎状秸秆也具有较快的腐解速率但却明显小于粉末状秸秆的腐解速率,因此,切碎状秸秆有效地增加了秸秆还田层内的土壤养分含量,但却未达到显著( $p<0.05$ )提升的效果,尤其是其对底土层土壤养分含量的提升效果不明显;而整根秸秆的腐解速率最为缓慢,试验结束时其仍处于腐解初期这一仍在消耗土壤养分来促进微生物活性的阶段,故整根状秸秆还田处理秸秆还田层内的土壤养分含量要低于空白对照组的土壤养分含量。该结果也表明,秸秆分解初期所消耗的土壤养分中,氮和磷元素占主导地位,因此,工程实际中应在秸秆还田的同时配施氮肥和磷肥以满足秸秆腐解初期微生物活动对氮和磷元素的需求,从而避免秸秆腐解与作物争氮和争磷而导致作物生长不良。由于水稻秸秆的钾元素含量明显高于玉米秸秆(玉米氮磷钾含量比值为 N:P:K=0.89:0.11:0.99,水稻氮磷钾含量比值为 N:P:K=0.82:0.13:1.90)<sup>[5]</sup>,因此,整根水稻秸秆还田处理(ST<sub>3</sub>)仍增加了秸秆还田层和底土层的土壤速效钾含量。由于促进秸秆腐解的微生物仅活动(附着在)在还田层的秸秆周围,且微生物活动所需的营养元素也仅在临近土壤中摄取,因此,整根秸秆还田处理(YT<sub>3</sub>和 ST<sub>3</sub>)秸秆还田层内的土壤养分浓度明显小于 CK 处理相同土层的养分浓度(ST<sub>3</sub>处理的速效钾含量除外),而在底土层中整根秸秆还田处理(YT<sub>3</sub>和 ST<sub>3</sub>)与 CK 处理的养分浓度差异较小(表 5—6)。

#### 3.2 秸秆还田对土壤理化性质和水流运动特征的影响

秸秆降解产生的多糖、蛋白质和有机酸等有机质<sup>[27]</sup>及微生物生长繁殖过程中分泌的胞外聚合物<sup>[28]</sup>具有胶结性能,有利于促进土壤中矿物和黏粒胶结形成团聚体以及小颗粒团聚体团聚成大团聚体<sup>[29]</sup>,从而增大土壤团聚体平均重量直径并降低土

壤容重;而秸秆破碎程度越高越有利于微生物对秸秆的腐解,微生物量及分泌出的多糖物质也越多,因此,秸秆破碎程度越高的处理其土壤团聚体平均重量直径越大、土壤容重越小。

秸秆还田不仅导致上下土层(还田层与底土层)的土壤质地和结构变得不连续,同时秸秆本身的腐解产物及微生物所分泌的胞外聚合物等也改变了秸秆还田层内土壤的表面性质、使之产生斥水性,这些都加剧了入渗水流运动的不确定性并增大了优先流的非均匀性。但不同秸秆还田处理引起土壤优先流运动非均匀程度增大的机制是不同的:对于粉末状秸秆还田处理( $YT_1$ 和 $ST_1$ ),粉末状秸秆埋入土壤不仅使得上下土层的土壤质地变得不连续,而且由于微生物对粉末状秸秆的腐解速率快、秸秆腐解程度高,微生物各项生理活动产生的胞外聚合物等物质更多,这些胞外聚合物附着在土壤颗粒表面使土壤产生斥水性,因此粉末状秸秆还田处理( $YT_1$ 和 $ST_1$ )的土壤水流运动非均匀程度( $YT_1$ 的 $C_{v1}$ 和 $C_{v2}$ 值分别为2.147,5.721, $ST_1$ 的 $C_{v1}$ 和 $C_{v2}$ 值分别为1.993,5.660)明显高于非秸秆还田处理(CK)中的土壤水流运动非均匀程度( $C_{v1}$ 和 $C_{v2}$ 值分别为1.277,1.928);而对于切碎秸秆还田处理( $YT_2$ 和 $ST_2$ )和整根秸秆还田处理( $YT_3$ , $ST_3$ ),微生物对秸秆腐解速率较慢、秸秆腐解程度较低(尤其是 $YT_3$ 和 $ST_3$ ),因此,微生物活动所产生胞外聚合物及秸秆腐解所产生的多糖等物质较少、土壤斥水性相对较弱,但这两种处理中的还田秸秆严重阻碍了入渗水流运动,使得水流只能通过秸秆之间的间隙下渗,因此,切碎秸秆还田处理( $YT_2$ 和 $ST_2$ )和整根秸秆还田处理( $YT_3$ , $ST_3$ )的优先流非均匀程度更高;其中,整根秸秆还田后对入渗水流的阻滞作用最强,因此,其优先流非均匀程度最大( $YT_3$ 的 $C_{v1}$ 和 $C_{v2}$ 值分别为2.524,7.980, $ST_3$ 的 $C_{v1}$ 和 $C_{v2}$ 均值分别为3.301,7.366)。

## 4 结论

(1) 3种不同粉碎程度的秸秆还田后均增大了土壤有机质含量和土壤团聚体稳定性、降低了土壤容重。其中,还田层中的有机质含量增加了8.87%~41.63%、土壤团聚体平均重量直径增大了10.48%~200.95%、土壤容重降低了2.50%~8.33%。

(2) 秸秆还田虽可增加土壤养分含量,但在还田初期会引起土壤氮和磷元素含量下降。因此,为避免秸秆腐解与作物争氮和争磷而导致作物生长不良,应在秸秆还田的同时配施氮肥和磷肥以满足秸秆腐解初期微生物活动对氮和磷元素的需求。

(3) 3种不同粉碎程度的秸秆还田后均增大了土壤的异质性和水流运动的非均匀程度。其中,秸秆

还田处理整体和侧面优先流通道弯曲系数分别增大了71.60%~202.40%和373.20%~605.20%;整根状秸秆还田处理的整体和侧面优先流通道弯曲系数增幅均最大。

(4) 粉末状秸秆还田后具有更高的腐解速率,其对土壤有机质和养分含量的增加、土壤团聚体稳定性的提升和容重的降低等作用更为快速和明显。但粉末状秸秆还田后也增大了还田土壤的异质性,其腐解产物增大了土壤的斥水性,因此,粉末状秸秆还田也增大了土壤水流运动的非均匀性。

## 参考文献(References):

- [1] 张杨珠,周清,黄运湘,等.湖南土壤分类的研究概况与展望[J].湖南农业科学,2014(9):31-34,38.  
Zhang Y Z, Zhou Q, Huang Y X, et al. General situations and prospects of soil classification in Hunan Province[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(9):31-34,38.
- [2] 王红彦,王飞,孙仁华,等.国外农作物秸秆利用政策法规综述及其经验启示[J].农业工程学报,2016,32(16):216-222.  
Wang H Y, Wang F, Sun R H, et al. Policies and regulations of crop straw utilization of foreign countries and its experience and inspiration for China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(16):216-222.
- [3] 高利伟,马林,张卫峰,等.中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J].农业工程学报,2009,25(7):173-179.  
Gao L W, Ma L, Zhang W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(7):173-179.
- [4] 王丽,李雪铭,许妍.中国大陆秸秆露天焚烧的经济损失研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):170-175.  
Wang L, Li X M, Xu Y. The economic losses caused by crop residues burnt in open field in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(2):170-175.
- [5] Beare M H, Wilson P E, Fraser P M, et al. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release, and crop production[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66(3):848-856.
- [6] 崔新卫,张杨珠,吴金水,等.秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J].土壤通报,2014,45(6):1527-1532.  
Cui X W, Zhang Y Z, Wu J S, et al. Research progress on the effects of returning straw to fields on soil quality and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014,45(6):1527-1532.
- [7] 牟廷森,沈海鹰,王东丽,等.玉米秸秆粉碎还田对黑土坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):78-83,91.  
Mou T S, Shen H O, Wang D L, et al. Effects of



- crushed corn straw returning on soil erosion characteristics at the black soil hillslopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(2):78-83,91.
- [8] 裴亚楠,吕卫光,郭涛,等.秸秆还田配施促腐菌剂对土壤团聚体及其养分的影响[J].*应用生态学报*,2023,34(12):3357-3363.
- Pei Y N, Lyu W G, Guo T, et al. Effects of straw-returning combined with application of microbial inoculants on soil aggregates and related nutrients[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(12):3357-3363.
- [9] Yang H S, Feng J X, Zhai S L, et al. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,163:21-31.
- [10] 隗英华,何志刚,刘慧蔚,等.秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应[J].*土壤*,2023,55(6):1223-1229.
- Juan Y H, He Z G, Liu H Y, et al. Regulation effects of straw returning and nitrogen application management on farmland brown soil microbial biomass and enzyme activities[J]. *Soils*, 2023,55(6):1223-1229.
- [11] 黄柯铭,全昊天,韩燕来,等.秸秆还田与减氮对砂姜黑土理化指标及小麦产量的影响[J].*中国农学通报*, 2020,36(8):21-26.
- Huang K M, Tong H T, Han Y L, et al. Straw returning and nitrogen reduction: effects on physicochemical properties of mortar black soil and wheat yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020,36(8):21-26.
- [12] 朱晓晴,安晶,马玲,等.秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J].*中国农业科学*,2020,53(5):977-989.
- Zhu X Q, An J, Ma L, et al. Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emission and maize yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020,53(5):977-989.
- [13] Prosdociimi M, Jordán A, Tarolli P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,547:323-330.
- [14] Chen J, Zheng M J, Pang D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017,16(8):1708-1719.
- [15] 夏颖,冯婷婷,吴茂前,等.秸秆还田技术的演变及其发展趋势[J].*湖北农业科学*,2021,60(21):16-20.
- Xia Y, Feng T T, Wu M Q, et al. The evolution and development trend of straw return to field technology[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021,60(21):16-20.
- [16] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,398(3/4):191-201.
- [17] 李廷亮,王宇峰,王嘉豪,等.我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J].*中国农业科学*,2020,53(23):4835-4854.
- Li T L, Wang Y F, Wang J H, et al. Nutrient resource quantity from main grain crop straw incorporation and its enlightenment on chemical fertilizer reduction in wheat production in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020,53(23):4835-4854.
- [18] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Agronomy Journal*, 1936,28(5):337-351.
- [19] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J].*生态学报*,2018,38(5):1590-1599.
- Qian J, Zhang L P, Wang W Y. The relationship between soil aggregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(5):1590-1599.
- [20] 盛丰,张敏,薛如霞,等.灌溉水中盐分对土壤结构性质及水流运动特征的影响[J].*水利学报*,2019,50(3):346-355.
- Sheng F, Zhang M, Xue R X, et al. Effects of salt in irrigation water on soil structural properties and water flow characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019,50(3):346-355.
- [21] Morris C, Mooney S J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers[J]. *Geoderma*, 2004,118(1/2):133-143.
- [22] 王秋菊,刘峰,焦峰,等.秸秆粉碎集条深埋机械还田对土壤物理性质的影响[J].*农业工程学报*,2019,35(17):43-49.
- Wang Q J, Liu F, Jiao F, et al. Effects of strip-collected chopping and mechanical deep-buried return of straw on physical properties of soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019,35(17):43-49.
- [23] 张倩,张红.秸秆腐解过程中土壤热值与有机养分动态[J].*西北农业学报*,2019,28(7):1158-1168.
- Zhang Q, Zhang H. Dynamics of soil thermal analysis and organic nutrients during straw decomposition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019,28(7):1158-1168.
- [24] 刘熙明,王滢渺,田洪涛,等.秸秆不同还田模式下磷钾释放特征及其对玉米产量的影响[J].*中国土壤与肥料*,2024(1):157-165.
- Liu X M, Wang Y M, Tian H T, et al. Characteristics of straw phosphorus and potassium release and their effects on maize yield under different straw returning patterns[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(1):157-165.



- [25] 韩瑞芸,陈哲,杨世琦.秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J].中国农学通报,2016,32(9):148-154.  
Han R Y, Chen Z, Yang S Q. Effect of straw-returning on nitrogen and phosphorus and water of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 148-154.
- [26] 姜超强,郑青松,祖朝龙.秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1158-1165.  
Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1158-1165.
- [27] 刘威.连续秸秆还田对土壤结构性、养分和有机碳组分的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.  
Liu W. Effect of continuous straw incorporation on soil structure, nutrient and organic carbon fraction[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [28] Morales V L, Parlange J Y, Steenhuis T S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix: a review[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 29-36.
- [29] Ge S Q, Pan Y Z, Zheng L W, et al. Effects of organic matter components and incubation on the cement-based stabilization/solidification characteristics of lead-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2020, 260: 127646.

~~~~~  
(上接第 110 页)

- [29] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].农业工程学报,2009,25(3):37-41.  
Yan F L, Li Z X, Shi Z H, et al. Quantitative relationship between aggregate characteristics of red soil and slope erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 37-41.
- [30] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等.雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J].水利学报,2012,43(9): 1084-1091.  
Wen L L, Zheng F L, Yang Q S, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1084-1091.

~~~~~  
(上接第 121 页)

- [27] 刘新梅,田剑,张昊,等.改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2021,35(1): 326-333,355.  
Liu X M, Tian J, Zhang H, et al. Effects of amendment on aggregates composition and organic carbon content in reclaimed soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 326-333, 355.
- [28] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions[J]. Science, 2022, 377(6606): 603-608.
- [29] 矫丽娜,李志洪,殷程程,等.高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J].土壤学报,2015, 52(3): 665-672.
- Jiao L N, Li Z H, Yin C C, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 665-672.
- [30] Segoli M, De Gryze S, Dou F, et al. AggModel: a soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies [J]. Ecological Modelling, 2013, 263: 1-9.
- [31] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.

~~~~~  
(上接第 130 页)

- [27] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 663: 971-979.
- [28] 李馨欣,王小燕,蔡崇法,等.紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J].水土保持学报,2017,31(5): 25-31.  
Li X X, Wang X Y, Cai C F, et al. Response of soil water content and subsurface flow to rainfall intensity in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 25-31.
- [29] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(6): 582-590.
- [30] Zhang R R, Li M, Yuan X, et al. Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(33): 33963-33975.