

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.12.002

陈胜男,胡钧铭,徐宪立,等.绿肥压青粉垄保护性耕作对土壤水分入渗及其后延效应的影响[J].中国农业气象,2018,39(12):778-785

## 绿肥压青粉垄保护性耕作对土壤水分入渗及其后延效应的影响\*

陈胜男<sup>1,2</sup>, 胡钧铭<sup>2\*\*</sup>, 徐宪立<sup>3</sup>, 韦翔华<sup>1</sup>, 何铁光<sup>2</sup>

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

**摘要:** 研究绿肥压青下粉垄耕作稻田土壤水分入渗规律对完善稻田保护性耕作体系具有重要意义。2016–2017 年, 在广西农业科学院试验田设置粉垄保护性耕作与单免保护性耕作两种耕作模式, 并设不施肥、常规施肥、单倍绿肥压青和双倍绿肥压青 4 种施肥处理, 然后分别于早稻、晚稻收获后用土壤紧实度仪及单环入渗法测量稻田土壤紧实度及稳定入渗速率, 并于晚稻水稻收获后用环刀法测定土壤容重, 以了解绿肥压青下粉垄保护性耕作对当季稻田土壤入渗的影响, 并就其对后季稻田的后延效应影响进行研究。结果表明, 绿肥压青下粉垄保护性耕作对当季和后季稻田 0–15cm 土壤紧实度的影响不明显, 但是可以显著降低 15–30cm 土壤紧实度。同时显著降低了当季及后季土壤表层及耕层的稳定入渗率, 使土壤入渗能力降低, 提高了土壤容重, 降低了土壤孔隙度, 使土壤密实。绿肥压青下粉垄保护性耕作可显著降低后季稻田土壤稳定入渗率和紧实度, 对土壤结构及水分入渗的后延效应明显。

**关键词:** 粉垄; 保护性耕作; 绿肥压青; 土壤紧实度; 土壤入渗

## Effect of Smash Ridging Conservation Tillage with Green Manure on Rice Field Soil Infiltration and Its Delayed Action

CHEN Sheng-nan<sup>1,2</sup>, HU Jun-ming<sup>2</sup>, XU Xian-li<sup>3</sup>, WEI Xiang-hua<sup>1</sup>, HE Tie-guang<sup>2</sup>

(1. Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007; 3. Institute of Subtropical Agriculture, The Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125)

**Abstract:** Studying the smash riding conservation tillage with green manure on rice field soil infiltration is playing an importance role in improving the conservation tillage systems on rice field. In order to find out the effect of smash ridging conservation tillage with green manure on rice field soil infiltration in first season and its delayed action, a field experiment was carried out under 2 tillage modes and 4 manuring modes in Guangxi Academy of Agricultural Sciences from 2016 to 2017. The study measured the soil compaction and soil infiltration by SC-900 and single ring after early and late rice harvesting, and used cutting ring to measure the soil bulk density after late rice harvesting. The results showed that smash ridging conservation tillage with green manure had no significant effect on 0–15cm soil compaction, and can reduce plough layer soil compaction. At the same time, smash ridging conservation tillage with green manure can reduce soil stable infiltration rate in first season and second season, which result to soil infiltration capacity fell. Smash ridging conservation tillage with green manure increased soil bulk density and

\* 收稿日期: 2018-07-23 \*\* 通讯作者。E-mail: jmhu06@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661074); 广西创新驱动重大专项 (桂科 AA17204078-2; 桂科 AA17204037-3); 广西农业科学院创新团队项目 (桂农科 2018YT08); 广西农业科学院科技发展专项 (桂农科 2017JZ09; 桂农科 2017ZX01)

作者简介: 陈胜男 (1996–), 女, 硕士生, 主要从事土壤环境生态研究。E-mail: chensn1996@163.com

共同第一作者: 胡钧铭 (1974–), 博士, 研究员, 主要从事农业有机资源利用与生境调控研究。E-mail: jmhu06@126.com

reduced soil porosity, which made soil ramming. Smash ridging conservation tillage with green manure had significantly effect on soil infiltration and soil structure in second season.

**Key words:** Smash ridging; Conservation tillage; Green manuring; Soil compaction; Soil infiltration

施肥和耕作是提高作物产量的重要措施。20 世纪以来,随着人口和工业迅猛发展,愈演愈烈的人地矛盾使得农业生产过分依赖化肥投入来保障持续高产<sup>[1]</sup>。化肥过量投入不仅造成肥效降低,生产成本增大,而且养分流失污染地下水,容易导致土壤有机质含量下降、土壤理化性状恶化,诱发温室效应等严重的环境问题<sup>[2-4]</sup>。目前,中国稻田耕作多采用传统浅耕和免耕方式,长期浅免耕会导致土壤犁底层变厚上移,耕层变浅,土壤结构退化<sup>[5-6]</sup>。耕地属半自然生态系统,具有重要的生态功能,现代农业发展,必须站在粮食安全、食物安全、生态安全角度高度重视耕地质量保护问题<sup>[7-8]</sup>。土壤水分是土壤中水溶性成分的运输载体<sup>[9]</sup>,土壤入渗是降水或灌溉水转化为土壤水或地下水的关键环节<sup>[10]</sup>,在不同的农业区域小气候条件下,入渗速率快慢影响土壤结构与作物生长。随着国家农田化肥减量战略实施,探索土壤有机质提升新方法、新模式,稳定提高土壤有机质含量,保育耕地,提高耕地质量,增加粮食生产能力,实现藏粮于地已成为一个重要有待解决的问题。

绿肥为传统农业精华,压青还田,不仅能够补充作物生长所需的养分,更重要的作用是能够活化土壤腐殖质,改善土壤通透性<sup>[11-15]</sup>。粉垄深旋耕打破土壤耕作层和犁底层,营造适于根系生长的土壤环境,被广泛应用到旱田耕作<sup>[16]</sup>。保护性耕作可以减缓土壤侵蚀,改善土壤质量,提高养分和水分利用率,是农业可持续发展的重要生产体系<sup>[17-18]</sup>。

目前关于稻田粉垄、绿肥压青还田的研究较多,但以往研究多将绿肥与粉垄独立分析,将二者结合保护性耕作的研究较少。开展绿肥压青条件下粉垄耕作后稻田土壤紧实度、土壤容重、土壤总孔隙度及土壤稳定入渗率的累积效应研究,对于明确绿肥压青下粉垄耕作稻田地表及土壤的水分存储、运移规律及稻作节水灌溉具有重要意义,研究结果可为完善稻田保护性耕作体系,调控土壤耕层质量,促进稻作保水增产提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验地概况

实验于 2016–2017 年在广西壮族自治区农业科

学院农业资源与环境研究所实验田进行。该地区位于北回归线南侧,属亚热带季风气候,年均气温 21.6℃,年均降水量达 1304.2mm,相对湿度约 79%。供试绿肥为紫云英,其干基养分含为 N 2.7%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.65%, K<sub>2</sub>O 2.5%。于稻田耕作前取土,测定土壤背景值,供试土壤 pH6.6,全氮 1.80g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.918g·kg<sup>-1</sup>,全钾 7.43g·kg<sup>-1</sup>,有效磷 37.9mg·kg<sup>-1</sup>,有机质 24.5g·kg<sup>-1</sup>,水解性氮 131mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 97.8mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 实验设计

压青绿肥为稻田冬绿肥紫云英,于 2016 年水稻收获前播种,在 2017 年秋季稻田耕作时直接翻压入田。实验设 2 种耕作方式与 4 种施肥水平,完全方案设计,共 8 个处理。两种耕作措施分别为,(1) 单免保护性耕作 (CT),即早稻采用常规耕作措施,翻耕深度约为 20cm,晚稻采用免耕耕作方式。(2) 粉垄保护性耕作 (SR),即在早稻采用粉垄耕作,利用垂直螺旋型钻头刀片快速横向切割土壤碎土,打破土壤耕作层和犁底层,一次性完成自然悬浮成垄,将土壤耕层加深至 30cm<sup>[16]</sup>,晚稻采用免耕耕作方式。小区肥料以常规施肥的施氮量为 N 240kg·hm<sup>-2</sup>,氮、磷、钾按 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 1:0.5:1 的比例配施,设置 4 种施肥水平,分别为:(1) 对照 (CK),不翻压绿肥,不施化肥;(2) 常规施肥 (CF),化肥施用量为常规施肥水平;(3) 单倍绿肥压青 (AC),即将本小区紫云英全部翻压入田,再配施化肥,使小区养分投入与 CF 相等;(4) 双倍绿肥压青 (DC),即翻压 AC 处理的双倍绿肥,再配施化肥,使小区养分投入与 CF 相等。绿肥按照设计用量翻压,同时移出田间多余绿肥。各处理具体设置见表 1。

各小区面积为 46m<sup>2</sup>,每个处理 3 个重复。供试水稻品种为三系籼型超级稻特优 582,插秧采用每穴两株插秧,株行距为 12cm×24cm,早稻于 2017 年 4 月 13 日移栽,晚稻于 8 月 11 日移栽。保护性耕作在水稻插秧前进行,前茬水稻收割后,各小区均采取免耕方式,直接栽插晚稻。各处理按照常规大田超级稻高产栽培措施管理。

表 1 小区实验处理设置  
Table 1 Description of different treatments

耕作方式 Tillage style	施肥方式 Fertilizing style			
	不施肥 Control check (CK)	100%化肥 Chemical fertilizer (CF)	单倍绿肥+配施化肥 <i>Astragalus sinicus</i> L. and chemical fertilizer (AC)	双倍绿肥+配施化肥 Double <i>Astragalus sinicus</i> L. and chemical fertilizer (DC)
早稻常规耕作+晚稻免耕 Conventional tillage before early rice planting + no tillage before late rice planting (CT)	C1:CT-CK	C2:CT-CF	C3:CT-AC	C4:CT-DC
早稻粉垄耕作+晚稻免耕 Smash ridging before early rice planting + no tillage before late rice planting (SR)	F1:SR-CK	F2:SR-CF	F3:SR-AC	F4:SR-DC

### 1.3 测定项目和方法

用环刀法测定土壤容重,土壤总孔隙度  $f$  根据土壤容重计算,即

$$f(\%) = \left(1 - \frac{\rho_b}{2.65}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\rho_b$  为土壤容重 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 2.65 为土壤密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。

水稻收获后,挑选无降雨天气测量土壤紧实度和土壤稳定入渗率。土壤紧实度 ( $\text{kPa}$ ) 采用 SC-900 便携式土壤紧实度仪进行测定,每 2.5cm 记录一次,每个小区重复 10 次,取平均值。土壤入渗率采用单环入渗测定法<sup>[10]</sup>,在稻田表层(简称表层)和耕层 15cm(简称耕层)处将 PVC 单环垂直慢慢压入土中,用定量 178mL 取水器向单环中快速注水,同时秒表开始计时,待水分全部渗入地下,停止计时,重复此步骤直至连续注入 3 次(或者以上)的时间相同时,视为入渗达到稳定状态,即停止实验。此时的入渗率即为土壤稳定入渗率 ( $i$ ),其计算方法为

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2)$$

式中,  $\Delta Q$  为该时段入渗水量 (mL),  $\Delta t$  为入渗时间 (min)。

### 1.4 数据分析

用 Excel 2007 软件进行数据整理及作图,用 DPS 数据处理系统和 SPSS 软件比较处理间的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿肥压青粉垄保护性耕作对土壤稳定入渗率的影响及其后延效应

由图 1a 可见,在常规耕作不施肥 (C1) 和纯施化肥 (C2) 处理中,表层土壤的稳定入渗率均显著高于耕作层,采用粉垄耕作后,不施肥处理 (F1)

和纯施化肥 (F2) 处理中表层及耕层土壤入渗率均明显降低,且纯施化肥处理降低幅度明显大于不施肥处理,说明不施肥和纯施化肥条件下采用粉垄耕作会降低当季稻田中土壤的稳定入渗率;在常规耕作方式下,加入压青绿肥替代部分化肥后 (C3、C4),与不施肥 (C1) 和纯施化肥 (C2) 处理相比,耕层土壤入渗率稍降低,单倍绿肥压青 (C3) 处理表层土壤显著低于不施肥 (C1) 和纯施化肥 (C2) 处理 ( $P < 0.05$ ),而双倍绿肥压青 (C4) 处理表层土壤稳定入渗率显著提高 ( $P < 0.05$ )。说明常规耕作条件下,配施绿肥可降低当季稻田中耕层土壤的稳定入渗率,绿肥压青量低时,会降低土壤表层入渗率,压青量高则可提高土壤表层入渗率;采用绿肥压青粉垄保护性耕作方式下 (F3、F4),当季早稻田中表层土壤入渗率稍高于耕层土壤, F4 处理表层及耕层土壤稳定入渗率均高于 F3 处理。F3 处理表层和耕层土壤稳定入渗率均为各处理中最低水平,说明绿肥压青下粉垄保护性耕作可以降低当季稻田表层及耕层土壤的稳定入渗率,压青量低时效果更明显。

早稻收获后,各处理稻田均采用免耕措施、常规施肥方式种植晚稻,收获后观测各处理表层和耕层土壤入渗率,以分析绿肥压青保护性耕作的后延效应,结果见图 1b。由图可见,同一耕作处理中,晚稻收获后田间表层和耕层的土壤稳定入渗率均明显低于早稻田,早稻田表层入渗率是同一处理中晚稻田表层入渗率的 3.12~25.75 倍,耕层入渗率是同一处理中早稻田入渗率的 1.47~6.59 倍,这可能与早稻田入渗率观测时降雨过多有关,但不影响同一时期各耕作处理间的比较。

对比图 1b 中可见,与早稻田相同,单免保护性耕作下不施肥 (C1) 和纯施化肥 (C2) 处理中,表

层土壤的稳定入渗率均显著高于耕作层，粉垄保护性耕作后，不施肥处理（F1）中表层土壤入渗率明显降低（ $P < 0.05$ ），耕层土壤入渗率升高，纯施化肥（F2）处理中表层入渗率变化不明显，耕层土壤入渗率明显升高，说明粉垄保护性耕作对后季晚稻田土壤入渗有后延的促进作用；在常规耕作方式下，加入压青绿肥替代部分化肥（C3、C4）后，与不施肥（C1）和纯施化肥（C2）处理相比，表层土壤入渗率

明显降低，耕层土壤入渗率提高，且 C4 的这种变化幅度大于 C3 处理，说明绿肥压青对后季稻田土壤表层入渗具有后延阻滞作用，对耕层土壤入渗具有后延促进作用；采用绿肥压青粉垄保护性耕作方式（F3、F4）处理中，后季晚稻田中表层与耕层土壤入渗率无明显差异，且均明显低于其它处理，说明绿肥压青下粉垄保护性耕作对后季稻田土壤表层及耕层土壤入渗具有明显的后延阻滞作用。

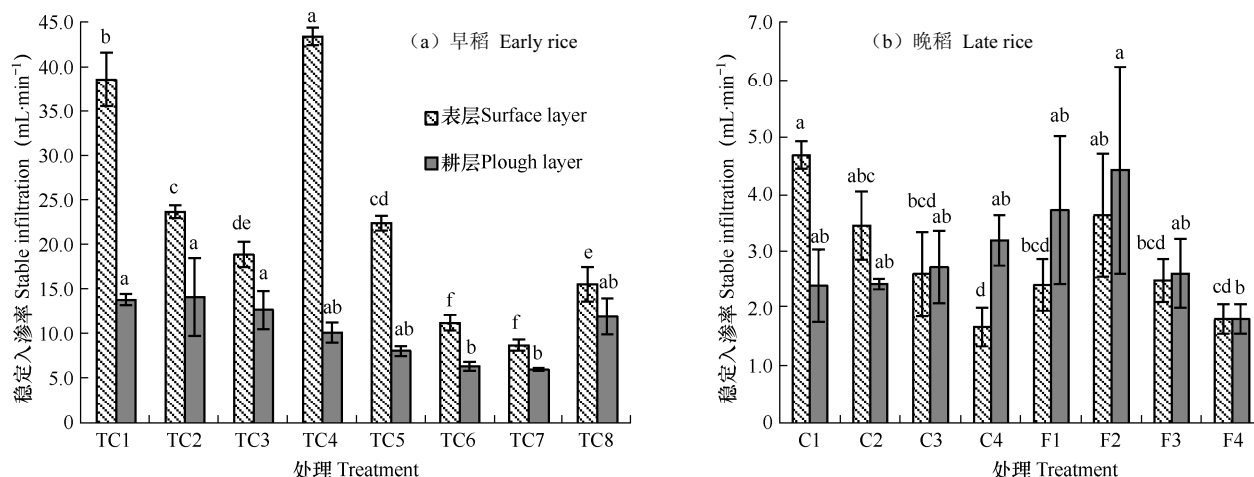


图 1 不同处理早、晚稻收获后各层土壤稳定入渗率观测结果的对比

Fig. 1 Comparison of the soil stable infiltration rates after early and late rice harvesting among treatments

注：耕层为 15cm。小写字母表示处理间在 0.05 水平上的差异显著性。短线为误差线。下同。

Note: Plough is 15cm layer. Lowercase indicates the difference significance among treatments at 0.05 level. The short lines are error lines. The same as below.

## 2.2 绿肥压青粉垄保护性耕作对水稻收获期土壤紧实度的影响及其后延效应

图 2 为早、晚两季水稻收获期，各处理土壤紧实度与土壤深度的关系。由图 2a 可见，在常规耕作不施肥（C1）和纯施化肥（C2）处理中，耕层（0–15cm）土壤紧实度显著低于下土层（15–35 cm），采用粉垄耕作后，不施肥（F1）和纯施化肥（F2）处理，与常耕下（C1、C2）处理相比，耕层土壤紧实度基本一致，下土层土壤紧实度显著降低，说明粉垄耕作可有效降低当季稻田下层土壤紧实度；在常规耕作方式下，加入压青绿肥替代部分化肥后（C3、C4 处理）与不施肥（C1）和纯施绿肥（C2）相比，C3 处理稻田耕层和下土层土壤紧实度明显降低，C4 处理耕层土壤紧实度变化不大，下土层土壤紧实度明显降低，说明绿肥压青可有效降低当季土壤下土层土壤紧实度，且在压青量为单倍时，也可以降低稻田

耕层土壤紧实度。采用绿肥压青粉垄保护性耕作方式下（F3、F4），当季早稻中耕层和下土层中土壤紧实度基本一致，两者间无显著差异，且明显低于其它处理，说明绿肥压青下粉垄保护性耕作可降低当季稻田下土层土壤紧实度。

对比图 2a、图 2b 可见，晚稻收获期土壤紧实度均小于早稻收获期，这可能是由于两季水稻收获期稻田土壤含水量不同，但这不影响同季各处理间的比较。

由图 2b 所示，与早稻田相同，晚稻田在常规耕作不施肥（C1）和纯施化肥（C2）处理中，耕层（0–15cm）土壤紧实度显著低于下土层（15–35cm），粉垄保护性耕作两处理（F1、F2）中耕层土壤紧实度与单免处理（C1、C2）基本一致，下土层土壤紧实度明显降低，说明粉垄耕作会使当季稻田土壤疏松，并且这种变化会后延至下一季；在常规耕作中加入压青绿肥替代部分化肥（C3、C4）处理中，表层和

耕层土壤紧实度与不施肥 (C1) 和纯施化肥 (C2) 基本一致, 说明绿肥压青对后季稻田土壤紧实度无明显影响; 采用绿肥压青粉垄保护性耕作方式 (F3、F4) 处理中, 后季稻田中耕层和下土层中土壤紧实

度基本一致, 两者间无显著差异, 耕层土壤紧实度略高于其它处理, 下土层土壤紧实度明显低于其它处理, 说明绿肥压青下粉垄保护性耕作对后季稻田下土层土壤有后延疏松作用。

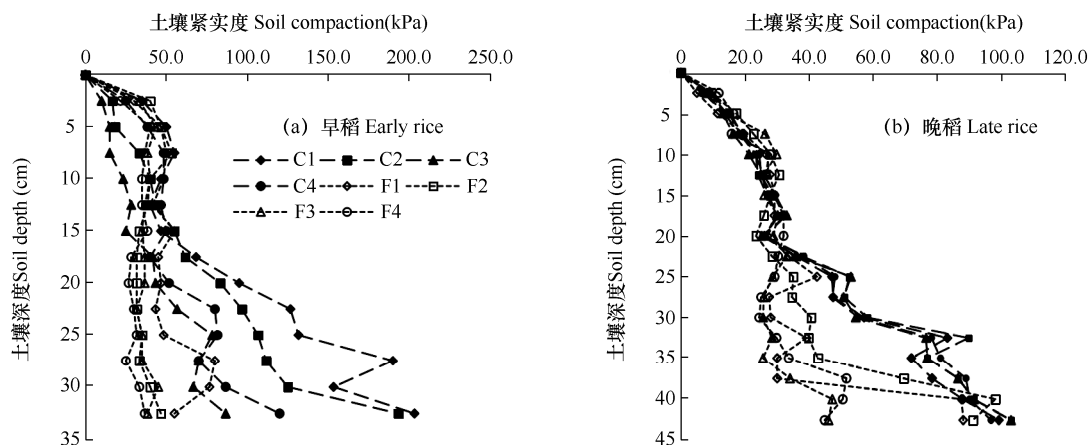


图 2 两季水稻收获后各处理土壤剖面紧实度变化

Fig. 2 The profile of soil compaction after early and late rice harvesting in each treatment

### 2.3 绿肥压青粉垄保护性耕作对后季土壤容重、含水量等的影响

考虑耕作对土壤全年累积效应的影响, 对晚稻土壤容重及土壤总孔隙度的研究发现 (表 2), 晚稻收获后, 粉垄保护性耕作处理 (F1、F2) 的土壤容重均高于常规耕作 (C1、C2) 处理 ( $P < 0.05$ ), 而土壤总孔隙度则相反, 均低于常规耕作 (C1、C2) ( $P < 0.05$ ), 说明粉垄耕作对后季稻田表层土壤有后延密实作用; 在单免保护性耕作方式下, 加入绿肥替代部分化肥后 (C3、C4 处理), 与不施肥 (C1)

和纯施化肥 (C2) 处理相比, 土壤容重显著下降, 孔隙度上升, 说明绿肥压青可有效降低后季稻田土壤容重, 提高孔隙度。

采用绿肥压青下粉垄保护性耕作方式下处理 (F3、F4), 后季稻田收获期, 土壤容重和土壤孔隙度均无显著差异, 两处理土壤容重高于常规耕作处理 (C1、C2、C3、C4), 但低于粉垄耕作不施肥 (F1) 和纯施化肥 (F2) 处理, 而总孔隙度表现与土壤容重相反, 说明绿肥压青粉垄保护性耕作对土壤容重、孔隙的变化存在后延的缓冲效应。

表 2 不同处理晚稻收获后土壤容重及含水量等的比较

Table 2 Comparison of the soil bulk density and moisture content after harvesting late rice among treatments

	处理 Treatment							
	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4
含水量 Moisture content (%)	75cd	77bc	74d	75d	80a	79ab	78ab	79ab
容重 Bulk density ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.35bc	1.38b	1.29c	1.31c	1.51a	1.50a	1.46a	1.43a
总孔隙度 Total porosity (%)	49ab	48abc	51a	50a	43d	43d	45cd	46bcd

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

土壤健康耕层结构是作物增产的重要基础<sup>[19]</sup>, 本研究结果表明, 绿肥压青下粉垄保护性耕作可显著降低当季稻田表层稳定入渗率, 使土壤入渗能力降低, 同时提高土壤容重, 降低土壤孔隙度, 使土壤密实。这会造成土壤氧气供应不足, 阻止水分入

渗, 降低化肥的利用率, 使得植物根系生长阻力变大, 导致作物减产<sup>[20-21]</sup>。分析其原因, 一是因为粉垄耕作使稻田土壤疏松, 但稻田不同于旱田, 长期处于淹水状态, 积水会破坏土壤表层结构, 使其密实, 造成土壤导水孔隙封闭, 从而降低土壤入渗能力, 使得土壤容重增加, 孔隙度下降; 二是由于粉垄作为高动力深耕型耕作方式, 应用到水田扰动了

稻田原有耕层结构, 打破了犁底层, 造成土壤上下悬浮交换, 引起土壤表层容重增大。

耕层土壤中, 绿肥压青下粉垄保护性耕作可显著降低当季稻田土壤紧实度, 同时降低土壤稳定入渗速率。这与莫斌等<sup>[22-23]</sup>研究结果有所不同。分析其原因, 下层土壤受土壤表层积水影响较小, 疏松的土壤结构未被破坏或破坏程度较小, 故土壤紧实度会下降。而稻田长期积水会造成土壤含水量较高, 进而导致土壤水分入渗能力下降。

绿肥压青下粉垄保护性耕作除影响当季水稻土壤性状外, 对后季土壤影响存在一定的后延效应。有研究表明, 翻压紫云英可减少化肥施用, 从而降低面源污染, 对生态环境保护有积极意义<sup>[24]</sup>, 甘秀芹等研究表明, 粉垄耕作当季增产, 对后季产量仍有影响<sup>[25-26]</sup>。本研究结果表明, 绿肥压青下粉垄保护性耕作不仅降低当季稻田土壤的稳定入渗速率及紧实度, 还可以显著降低后季稻田土壤的稳定入渗率和土壤紧实度, 因此, 绿肥压青下粉垄保护性耕作对稻田结构的影响具有明显的后延效应, 这在农业生产上, 可起到节耕、节本、节能的作用。土壤结构和性状的变化是一个漫长的过程, 并受耕作、气候、栽培管理等各种因素的影响, 因此, 本研究结果仍需要在不同耕作环境下进一步开展定位试验验证。

### 3.2 结论

绿肥压青下粉垄保护性耕作措施可以影响当季及后季土壤稳定入渗率、紧实度、土壤容重及土壤总孔隙度, 后延效应明显。绿肥压青下粉垄耕作有利于提高土壤耕层蓄水力, 且因具有后延效应, 可减少农业生产投入, 完善保护性耕作体系。

### 参考文献 References

- [1] 解开治, 徐培智, 陈建生, 等. 绿肥压青配伍不同促腐剂对稻田土壤肥力及其水稻产量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 177-181.
- [2] 涂仕华. 化肥在农业可持续发展中的作用与地位[J]. 西南农业学报, 2003, 16(S1): 7-11.
- [3] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响[J]. 土壤学报, 2002, 40(3): 426-432.
- [4] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
- [5] 李娟. 渭北旱塬玉米田轮耕下土壤质量及生产性能响应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [6] 洪曦, 高菊生, 罗尊长, 等. 不同施肥措施对红壤稻田氮磷平衡及生态经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 158-166.
- [7] 赵其国, 黄季焜. 农业科技发展战略与面向 2020 年的战略选择[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 397-403.
- [8] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1111-1118.
- [9] 大卫·莫登. 水与可持续发展: 未来农业用水对策方案及综合评估[M]. 李保国, 黄峰译. 天津: 天津科技翻译出版公司, 2014.
- [10] Wang D J, Lin J H, Sun R J, et al. Optimmm nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu lake area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 40(3): 426-432. (in Chinese)
- [11] Tao L, Chu G X, Liu T, et al. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6137-6146. (in Chinese)
- [12] Li J. Research on soil quality and production capability under rotation tillage on maize field in Weibei highland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017. (in Chinese)
- [13] Hong X, Gao J S, Luo Z Z, et al. Effects of different fertilization regimes on nitrogen and phosphorus balance and eco-economic benefits in red paddy field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 158-166. (in Chinese)
- [14] Zhao Q G, Huang J K. The development tendency of agriculture technology and the strategic choice facing 2020[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 397-403. (in Chinese)
- [15] Tian X M, Li J H, Wei C Z, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil organic matter fractions, cotton nutrient absorption and yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1111-1118. (in Chinese)
- [16] Tu S H. Roles and functions of chemical fertilizers in sustainable agriculture[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2003, 16(S1): 7-11. (in Chinese)

- David M. Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture[M]. Li B G, Huang F (translated). Tianjin: Tianjin Science & Technology Translation & Publishing Corp, 2014. (in Chinese)
- [10] Yang J, Xu X L, Liu M X, et al. Effects of "Grain for Green" program on soil hydrologic functions in karst landscapes, southwestern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 120-129.
- [11] 曹卫东. 绿肥在现代农业生产中的探索与实践[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011.
- Cao W D. The exploration and practice of green manure in the development of modern agriculture[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)
- [12] Cherr C M, Scholberg J M S, McSorley R. Green manure approaches to crop production: a synthesis[J]. *Alliance of Crop, Soil, and Environmental Sciences Societies*, 2006, 96(2): 302-319.
- [13] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 41-47.
- Zhao N, Zhao H B, Yu C W, et al. Effect of green manure in summer fallow period and nitrogen rate on winter wheat growth[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 41-47. (in Chinese)
- [14] 李继明, 黄庆海, 袁天佑, 等. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 563-570.
- Li J M, Huang Q H, Yuan T Y, et al. Effects of long-term green manure application on rice yield and soil nutrients in paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 563-570. (in Chinese)
- [15] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1209-1216.
- Yang B J, Huang G Q, Wang C, et al. Effects of winter green manure cultivation on rice yield and soil fertility in paddy field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1209-1216. (in Chinese)
- [16] 韦本辉. 旱地作物粉垄栽培技术研究简报[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(20): 4330-4330.
- Wei B H. A brief report on the technology of Fenlong cultivation for dry land crops[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(20): 4330-4330. (in Chinese)
- [17] Shipitalo M J, Dick W A, Edwards W M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 53: 167-183
- [18] 王兆伟, 郝卫平, 龚道枝, 等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(2): 244-250.
- Wang Z W, Hao W P, Gong D Z, et al. Effect of straw mulch amount dynamic changes of soil moisture and temperature in farmland[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 244-250. (in Chinese)
- [19] 胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(2): 95-103.
- Hu J M, Chen S N, Wei X H, et al. Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 95-103. (in Chinese)
- [20] 王丽学, 姜熙, 李勇, 等. 保护性耕作对农田土壤水蚀及土壤紧实度的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(2): 83-85.
- Wang L X, Jiang X, Li Y, et al. Effects of conservation tillage on soil water erosion and soil compaction degree[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(2): 83-85. (in Chinese)
- [21] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 不同施肥处理对土壤理化性质的影响[J]. *华北农学报*, 2010, 25(4): 221-225.
- Sun J, Liu M, Li L J, et al. The effect of different fertilization treatments on soil physical and chemical property[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2010, 25(4): 221-225. (in Chinese)
- [22] 莫斌, 陈晓燕, 杨以翠, 等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 13-17.
- Mo B, Chen X Y, Yang Y C, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 13-17. (in Chinese)
- [23] 苏正安, 张建辉. 耕作导致的土壤再分布对土壤水分入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 194-198.
- Su Z A, Zhang J H. Impacts of soil redistribution by tillage on soil water infiltration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 194-198. (in Chinese)
- [24] 于启闽. 紫云英翻压还田、后季水稻减量施肥试验[J]. *福建农业科技*, 2013, (11): 46-48.
- Yu Q M. Experiments of incorporating straw of Chinese milk vetch to field and reducing fertilization amount in succeeding rice[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2013, (11): 46-48. (in Chinese)

- [25] 甘秀芹, 韦本辉, 刘斌, 等. 粉垄后第 6 季稻田土壤变化与水稻产量品质分析[J]. 南方农业学报, 2014, 45(9): 1603-1607.
- Gan X Q, Wei B H, Liu B, et al. Effects of smash-ridging cultivation on soil properties, yield and quality of the sixth season of rice[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(9): 1603-1607. (in Chinese)
- [26] Wei B H, Gan X Q, Li Y Y, et al. Effects of once Fenlong cultivation on soil properties and rice yield and quality for 7 consecutive years[J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(12): 2365-2371.