

吴杉, 王克勤, 宋娅丽, 等. 秸秆堆沤还田对坡耕地径流、泥沙与磷素流失的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(4): 29-37.
WU Shan, WANG Keqin, SONG Yali, et al. Effects of straw compost retting on runoff, sediment and phosphorus loss from sloping farmland[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 29-37.

秸秆堆沤还田对坡耕地径流、泥沙与磷素流失的影响

吴 杉¹, 王克勤¹, 宋娅丽¹, 温昌焘², 裴益乐¹, 代 立¹

(1 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224;

2 云南省玉溪市红塔区水土保持工作站, 云南 玉溪 653100)

摘要:【目的】寻求不同堆沤方式和秸秆还田密度结合下较为有效的径流泥沙与磷素减排农艺措施。【方法】在自然降水条件下, 研究不同秸秆还田密度 (0.75、1.5 kg·m⁻²)、不同秸秆粉碎粒度 (1、5 cm)、加水或尿素堆沤对滇中二龙潭小流域烟草坡耕地产流产沙量及磷素流失量的影响。【结果】1.5 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤均可有效降低烟草坡耕地产流产沙量, 降低幅度分别为 18.59%~38.60%、12.50%~38.60%、10.06%~38.60%; 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤较 1.5 kg·m⁻² 秸秆密度、1 cm 秸秆粒度、加水与尿素堆沤的处理, 径流泥沙总磷与径流 PO₄⁻-P 浓度分别降低 2.82%~66.67%、0.38%~57.53% 和 1.97%~64.73%; 径流中 PO₄⁻-P 占总磷浓度的 35.30%~77.59%; 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度及加水堆沤可有效减少坡耕地磷素流失风险, 径流和泥沙总磷流失量分别最高降低 63.64% 和 64.74%、63.89% 和 57.87%、63.89% 和 64.74%。【结论】采用 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度以及加水堆沤处理还田可控制滇中地区磷素流失, 降低坡耕地径流泥沙及磷素流失风险。

关键词: 坡耕地; 秸秆还田; 磷素流失; 堆沤方式; 泥沙; 径流
中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2022)04-0029-09

Effects of straw compost retting on runoff, sediment and phosphorus loss from sloping farmland

WU Shan¹, WANG Keqin¹, SONG Yali¹, WEN Changtao², PEI Yile¹, DAI Li¹

(1 College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2 Soil and Water Conservation Workstation, Hongta District, Yuxi City, Yunnan Province, Yuxi 653100, China)

Abstract: 【Objective】To seek more effective agronomic measures to reduce runoff, sediment and phosphorus loss emissions under the combination of different stacking methods and straw returning densities. 【Method】Under the conditions of natural rainfall, different straw returning densities (0.75, 1.5 kg·m⁻²), different straw crushing particle sizes (1, 5 cm), adding water or urea were designed to study the effects on runoff and sediment amount, and phosphorus loss of slope farmland in the middle of Yunnan. 【Result】The straw density of 1.5 kg·m⁻², straw particle size of 5 cm, and water retting could effectively reduce the runoff and sediment yield

收稿日期: 2021-07-16 网络首发时间: 2022-03-31 13:13:45
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220329.1818.008.html>
作者简介: 吴 杉, 硕士研究生, 主要从事生态恢复研究, E-mail: ws29080@163.com; 通信作者: 宋娅丽, 副教授, 博士, 主要从事流域水土流失规律及治理研究, E-mail: songyali19851205@sina.com
基金项目: 云南省科技计划重点研发项目 (2018BB018); 云南省大学生创新创业训练计划项目 (202010677047); 云南省水土保持监测站网玉溪二龙潭小流域水土保持监测站点项目 (09963-632166)

of tobacco slope farmland by 18.59%–38.60%, 12.50%–38.60%, 10.6%–38.60%. Compared with the treatments of 1.5 kg·m⁻² straw density, 1 cm straw particle size, and water and urea retting, 0.75 kg·m⁻² straw density, 5 cm straw particle size, and water-added could decrease runoff and sediment total phosphorus and runoff PO₄⁻-P concentration by 2.82%–66.67%, 0.38%–57.53% and 1.97%–64.73% respectively. The ratio of PO₄⁻-P in runoff was 35.30%–77.59% of the total phosphorus concentration. Straw density of 0.75 kg·m⁻², straw particle size of 5 cm, and water retting could effectively reduce the risk of phosphorus loss in tobacco sloping farmland in Erlongtan small watershed. The total phosphorus loss in runoff and sediment respectively highestly reduced 63.64% and 64.74%, 63.89% and 57.87%, 63.89% and 64.74%. 【Conclusion】 The use of 0.75 kg·m⁻² straw density, 5 cm straw particle size and water retting treatment can control phosphorus loss in central Yunnan watershed and reduce the risk of runoff, sediment and phosphorus loss on slope farmland.

Key words: Sloping farmland; Straw returning; Phosphorus loss; Compost method; Sediment; Runoff

我国耕地水土流失面积达 4.54×10^7 hm², 占耕地总面积的 35%, 每年因土壤侵蚀而造成的水土流失中磷素损失总量达 7.65×10^6 t^[1-2]。磷素随径流进入水体, 使得磷素养分流失成为最大的农业面源污染之一^[3], 同时也是造成水体富营养化的主要限制因子^[4-5]。作物秸秆占其生物总量的 50% 左右, 是一种极为丰富且可直接利用的可再生有机资源^[6-7]。秸秆还田可减少因侵蚀、径流或淋溶而造成的磷素损失^[8-9], 改善土壤养分状况, 改良土壤理化性质, 对作物的产量及品质有较好的促进作用^[10]; 同时可避免秸秆焚烧造成的资源浪费和环境污染问题^[11]。因此, 选择适宜的秸秆堆沤还田方式及对施肥量进行控制, 可在较大程度上改善土壤养分状况, 有效控制农业面源污染。

目前, 有关秸秆还田对磷素的影响已有较多研究, 主要集中在秸秆还田、秸秆还田与不同覆盖方式、减量化施肥与秸秆还田对径流泥沙和磷素流失的影响。王静等^[12]研究表明, 与传统耕作方式相比, 稻季秸秆还田使磷素流失分别减少了 5.13% 和 18.98%; 侯红波等^[13]研究表明, 洞庭湖区红壤坡耕地常规施肥+秸秆覆盖 (3 000 kg·hm⁻²) 处理后, 磷素总流失量较 CK 降低了 15.4%; 王志荣等^[14]研究表明, 减量化施肥与秸秆还田施肥可降低地表径流磷素流失。但针对堆沤方式与秸秆还田密度对坡耕地产生流沙和磷素流失的影响研究较少。因此, 本试验在自然降水条件下, 设置 0.75、1.5 kg·m⁻² 秸秆密度, 1、5 cm 秸秆粒度, 水、水与尿素堆沤方式, 研究其对滇中二龙潭小流域烟草坡耕地径流泥沙及磷素流失的影响, 拟分析不同秸秆堆沤方式与秸秆还田密度结合下径流泥沙及磷素流失特征, 以期得到该流域烟草坡耕地秸秆资源最佳的

利用方式以及为控制农业面源污染提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市红塔区二龙潭小流域, 地理坐标: E102°34′12.30″、N24°17′32.33″, 地处玉溪市中心城区东南方向, 流域控制面积为 53 km²。雨季为 5—10 月, 雨季降水量占全年降水量的 85%, 其中降水在 8 月达到峰值, 年平均暴雨天数为 15 d。年平均降水量为 909.1 mm, 最大年降水量为 1 413.7 mm, 年均蒸发量为 1 624.9 mm。该流域地貌属波状起伏线切割中山区, 土壤属山地红壤, 肥力较低, 介于强酸至微酸性之间。土层浅薄, 岩石裸露, 属水土流失高发区域, 流域内主要树种为云南松, 烟草和玉米为当地主要农作物。

1.2 试验设计

本试验地为 15°烟草坡耕地, 2019 年 5 月 7 日进行烟草移植, 烟草种植密度为每公顷 16 500 株。氮肥施用量为 105~135 kg·hm⁻², N、P₂O₅、K₂O 质量比为 1:0.5:2.5~3; 肥料在烟草移栽后 25 d 内全部施完, 共施肥 3 次: 底肥、提苗肥、追肥。肥料施用量如表 1 所示。

小区规格为 1 m×1 m, 坡度、坡向基本保持一致, 呈 2 行对称排列, 试验田外围设有试验保护区, 小区田埂筑高 20 cm, 小区周围用塑料薄膜包被, 以减少侧渗。每个小区外设置 1 个集流装置, 用 10 L 的大塑料桶埋入土中收集, 塑料桶上盖有盖子, 以防止雨水进入塑料桶, 每次取样后, 测量集流装置中的雨水量并将水清除干净, 方便后续观察。用自动雨量计观测试验期间的降水量与降水强度。

本试验将当地种植的玉米秸秆堆沤处理后施用

表 1 肥料施用情况
Table 1 Fertilizer details

种类 Species	N : P : K ¹⁾	施用量/(kg·hm ⁻²) Fertilization dosage		
		总量 Total	N	P
底肥 Base fertilizer	12 : 6 : 24	247.5	29.7	14.85
提苗肥 Seedling fertilizer	28 : 0 : 5	45.0	12.6	0
追肥 Additional fertilizer	12 : 6 : 24	772.5	92.7	46.35

1)复合肥中的氮磷钾质量比
1)The mass ratio of nitrogen, phosphorus and potassium in compound fertilizer

于烟草坡耕地。试验设置 9 个处理, 空白对照即不添加秸秆 (T₁)、0.75 kg·m⁻² 秸秆密度+ 5 cm 秸秆粒度+水堆沤 (T₂)、0.75 kg·m⁻² 秸秆密度+ 5 cm 秸秆粒度+水与尿素堆沤 (T₃)、0.75 kg·m⁻² 秸秆密度+ 1 cm 秸秆粒度+水堆沤 (T₄)、0.75 kg·m⁻² 秸秆密度+ 1 cm 秸秆粒度+水与尿素堆沤 (T₅)、1.5 kg·m⁻² 秸秆密度+ 5 cm 秸秆粒度+水堆沤 (T₆)、1.5 kg·m⁻² 秸秆密度+ 5 cm 秸秆粒度+水与尿素堆沤 (T₇)、1.5 kg·m⁻² 秸秆密度+ 1 cm 秸秆粒度+水堆沤 (T₈)、1.5 kg·m⁻² 秸秆密度+ 1 cm 秸秆粒度+水与尿素堆沤 (T₉)。秸秆还田后及时翻耕, 把秸秆翻入 0~20 cm 土层, 使秸秆分散均匀且与土壤充分混合。不同处理见表 2。

表 2 各样方处理方式及施肥量
Table 2 Treatment and fertilization dosage of different plots

处理 Treatment	施肥量/(g·m ⁻²) Fertilization dosage				秸秆还田量/(g·m ⁻²) Straw-returned amount		秸秆粉碎 程度/cm Degree of straw crushing	秸秆堆沤添加 尿素量/(g·m ⁻²) Straw compost urea addition amount	
	基肥 Base fertilizer	提苗肥 Seedling fertilizer	追肥 Additional fertilizer	折合磷 Pure phosphorus	还田量 Straw-returned amount	折合磷 Pure phosphorus		施用量 Fertilization dosage	折合磷 Pure phosphorus
T ₁	70	13	214	17.04	0	0	0	0	0
T ₂	70	13	214	17.04	750	2.025	5	0	0
T ₃	70	13	214	17.04	750	2.025	5	3.75	0.01
T ₄	70	13	214	17.04	750	2.025	1	0	0
T ₅	70	13	214	17.04	750	2.025	1	3.75	0.01
T ₆	70	13	214	17.04	1 500	4.050	5	0	0
T ₇	70	13	214	17.04	1 500	4.050	5	3.75	0.01
T ₈	70	13	214	17.04	1 500	4.050	1	0	0
T ₉	70	13	214	17.04	1 500	4.050	1	3.75	0.01

1.3 样品采集与测定

用对角线法采集 0~20 cm 耕层土壤, 取上、中、下坡 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 3 个土层的土样, 调查土壤养分背景值。根据每场降水历时, 在每次降水结束后, 分别采集 1 次收集装置中的水样, 并根据降水次数增加适当增加采集频率, 每个重复取 200 mL, 再将这些样品混合后取 250 mL 作为本次降水采样点测定水样, 4 ℃ 条件下保存, 在 24 h 内过滤, 测定水样中的总磷、磷酸 (PO₄⁻-P) 质量浓度。取完径流水样后, 将其静置、晾干, 测定泥沙中总磷含量。体积法测定径流量, 711 型便携式悬浮

物/界面分析仪测定泥沙含量。水样总磷用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法 (GB 11893—1989)^[15] 测定; PO₄⁻-P 用钼锑抗比色法 (NY/T 2421—2013)^[16] 测定; 泥沙和土样总磷用自动定氮仪 (NY/T 1121.24—2012)^[17] 测定。各个指标均做 3 组平行试验, 取平均值。

用自动雨量计观测降水量与降水强度, 本试验降水集中在 6 月至 9 月, 在记录的降水中, 选取了 4 场典型的降水事件, 即 7 月 28 日、8 月 7 日、8 月 15 日和 9 月 8 日, 降水量分别为 6.2、22.0、12.4、17.2 mm, 降水强度分别为 2.6、23.6、3.1、21.0 mm·h⁻¹。

其中最小降水量与最小降水强度发生在 7 月 28 日 (6.2 mm、2.6 mm·h⁻¹), 8 月 7 日的降水量与降水强度达到峰值 (22.0 mm、23.6 mm·h⁻¹)。

1.4 数据处理与分析

在本试验中, 通过烘干法确定各小区产沙量, 各个小区的平均径流流量由径流收集器中水样的质量转换得出。径流和泥沙中磷素流失量由以下公式计算得到:

径流总磷流失量(mg·m⁻²) = 降水产流量×
径流平均总磷质量浓度,

(1)

泥沙总磷流失量(mg·m⁻²) = 降水产沙量×
泥沙平均总磷含量。

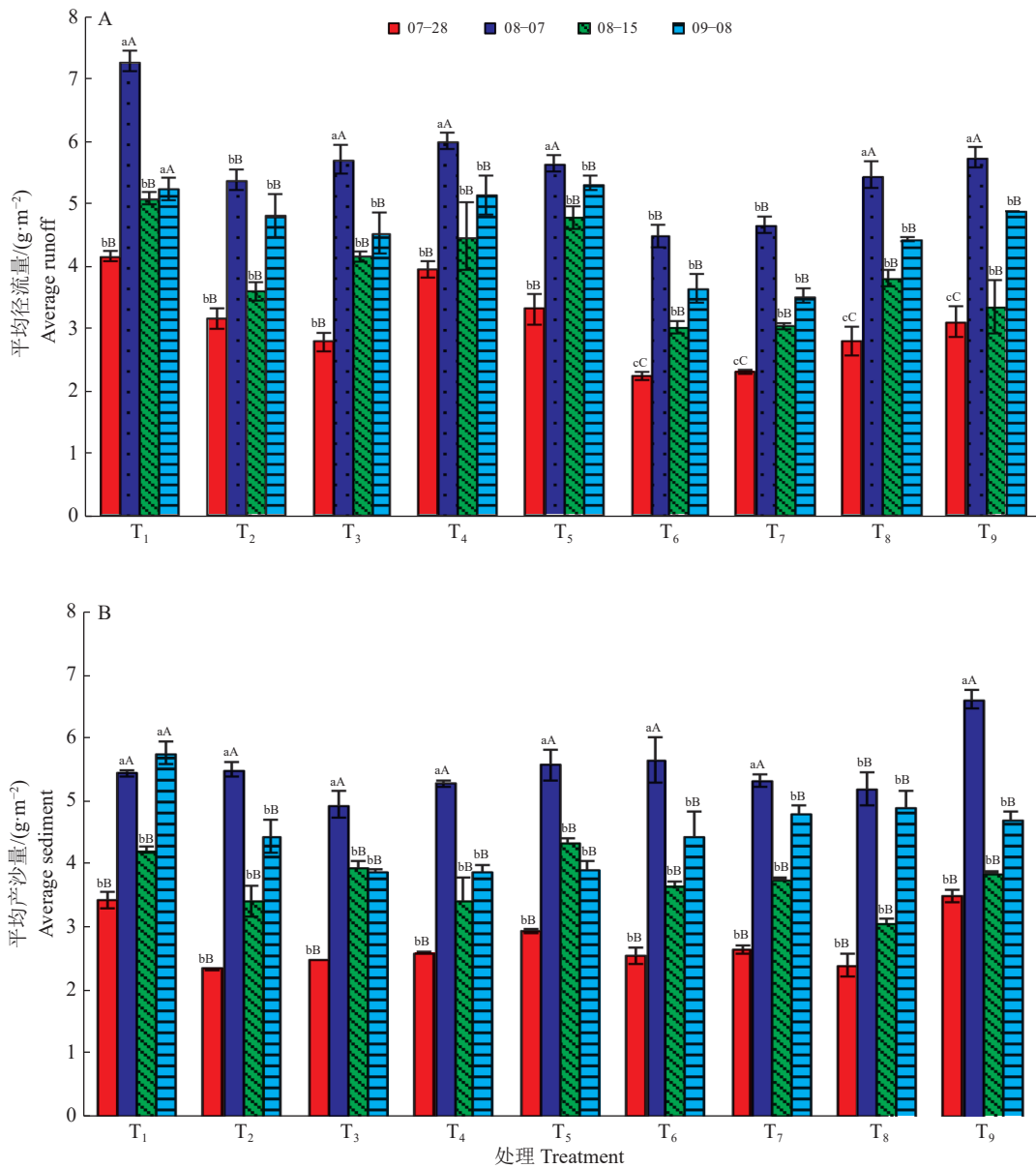
(2)

数据整理和图表制作采用 Microsoft Excel 2010 进行, 相关性分析采用 SPSS 23.0 软件进行, 方差分析及显著性检验采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同堆沤方式与秸秆还田密度对坡耕地产流产沙的影响

从产流产沙量 (图 1A、1B) 来看, 7 月 28 日的径流量与泥沙量均为各次降水的最小值, 8 月 7 日



各小图中柱子上不同的小写字母表示同一降水不同处理之间差异显著, 不同的大写字母表示同一处理不同降水之间差异显著 (P<0.05, LSD 法)
Different lowercase letters on the columns in each figure indicate significant differences among different treatments under the same rainfall, different capital letters indicate significant differences among different rainfalls under the same treatment (P<0.05, LSD method)

图 1 4 场降水中不同处理产流、产沙特征

Fig. 1 Runoff and sediment characteristics under four rainfalls in different treatments

的径流量与泥沙量多达到各次降雨的最大值, 8月7日各样方平均土壤侵蚀量为 $5.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 7月28日则只有 $2.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 说明产流量与产沙量随着降水强度的增大而增加, 且降水量与径流量、降水强度与产沙量相关性显著 ($P<0.05$)。

从图 1A 可以看出, 在 4 场降水中, $T_2 \sim T_9$ 样方产流量较 T_1 平均减少了 15.15%~40.58%; 不同堆沤方式下各样方产流量不同: 施用 1.5 kg/m^2 秸秆密度 (T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9), 5 cm 粗秸秆粒度 (T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_7), 加水堆沤 (T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8) 分别较施用 0.75 kg/m^2 秸秆密度 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5), 1 cm 细秸秆粒度 (T_4 、 T_5 、 T_8 、 T_9), 加水与尿素堆沤 (T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9) 产流量减少了 2.01%~30.38%, 5.04%~43.26%, 0.67%~37.13%, 说明施用 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆还田密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤均可较好地减少坡面产流量。从产沙量 (图 1B) 来看, $T_2 \sim T_9$ 样方产沙量较 T_1 平均减少了 0.97%~19.68%; 施用 0.75 kg/m^2 秸秆密度 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5), 5 cm 粗秸秆粒度 (T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_7), 加水堆沤样方 (T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8) 分别较 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9), 1 cm 细秸秆粒度 (T_4 、 T_5 、 T_8 、 T_9), 加水与尿素堆沤 (T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9) 产沙量减少了 0.22%~20.82%, 0.58%~24.64%, 0.63%~36.10%。说明施用 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤可有效地减少坡面产沙量。

2.2 不同堆沤方式与秸秆还田密度对坡耕地地表径流磷素质量浓度的影响

不同处理磷素流失量见图 2, 4 场降水中, 各取样时期的磷素浓度变化差异较显著, 4 次降水径流中总磷浓度呈现出 8 月 7 日>8 月 15 日>9 月 8 日>7 月 28 日的规律, 8 月 7 日径流总磷浓度达到峰值, 且与其他降水差异显著 ($P<0.05$)。相同降水条件下, 处理 $T_2 \sim T_9$ 总磷流失浓度较 T_1 高 17.13%~71.15%; 不同堆沤方式径流总磷流失浓度呈现出施用 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5), 5 cm 秸秆粒度 (T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_7), 加水堆沤 (T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8) 分别较 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9), 1 cm 秸秆粒度 (T_4 、 T_5 、 T_8 、 T_9), 加水与尿素堆沤 (T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9) 降低了 7.79%~66.67%, 3.33%~66.51%, 2.82%~61.92% (图 2A)。处理 $T_2 \sim T_9$ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 流失浓度较 T_1 高 16.29%~71.14%; 不同堆沤方式径流 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化呈现出施用 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5), 5 cm 秸秆粒度 (T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_7), 加水堆沤 (T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8) 分别较 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9), 1 cm 秸秆粒度 (T_4 、 T_5 、 T_8 、 T_9), 加水与尿素堆沤 (T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9) 降低了

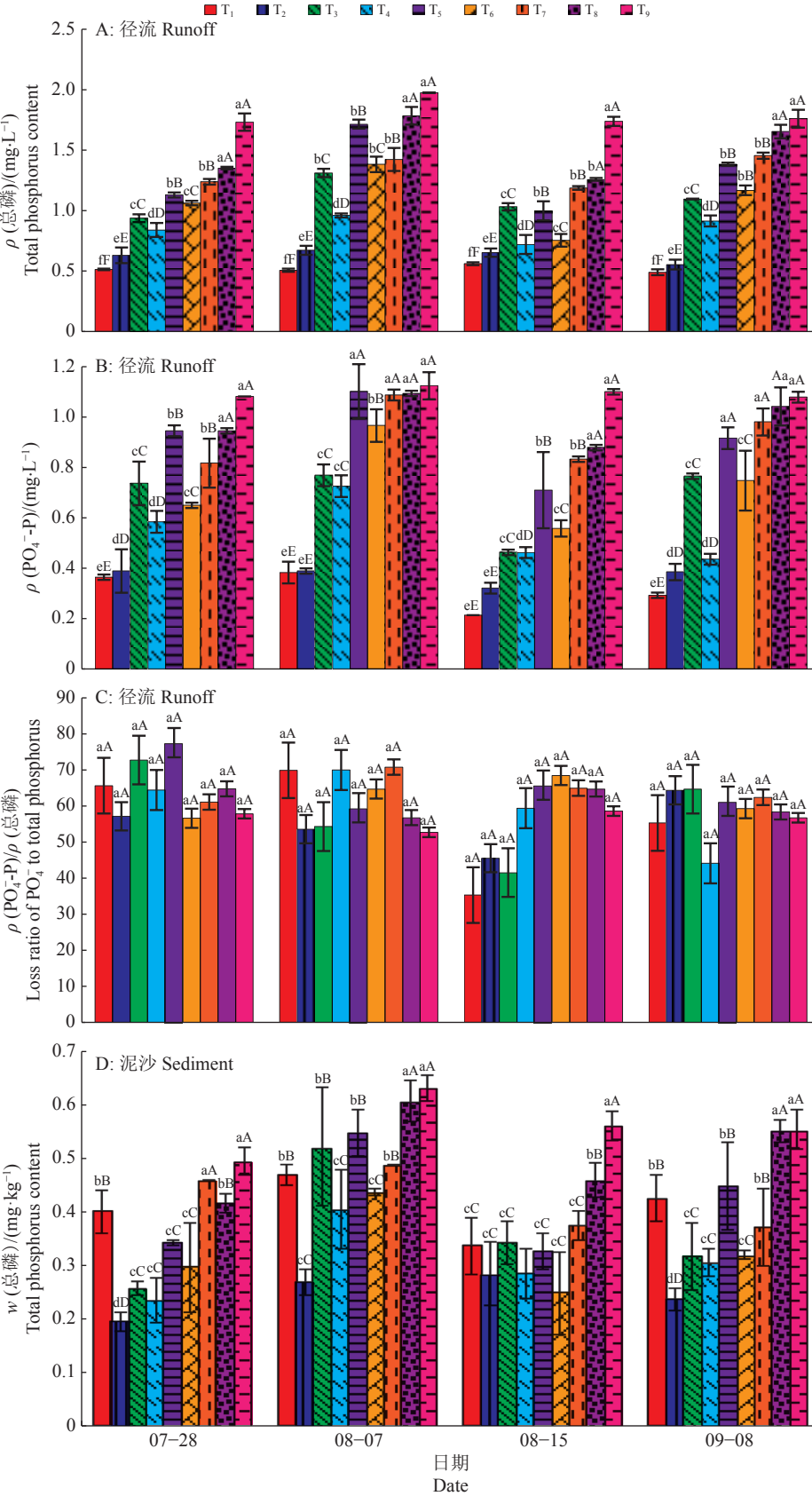
1.97%~64.47%, 3.23%~64.36%, 3.39%~64.73% (图 2B)。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ /总磷变化幅度为 35.30%~77.59%, 9 月 8 日占 7 月 28 日的 91%, 在施肥后期溶解态磷素流失的风险增加, 但总体上呈现随时间的推移而逐渐减小的趋势 (图 2C)。

2.3 不同堆沤方式与秸秆还田密度对坡耕地泥沙中磷素含量的影响

由图 2D 得出, 在 4 场典型降水中, 泥沙总磷浓度呈现出 8 月 7 日>8 月 15 日>9 月 8 日>7 月 28 日的规律, 且差异显著 ($P<0.05$)。处理 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_6 泥沙总磷浓度较 T_1 平均减少 38.61%、12.11%、24.68%、20.99%, 处理 T_5 、 T_7 、 T_8 、 T_9 泥沙总磷浓度较 T_1 平均增加 1.13%、3.02%、19.02%、26.92%; 不同堆沤方式泥沙总磷流失浓度表现为施用 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5), 5 cm 秸秆粒度 (T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_7), 加水堆沤 (T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8) 分别较 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9), 1 cm 秸秆粒度 (T_4 、 T_5 、 T_8 、 T_9), 加水与尿素堆沤 (T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9) 降低了 8.38%~57.53%, 0.54%~55.84%, 0.38%~55.55%。与 8 月 7 日相比, 8 月 15 日、9 月 8 日泥沙总磷流失浓度分别降低了 11.27%~42.97% 和 9.33%~39.26%, 说明随着烟草生长时间的推移, 各处理泥沙总磷流失浓度呈现逐渐降低的趋势。

2.4 不同堆沤方式与秸秆还田密度对坡耕地磷素流失量的特征

4 次降水中, 不同堆沤方式和秸秆还田密度下径流总磷流失量分别为 1.97~5.35、3.51~11.24、2.25~5.74 和 $2.54 \sim 8.52 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 泥沙总磷流失量分别为 0.61~4.45、1.47~4.16、0.91~2.16 和 $1.05 \sim 2.70 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。不同处理径流和泥沙总磷流失量表现为 8 月 7 日>8 月 15 日>9 月 8 日>7 月 28 日的规律。降水量增加, 总磷流失量也增加, 变化显著 ($P<0.05$)。与 8 月 7 日相比, 8 月 15 日和 9 月 8 日总磷流失量分别下降了 43.81% 和 22.10%, 且随着时间的推移逐渐下降。不同堆沤方式、秸秆还田密度下降低了磷素流失量。除 T_2 外, 其余处理径流总磷流失量较 T_1 均增加 16.17%~62.17%, 除 T_8 、 T_9 外, 其余处理泥沙总磷流失量较 T_1 均减少 8.99%~38.44%; 同样的降水条件下, 各处理径流和泥沙总磷流失量表现出施用 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5), 5 cm 秸秆粒度 (T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_7), 加水堆沤 (T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8) 分别较 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 秸秆密度 (T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_9), 1 cm 秸秆粒度 (T_4 、 T_5 、 T_8 、 T_9), 加水与尿素堆沤 (T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9) 最高降低了 63.64% 和 64.74%, 63.89% 和 57.87%, 63.89% 和 64.74%。说



各小图中柱子上不同的小写字母表示同一降水不同处理之间差异显著，不同的大写字母表示同一处理不同降水之间差异显著 ($P<0.05$, LSD 法)
Different lowercase letters on the columns in each figure indicate significant differences among different treatments under the same rainfall, different capital letters indicate significant differences among different rainfalls under the same treatment ($P<0.05$, LSD method)

图 2 4 场降水中不同处理对径流总磷、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 流失量及其比值与泥沙总磷流失量的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on the loss of total phosphorus、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and loss ratio of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ to total phosphorus in runoff and total phosphorus loss in sediment under four rainfours

明随秸秆密度降低、粉碎粒度变粗以及仅加水堆沤径流和泥沙总磷流失量呈下降趋势。在 4 次典型降水中, 径流输出是坡耕地总磷流失的主要方式。占

总磷总流失量的 68.78%~74.44%。不同处理径流和泥沙总磷流失量见图 3。

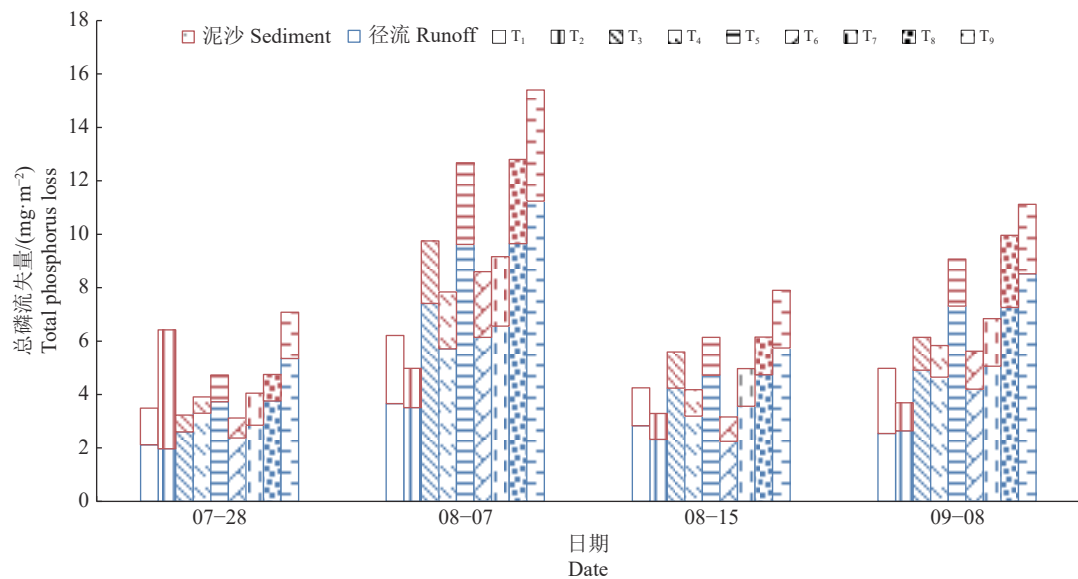


图 3 4 场降水中不同处理对坡耕地径流和泥沙总磷流失量的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on total phosphorus loss in runoff and sediment of sloping farmland under four rainfalls

3 讨论与结论

3.1 耕地径流泥沙及磷素流失形态的变化特征

降雨量、降雨强度、施肥方式、施肥量、土壤性质等是磷素在坡耕地上迁移的影响因素^[18-20]。本研究表明, 与 T₁ 相比, 各处理可显著减少坡耕地的产流产沙量 0.97%~40.58%。这是由于秸秆均匀翻入土表, 可避免雨滴直接击打地表, 增加地表的粗糙程度, 减缓径流流速, 从而减轻坡耕地地表溅蚀, 减少坡面径流和泥沙的产生; 同时, 秸秆本身结构比较疏松, 具有较强的持水能力, 使土壤空隙得到改善, 大量降水储存在土壤中, 从而降低了坡耕地的产流产沙量^[21]。其中, 1.5 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤的处理能较好降低坡耕地产流产沙量。这可能是由于较高秸秆密度、粗颗粒秸秆及加水堆沤的秸秆翻入土表, 相比之下地表更为粗糙, 截留的降水较多, 易于减缓雨水对坡面的击溅, 从而较大程度上减少径流泥沙的产生。

本试验中, 与 T₁ 相比, 各处理径流总磷浓度增加, 这可能是由于秸秆本身含有丰富的氮、磷、钾、等营养元素^[22], 随秸秆腐解, 堆肥成肥增加了氮磷钾含量, 致使径流泥沙磷素浓度上升。在施肥前期, 由于产流量较大, 径流中携带着大量磷素, 导致磷素极易随径流流失。到施肥后期, 泥沙总磷流失

浓度逐渐降低 9.33%~42.97%, 其原因可能是, 秸秆矿化分解为土壤提供丰富的有机碳及氮、磷、钾等矿质营养元素来改善土壤理化性状和生物学性状, 同时秸秆腐解时可富集大量微生物, 吸收水土环境中的磷素^[23], 降低磷素流失风险。

径流中磷素损失包括土壤全磷和土壤中可溶性磷的损失^[24]。本研究表明, 径流 PO₄⁻-P 浓度变化规律同径流总磷浓度变化规律一致。在 4 场降水中, PO₄⁻-P/总磷变化幅度为 35.30%~77.59%, 且 9 月 8 日占 7 月 28 日的 91%。这可能是因为溶解态磷素为各处理径流总磷流失的主要方式。在本试验中, 各处理 PO₄⁻-P 流失浓度较 T₁ 高 16.29%~71.14%, 这可能是由于秸秆在腐解时产生有机酸, 有机酸与磷酸根之间竞争吸附, 降低土壤矿物仅对磷酸根的吸附, 导致磷素在土壤中迁移变得相对容易^[25], 徐泰平等^[26] 研究表明, 秸秆还田较化肥氮磷钾对照处理渗漏径流增加了 30%~52%, 可溶性磷素释放与土体内水流大小有很大关系, 秸秆堆沤还田可改善土壤结构, 增加土壤渗漏径流, 故增加了土壤磷素淋失风险, 因此在从事农事活动时要严格控制秸秆还田量及密度并且减少尿素施用量。

3.2 耕地磷素流失量的变化特征

本试验中, 径流输出是二龙潭小流域坡耕地磷素流失的主要途径, 径流中磷素流失量为 1.97~

11.24 mg·m⁻², 占磷素流失总量的 68.78%~74.44%。由于二龙潭小流域坡耕地为红壤且呈酸性, 土壤养分较少, 加之雨季多发暴雨, 土壤淋溶作用较强, 土壤孔隙相对较大, 坡面易于产生径流^[27]。Li 等^[28]研究表明, 地表径流是土壤养分流失的关键因素。降水后在坡耕地上从事农业生产活动会引发土壤磷素流失, 其流失量与坡耕地利用方式、土壤磷含量、施肥量密切相关, 故在降水频发季节进行耕作、施肥、种植等农事活动是导致土壤磷流失的重要影响因素^[29]。在本研究的 4 场典型降水中, 施用 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤均能有效减少径流和泥沙中总磷流失量。各处理中, T₂ 较其他处理可以显著降低径流泥沙总磷流失量, 这是由于粗颗粒秸秆在还田后降解速度相对较缓慢, 可防止更多的土壤颗粒被雨水冲刷, 降雨能被更好地截留, 从而减少径流的侧向流动^[30-31], 最终降低坡面的产流产沙量, 达到降低磷素流失的目的; 也可能是由于在秸秆还田过程中, 秸秆能吸附一定量的磷, 改变耕地土壤的生态环境, 微生物能吸收环境中的磷^[32], 从而阻止磷和一些养分的流失和溶淋, 降低坡耕地径流和泥沙中总磷含量。同时, 在 4 场降雨中, 可以看出当降水量达到最高时, 产流产沙量也达到最大且携带的总磷含量也达到最高, 这是由于在较大的降水强度下坡耕地上水土流失严重, 增加了磷素流失风险。

综上所述, 二龙潭小流域烟草坡耕地农田生态系统可采用 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度以及加水堆沤处理降低该流域坡耕地径流泥沙及磷素的流失。为了控制该流域磷素流失的发生, 应尽量减少或避免在雨季进行农事活动, 减少对土壤的扰动, 以利于降低磷素流失含量, 并提高基肥、追肥和秸秆的利用效率; 在进行农事活动时考虑秸秆还田与减量施肥相配合, 在减小坡耕地产流产沙量的同时提高化肥利用率, 降低坡耕地面源污染, 有效避免磷素淋溶流失对该流域坡耕地带来的不利影响。

3.3 结论

- 1) 施用 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度、加水堆沤, 径流总磷与 PO₄-P 浓度分别降低了 2.82%~66.67% 和 1.97%~64.73%, 溶解态磷素占总磷浓度的 35.30%~77.59%, 为径流磷素流失的主要方式;
- 2) 施用 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度以及加水堆沤泥沙总磷流失浓度呈规律性下降, 幅度为 0.38%~57.53%; 随着烟草作物生长时间的推移, 各处理泥沙总磷流失浓度呈现逐渐降低的

趋势;

- 3) 施用 0.75 kg·m⁻² 秸秆密度、5 cm 秸秆粒度及加水堆沤可降低二龙潭小流域坡耕地磷素的流失风险, 径流和泥沙总磷流失量分别最高降低 63.64% 和 64.74%、63.89% 和 57.87%、63.89% 和 64.74%; 径流中磷素流失量为 1.97~11.24 mg·m⁻², 占磷素总流失量的 68.78%~74.44%。说明造成该流域农业面源污染的主要影响因素是降雨产生的径流所携带的磷素流失。

参考文献:

[1] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 等. 植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 1-5.

[2] 孙佳美, 余新晓, 樊登星, 等. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2574-2580.

[3] YANG J L, ZHANG G L, SHI X Z, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 105(2): 292-299.

[4] ARONSSON H, HANSEN E M, THOMSEN I K, et al. The ability of cover crops to reduce nitrogen and phosphorus losses from arable land in southern Scandinavia and Finland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 71(1): 41-55.

[5] MANDAL S, GOSWAMI A R, MUKHOPADHYAY S K, et al. Simulation model of phosphorus dynamics of an eutrophic impoundment-East Calcutta wetlands, a Ramsar site in India[J]. Ecological Modelling, 2015, 306: 226-239.

[6] AMAYA A, MEDERO N, TANCREDI N, et al. Activated carbon briquettes from biomass materials[J]. Biore-source Technology, 2007, 98(8): 1635-1641.

[7] SOLTANGHEISI A, RODRIGUES M, COELHO M J A, et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 179: 20-28.

[8] MALTAIS-LANDRY G, FROSSARD E. Similar phosphorus transfer from cover crop residues and water-soluble mineral fertilizer to soils and a subsequent crop[J]. Plant and Soil, 2015, 393(1/2): 193-205.

[9] 孙倩倩, 王正银, 赵欢, 等. 定位施磷对紫色菜园土磷素状况的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2539-2549.

[10] 黄琴. 作物秸秆还田对土壤养分含量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006(3): 277-279.

[11] 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.

[12] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田对稻田磷素径流损失的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(13): 5761-5763.

[13] 侯红波, 刘伟, 李恩尧, 等. 不同覆盖方式对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J]. [湖南生态科学学报](#), 2019, 6(1): 16-20.

[14] 王志荣, 梁新强, 隆云鹏, 等. 化肥减量和秸秆还田对油菜地磷素地表径流的影响[J]. [浙江农业科学](#), 2019, 60(2): 203-207.

[15] 国家环境保护局标准处. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.

[16] 中华人民共和国农业部种植业管理司. 植株全磷含量测定 钼锑抗比色法: NY/T 2421—2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2013.

[17] 中华人民共和国农业部种植业管理司. 土壤检测 第 24 部分: 土壤全氮的测定 自动定氮仪法: NY/T 1121.24—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.

[18] 李裕元. 坡地磷素迁移研究进展[J]. [水土保持研究](#), 2006(5): 1-4.

[19] 杨茜, 蒋珍茂, 石艳, 等. 低分子量有机酸对三峡库区消落带典型土壤磷素淋溶迁移的影响[J]. [水土保持学报](#), 2015, 29(1): 126-131.

[20] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. [应用生态学报](#), 2008(1): 65-70.

[21] 李太魁, 张香凝, 郭战玲, 等. 覆盖与间作对丹江口库区坡地茶园氮磷流失和土壤环境的影响[J]. [生态环境学报](#), 2020, 29(3): 543-549.

[22] 张奇, 陈粲, 陈效民, 等. 不同深度秸秆还田对黄棕壤氮素和微生物生物量碳氮的影响[J]. [水土保持通报](#), 2019, 39(2): 56-61.

[23] 杨坤宇, 王美慧, 王毅, 等. 不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J]. [农业环境科学学报](#), 2019, 38(8): 1723-1734.

[24] 杨珏, 阮晓红. 土壤磷素循环及其对土壤磷流失的影响[J]. [土壤与环境](#), 2001(3): 256-258.

[25] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. [环境科学](#), 2016, 37(7): 2770-2778.

[26] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. [水土保持学报](#), 2006(1): 30-32.

[27] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. [水土保持学报](#), 2014, 28(6): 41-45.

[28] LI L, DAVIS A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. [Environmental Science & Technology](#), 2014, 48(6): 3403-3410.

[29] 陈欣, 王兆骞, 杨武德, 等. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响[J]. [生态学报](#), 2000(3): 374-377.

[30] 尚念杰, 张玉涛. 有机厩肥不同施用量调控中等肥力土壤烤烟生产研究[J]. [耕作与栽培](#), 2018(4): 8-11.

[31] 王瑞, 刘继忠. 禄丰县高原特色农业发展浅析[J]. [云南农业](#), 2016(11): 12-14.

[32] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. [水土保持学报](#), 2012, 26(6): 6-10.

【责任编辑 李庆玲】