

秸秆还田方式对川南紫色土坡地水沙及氮磷流失的影响

曾谢伟^{1,2}, 李仁宇^{1,2}, 丁炜锋^{1,2}, 胡邦友³, 胡怀舟³, 李天阳^{1,2}, 何丙辉^{1,2}

(1. 宜宾西南大学研究院, 四川 宜宾 644000; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;

3. 宜宾自然免耕研究所, 四川 宜宾 644300)

摘要: [目的] 为探究不同秸秆还田方式对川南紫色土坡耕地水土流失及氮磷流失的影响, 筛选川南紫色土坡耕地最优秸秆还田方式。[方法] 在川南典型紫色土坡耕地(15°)建立径流小区, 设置5种处理方式: 无秸秆覆盖(CK)、低量秸秆覆盖(T1: 3 744 kg/hm²)、高量秸秆覆盖(T2: 7 488 kg/hm²)、低量秸秆覆盖+腐熟剂(T3: 3 744 kg/hm²+1.5 kg/hm²)和高量秸秆覆盖+腐熟剂(T4: 7 488 kg/hm²+3 kg/hm²)。监测次降雨监测时间、次降雨强度、不同处理的径流、泥沙特征及氮磷流失特征, 分析降雨、径流、泥沙与氮磷流失相关指标的关系。[结果] 1) 各处理中, T3处理的水土保持效果最佳, 相比CK处理降低径流深(减少40.2%)和泥沙流失量(减少55.3%), 并有效减少氮磷流失。2) 相关性分析显示, 氮磷流失主要受径流控制($p < 0.01$), 但径流TN浓度均随时间的增长而增加, 使秸秆还田阻控氮流失的效果随时间增长而减弱。3) 所有处理的径流TN/TP比值均 < 22 , 表明该区域坡耕地产生的径流为氮限制。[结论] 低量秸秆覆盖并添加腐熟剂可有效改善川南紫色土坡耕地的水土保持和养分利用, 为优化秸秆还田方式提供科学依据。

关键词: 秸秆覆盖; 秸秆腐熟剂; 氮磷比; 水土流失; 养分流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

Effects of Straw Incorporation Methods on Runoff, Sediment, and Nitrogen and Phosphorus Losses in Purple Soil Sloping Land of Southern Sichuan

ZENG Xiewei^{1,2}, LI Renyu^{1,2}, DING Weifeng^{1,2}, HU Bangyou³, HU Huaizhou³, LI Tianyang^{1,2}, HE Binghui^{1,2}

(1. Yibin Academy of Southwest University, Yibin, Sichuan 644000, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Yibin Natural No-tillage Research Institute, Yibin, Sichuan 644300, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different straw incorporation methods on soil and water erosion and nitrogen and phosphorus losses in purple soil sloping farmland of southern Sichuan, and to select the optimal straw incorporation method for purple soil sloping farmland in the region. [Methods] Runoff plots were established on a typical purple soil sloping farmland (15°) in southern Sichuan. Five treatments were set up: no straw mulching (CK), low-amount straw mulching (T1: 3 744 kg/hm²), high straw mulching (T2: 7 488 kg/hm²), low-amount straw mulching + decomposition agent (T3: 3 744 kg/hm² + 1.5 kg/hm²), and high straw mulching + decomposition agent (T4: 7 488 kg/hm² + 3 kg/hm²). Monitoring included rainfall time, rainfall intensity, runoff, sediment characteristics, and nitrogen and phosphorus loss characteristics. The relationships between rainfall, runoff, sediment, and nitrogen and phosphorus losses were analyzed. [Results] 1) Among all treatments, T3 exhibited the best soil and water conservation effect. Compared with CK, it reduced runoff depth (by 40.2%) and sediment loss (by 55.3%) and effectively reduced nitrogen and phosphorus losses. 2) Correlation analysis showed that nitrogen and phosphorus losses were mainly controlled by runoff ($p < 0.01$), but the concentration of total nitrogen (TN) in runoff increased over time, reducing the effectiveness of straw

收稿日期: 2025-02-25

修回日期: 2025-05-01

录用日期: 2025-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(U20A20326); 宜宾市双城协议保障科研经费项目(XNDX2022020002)

第一作者: 曾谢伟(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与面源污染研究。E-mail: zengxiewei2024@163.com

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

incorporation in controlling nitrogen loss. 3) The TN/TP ratio of runoff in all treatments was less than 22, indicating nitrogen limitation in the runoff of sloping farmland in the region. [Conclusion] Low-amount straw mulching combined with a straw decomposition agent can effectively improve soil and water conservation and nutrient utilization in the purple soil sloping farmland of southern Sichuan, providing a scientific basis for optimizing straw incorporation methods.

Keywords: straw mulching; straw decomposition agent; nitrogen-to-phosphorus ratio; water and soil erosion; nutrient loss

Received: 2025-02-25

Revised: 2025-05-01

Accepted: 2025-05-13

土壤侵蚀是全球农业面临的核心问题之一,尤其在坡耕地,侵蚀不仅破坏土壤内部结构、导致耕层变薄,还加剧泥沙及养分流失,从而降低耕地生产力^[1-2]。长期以来,秸秆覆盖还田被认为是控制土壤侵蚀的有效措施,其在治理耕地土壤侵蚀的效果上得到国内外的广泛证实^[3-5]。秸秆覆盖可以减缓雨滴对土壤的直接冲刷^[6],降低径流速度,减少泥沙流失,同时还能促进土壤养分循环,提高土壤肥力^[7]。研究^[8]表明,秸秆覆盖可有效降低土壤养分流失。秸秆覆盖还田主要通过减少径流量来减少泥沙量,从而间接减少养分流失,因为降雨量与径流量呈正相关,而径流量又与氮磷流失量呈显著正相关,通过秸秆覆盖还田降低径流量后,可以显著减少坡耕地养分流失。

紫色土是中国南方重要的耕地土壤类型,在四川盆地广泛分布,约占该地区耕地的68%^[9]。然而,由于紫色土土体薄弱,质地稍软,易于风化,土壤孔隙大与水分入渗能力强,极易发生土壤侵蚀^[10]。加上四川省60%以上的降雨属于侵蚀性降雨,在坡耕地条件下,土壤侵蚀问题尤为严重^[11]。四川省坡耕地又有分布广、面积大的特点^[12],使得四川成为我国南方土壤侵蚀重点区域之一^[13],川南地区作为四川盆地中耕地实际种植平均指数最低(121.63),潜力耕种平均指数最高(198.95)的区域^[14],在该区域紫色土坡耕地使用秸秆还田可阻控该区域土壤侵蚀,增高其耕种指数。目前通过秸秆还田阻控紫色土坡耕地土壤侵蚀的研究较为丰富,如徐泰平等^[15]研究发现,有65%~93%的氮磷通过径流与径流裹挟的泥沙流失,表明紫色土坡耕地氮磷流失的主要途径是通过降雨产生的径流及间接产生的泥沙流失,减少降雨产生的径流能有效抑制紫色土坡耕地的氮磷流失;刘海涛等^[16]在紫色土坡耕地的研究表明,粉碎秸秆覆盖相比完整秸秆覆盖的径流总氮流失少43.2%。

尽管秸秆还田对阻控土壤侵蚀有多种好处,但其在耕地中的自然腐解速率较慢,可能带来一系列问题。例如,秸秆腐解缓慢导致养分释放滞后,无法

满足作物生长需求,从而影响耕作和下茬作物的出苗率,同时可为害虫的孵化提供适宜环境^[17]。长期积累的未完全分解的秸秆还可能引发土壤酸化,降低耕地肥力^[18]。为解决这一问题,近年来有研究者^[19]提出施用秸秆腐熟剂,以加快秸秆分解速度,提高氮磷等养分的可利用性。施用腐熟剂可显著加快秸秆降解过程,提高养分供应能力,从而改善土壤肥力并促进作物生长。肖金宝等^[20]研究发现,施用腐熟剂可有效提高秸秆的腐解速率和养分释放率,并间接增加夏玉米的产量;WANG等^[21]研究表明,腐熟剂可以显著提高秸秆腐解速度,并提高秸秆的碳释放;WANG等^[22]研究指出,腐熟剂可有效增强真菌物种多样性,提高土壤养分丰度。可见,秸秆还田在搭配腐熟剂后,不但可以消除秸秆还田腐解过慢的缺点,还能有效提升作物产量,不过施用腐熟剂大量消耗氮素^[23],不仅改变耕地内的氮磷比,也改变径流流失的氮磷比,从而对下游营养情况产生影响,在施用腐熟剂时需注意氮磷流失比例,必要时施用氮肥。

目前关于秸秆腐熟剂在坡耕地中的应用及其对土壤侵蚀和养分流失的综合影响仍缺乏系统研究,因此,探索适宜的水土保持措施,优化秸秆还田方式,以减少紫色土坡耕地的土壤侵蚀及养分流失,对农业可持续发展具有重要意义。故本试验开展不同秸秆还田方式下对坡耕地产流产沙、氮磷流失变化及量化产流产沙与氮磷流失关系的监测试验,以期为川南地区紫色土坡耕地明确最优秸秆还田方式、阻控土壤侵蚀、减少土壤氮磷流失提供科学依据与指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取四川省宜宾市长宁县梅白镇洪漠村(28°40'39"N,104°55'02"E)为试验地点。该区属亚热带湿润性季风气候,年平均气温18.3℃,年平均降水量1 141.7 mm,其中52.1%的降雨集中在6—8月。试验点土壤为四川盆地典型紫色土。试验区坡耕地常年种植高粱(*Sorghum bicolor* L.)和玉米(*Zea mays* L.)等作物。

1.2 试验设计

试验采用径流小区法,在坡度为 15°^[24]的紫色土坡耕地建立 10 个径流小区(小区面积 5.0 m×2.5 m)。共设置 5 个处理,每个处理 2 个重复。处理方案为:CK,无秸秆覆盖(对照组);T1,3 744 kg/hm² 秸秆覆盖;T2,7 488 kg/hm² 秸秆覆盖;T3,3 744 kg/hm² 秸秆覆盖+1.5 kg/hm² 腐熟剂处理;T4,7 488 kg/hm² 秸秆覆盖+3 kg/hm² 腐熟剂处理。各处理中,秸秆用量按照当地高粱秸秆年平均收获量(7 488 kg/hm²)设定,腐熟剂用量参照当地农民习惯施用。覆盖用的秸秆参照当地农民习惯通过人工截断(长 20 cm)再与腐熟剂均匀混合,均匀覆盖于小区地表。试验点坡耕地土壤基本理化性质为土层 0~20 cm,pH 4.52,土壤体积质量 1.47 g/kg,土壤水分体积分数 12.00%,全氮 0.84 g/kg,全磷 0.20 g/kg。

各小区用 PVC(聚氯乙烯塑料)板隔开(厚约 1 cm),PVC 板深入地下 30 cm,高出地面 20 cm。各小区出口设置“T”形集流槽(长 2.5 m、宽 0.4 m、高 0.3 m),用于收集径流。集流槽上部用塑料薄膜进行密封遮盖,并用钢丝固定塑料薄膜防止雨水进入。集流槽底部铺设塑料薄膜后用 PVC 管(直径 10 cm)与径流桶(容积为 34 L)顶部相连(图 1)。

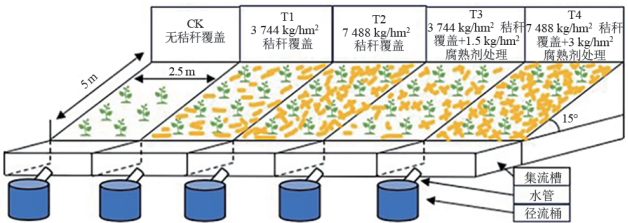


图 1 试验点位置及小区布设示意

Fig. 1 Location of experimental site and layout of plots

1.3 样品采集与分析

试验从 2023 年 12 月开始,为期 1 a。每次降雨后,记录降雨量。待降雨产流结束后,读取径流桶水深后,旋转径流桶内水样采集水体各水层剖面样,收集径流和泥沙带回试验室进行检测。采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法分别测定径流全氮(TN);采用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定径流全磷(TP)。

1.4 次降雨产流事件

降雨期间共产生 23 次降雨,其中有 6 次降雨产生径流。降雨量分布情况见图 2。具体降雨量及产生径流的降雨事件见图 3。

1.5 径流量计算

径流总量计算公式为:

$$V = \frac{1}{3} \times \pi \times h(r^2 + rR + R^2)$$
 (1)

式中:V 为径流总量,L;h 为径流桶内的径流水面深度,cm;r 为径流桶内的水面半径,cm;R 为径流桶底部半径,cm。

径流深计算公式为:

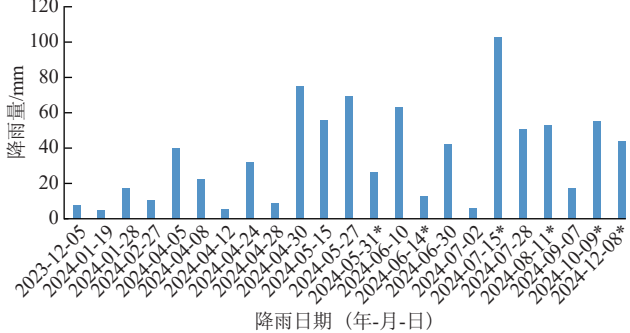
$$R = V / (H \times W)$$
 (2)

式中:R 为径流深,mm;V 为径流总量,L;H 为小区长度,m;W 为小区宽度,m。

泥沙量计算公式为:

$$S = V \times C$$
 (3)

式中:S 为泥沙总量,g;V 为径流总量,L;C 为泥沙总浓度,g/L。



注:*表示产流次降雨日期。

图 2 降雨日期与降雨等级

Fig. 2 Rainfall dates and rainfall levels

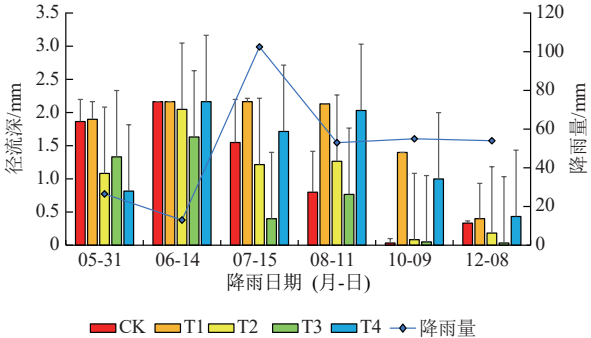


图 3 降雨量及径流深变化

Fig. 3 Changes in rainfall amount and runoff depth

1.6 氮磷流失量计算

TN、TP 流失量计算公式为:

$$Q = M \times V$$
 (4)

式中:Q 为每次产流的 N、P 流失量,mg;M 为径流中 TN、TP 浓度,mg/L;V 为每次产流的径流量体积,L。

径流氮磷摩尔质量比计算公式为:

$$N/P = \frac{N/14}{P/31}$$
 (5)

式中:N、P 为径流中 TN、TP 浓度,mg/L;14 为 N 的相对原子质量;31 为 P 的相对原子质量。

1.7 数据处理

使用 IBM SPSS 26 软件进行统计分析,采用 Microsoft Excel 2024 绘图。使用单因素方差分析(One-

way ANOVA)比较各处理间径流深、泥沙浓度、产沙量及 TN 和 TP 差异,并用 Duncan 进行多重检验。采用 Spearman 相关分析揭示不同指标间的相关性,利用回归分析建立各处理下氮、磷浓度间的数学函数关系。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

试验期间共产生 23 次降雨事件,其中有 6 次产生径流(图 2)。降雨量最大值发生在 2024 年 7 月 15 日,为 102.5 mm,最小值发生在 2024 年 1 月 19 日,仅有 4.6 mm,所有次降雨事件的降雨量平均值为 (35.75 ± 26.12) mm。产生径流的降雨事件平均降水量为 (48.0 ± 26.14) mm。试验期间最大降雨强度发生在 6.14 日,为 13.00 mm/d,最小降雨强度发生在 8.11 日,为 5.88 mm/d,平均降雨强度为 (8.36 ± 2.42) mm/d。降雨量与径流深度的关系见图 3,降雨历时与降雨强度的关系见图 4。

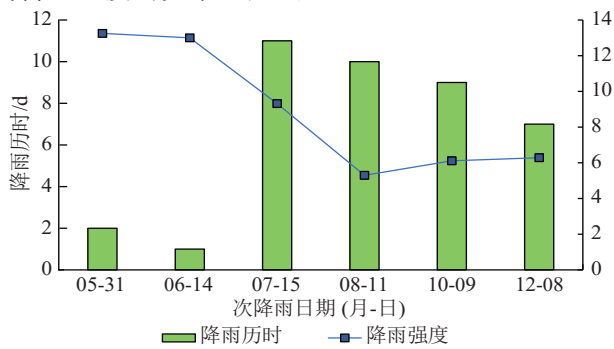


图 4 次降雨历时与降雨强度

Fig. 4 Duration and intensity of individual rainfall events

由图 5 可知,径流深随降雨强度的增高而增大,径流深与降雨强度的函数关系呈极显著线性函数关系($p < 0.001$)。

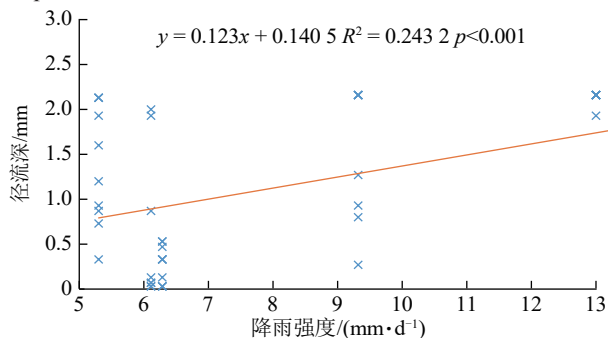


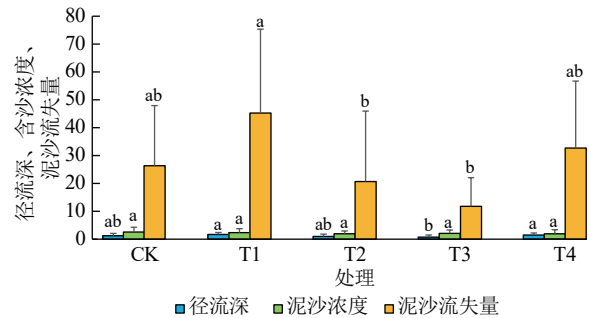
图 5 降雨强度与径流深的函数关系

Fig. 5 Functional relationship between rainfall intensity and runoff depth

2.2 产流产沙

由图 6 可知,试验过程中径流深为 0.03~2.20 mm,其中 T1 处理的径流深最高,T3 处理的最低。相比 CK,T1、T4 处理分别增加 38.1%、21.0% ($p > 0.05$),而 T2、T3 处理则分别减少 20.1%、40.2% ($p > 0.05$)。

比较各秸秆还田处理的产流情况可知,T3 处理的径流深最小,相比 T1、T2 与 T4 处理分别减少 56.7%、25.2%、50.6%,除与 T2 处理差异不显著外 ($p > 0.05$),T3 处理径流深平均值显著小于 T1 和 T4 处理 ($p < 0.05$)。表明添加腐熟剂的低量秸秆处理 (T3) 阻控径流效果优于高量秸秆处理 (T2) 与添加腐熟剂的高量秸秆处理 (T4)。



注:径流深单位为 mm,泥沙浓度单位为 kg/m^3 ,泥沙流失量单位为 kg/hm^2 。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 6 不同处理的径流深、泥沙浓度与泥沙流失量

Fig. 6 Runoff depth, sediment concentration and sediment amount under different treatments

径流泥沙浓度为 $0.1 \sim 5.8 \text{ kg}/\text{m}^3$,其中 CK 处理泥沙浓度最大,T4 处理最小。相比 CK,T1、T2、T3、T4 处理分别减少 8.3%、24.6%、18.8%、28.0% ($p > 0.05$)。比较各秸秆还田处理的泥沙浓度变化可知,T4 处理的泥沙浓度最小,相比 T1、T2、T3 处理分别减少 21.5%、4.5%、11.3%,但与其他处理的差异不显著 ($p > 0.05$)。表明秸秆覆盖量越高,径流泥沙浓度越小,添加腐熟剂对径流泥沙浓度影响较小。

试验过程中泥沙流失量为 $0.13 \sim 98.2 \text{ kg}/\text{hm}^2$,其中 T1 处理的泥沙流失量最大,T3 处理的最小。相比 CK,T1、T4 处理分别增加 71.7%、24.1% ($p > 0.05$),T2、T3 处理分别减少 21.5%、55.3% ($p > 0.05$)。比较各秸秆还田处理的泥沙流失量变化可知,T3 处理的泥沙流失量最小,相比 T1、T2、T4 处理分别减少 74.0%、43.0%、64.0%,除与 T2、T4 处理差异不显著外 ($p > 0.05$),T3 处理显著小于 T1 处理 ($p < 0.05$)。表明低量秸秆处理 (T1) 添加腐熟剂后 (T3) 可显著减少产沙量。

2.3 氮磷浓度

由图 7 可知,各处理径流 TN 浓度为 $6.42 \sim 10.83 \text{ mg}/\text{L}$,其中 CK 处理的径流 TN 浓度最大,T3 处理最小。相比 CK,T1、T2、T3、T4 处理分别减少 2.0%、1.51%、4.1%、3.3% ($p > 0.05$)。进一步比较各秸秆还田处理的径流 TN 浓度可知,T3 处理的径流 TN 浓度最小,相比 T1、T2、T4 处理分别减少 2.1%、2.7%、0.9%,但差异均不显著 ($p > 0.05$)。

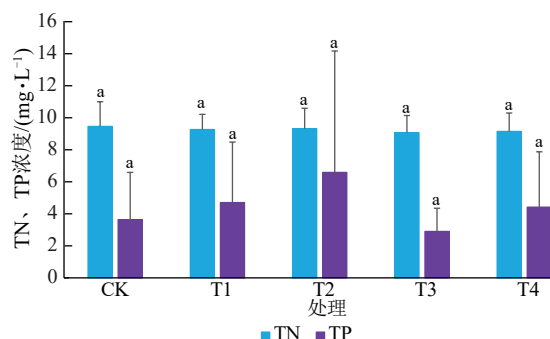


图7 不同处理下径流N、P的浓度

Fig. 7 Concentrations of runoff N and P under different treatments

各处理径流TP浓度为1.04~26.69 mg/L,其中T2处理的径流TP浓度最大,T3处理最小。相比CK,T1、T2、T4处理分别增加29.5%、81.3%、21.6% ($p>0.05$),T3处理则减少20.2% ($p>0.05$)。

进一步比较各秸秆还田处理的径流TP浓度可知,

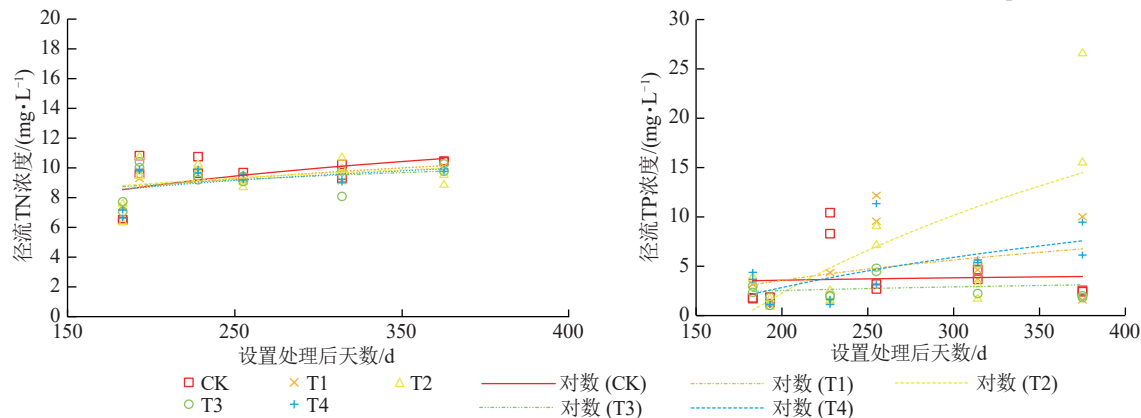


图8 径流TN与TP浓度随天数变化的函数关系

Fig. 8 Functional relationship between runoff TN and TP concentrations and number of days

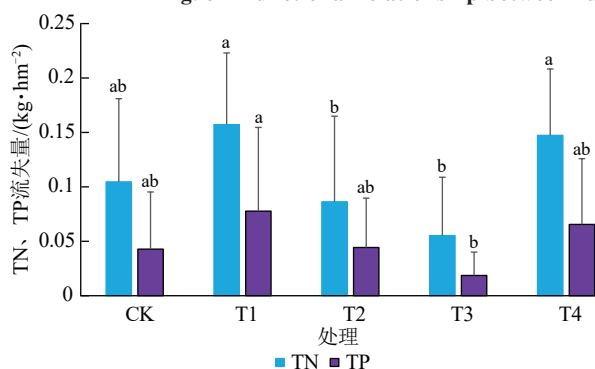


图9 不同处理下径流N、P的流失量

Fig. 9 Losses of runoff N and P under different treatments

进一步比较各秸秆还田处理的TN流失情况可知,T3处理的TN流失量最小,相较于T1、T2、T4处理分别减少64.9%、36.0%和62.5%。T3处理与T1和T4处理的差异达到显著水平 ($p<0.05$),但与T2处理无显著差异 ($p>0.05$)。T3处理的TN流失量显著低于T4处理 ($p<0.05$),表明添加腐熟剂的低量秸秆(T3)比高量秸秆(T4)更能减少TN流失。

T3处理的径流TP浓度最小,相比T1、T2、T4处理分别减少38.4%、56.0%、34.3%,但差异均不显著 ($p>0.05$)。通过各秸秆还田处理的TN、TP浓度变化,可知秸秆还田添加腐熟剂后一定程度减少径流中TN、TP浓度。

观察试验小区各处理径流TN、TP浓度随天数变化(图8)可知,各处理径流TN浓度均随时间的变化而增大,而径流TP浓度除CK、T3处理外也随时间的变化而增大。各处理回归分析后的 R^2 表现为对数函数关系最大,但除径流TN浓度的T1处理与径流TP浓度的T2处理外均不显著 ($p>0.05$)。

2.4 氮磷流失

由图9可知,试验过程中,径流TN流失量为0.002~0.23 kg/hm²,其中T1处理的TN流失量最高,T3处理最低。相比CK,T1和T4处理的TN流失量分别增加50.3%和40.8% ($p>0.05$),而T2和T3处理分别减少17.5%和47.2% ($p>0.05$)。

试验小区的径流TP流失量为0.000 6~0.26 kg/hm²,其中T1处理的径流TP流失量最大,T3处理最小。相比CK,T1、T2和T4处理的TP流失量分别增加81.5%、3.5%和53.0% ($p>0.05$),而T3处理TP流失量减少56.5% ($p>0.05$)。

进一步比较各秸秆还田处理的TP流失情况可知,T3处理的TP流失量最小,相较于T1、T2和T4处理分别减少76.0%、58.0%和71.6%。T3与T1处理的差异达到显著水平 ($p<0.05$),但与T2和T4处理无显著差异 ($p>0.05$)。T3处理的TP流失量虽低于T4处理,但二者差异不显著 ($p>0.05$),表明低量秸秆覆盖并添加腐熟剂(T3)能有效减少TP流失。

2.5 径流TN/TP变化特征与氮磷限制情况

由图10可知,在各次降雨事件中,各处理TN/TP为CK 2.05~16.58,T1 1.66~19.46,T2 0.74~19.51,T3 4.10~21.36,T4 1.80~19.50,从大到小依次为T3>T4>CK>T1>T2。参照水土富营养化评估的营养

物限制性划分标准^[25-26],本试验将 TN/TP $\geq$ 50 时定为磷限制, TN/TP $\leq$ 22 时定为氮限制,从各处理的平均值来看, TN/TP 最大值为 21.36, 低于氮限制的 22.00, 故本次试验所有处理的 TN/TP 都属于氮限制。各处理 TN/TP 从大到小为 T3>T4>CK>T1>T2 ($p>0.05$), 与氮磷浓度大小顺序相反, 表明添加腐熟剂的处理(T3、T4)使 TN/TP 比值增高。

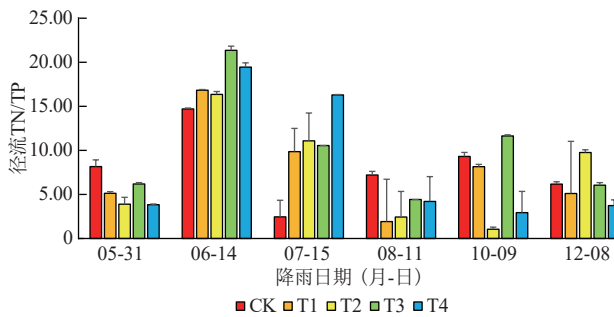


图 10 径流 TN/TP 变化

Fig. 10 Changes in runoff TN/TP ratio

2.6 径流与产流产沙、氮磷流失的关系

相关性分析表明,径流深、泥沙浓度、泥沙流失量、TN 流失量和 TP 流失量之间呈极显著正相关($p<0.01$),而 TN/TP 与径流深度、泥沙浓度、泥沙流失量呈显著负相关($p<0.05$)(表 1)。

3 讨论

3.1 不同秸秆还田方式对川南紫色土坡耕地产流产沙的影响

本研究发现,部分降雨事件中出现降雨量小但径流量大,或者降雨量大但径流量小的现象(如 6 月 14 日和 7 月 15 日),与李天阳等^[27]研究的紫色土坡耕地的径流深度通常随降雨量增加而增大、梁珂等^[28]发现的不同降雨强度与径流量、产沙量在紫色土坡耕地中呈极显著幂函数正相关相似。试验小区径流深与降

雨强度呈极显著线性函数关系($p<0.001$),可见影响径流大小的主要因素为降雨强度,也可能与降雨前土壤含水率过高有关。例如,6 月 14 日降雨事件发生前已有降雨过程,尽管这次降雨未产生显著径流,却饱和了土壤水分,使后续降雨的侵蚀能力增强。尽管 7 月 15 日降雨量最大,然而 7 月 15 日降雨事件前已有半月未曾降雨,夏季高温使得土壤含水率大幅下降,降雨大多渗入耕地,使得径流量并未大幅提升。类似的现象也曾其他研究中出现过,如 MENG 等^[29]研究发现,在三峡库区的坡地研究中,中等降雨量下的侵蚀强度甚至高于大降雨量的特殊事件,而 LIANG 等^[30]研究指出,低降雨强度次降雨事件下,土壤的含水率可能超过高降雨量条件,与本研究结果一致。

研究结果表明,在相同秸秆覆盖还田处理下, T2 (高量秸秆)处理产流产沙量均显著小于 T1 (低量秸秆)处理,且 T2 与 T4 处理的径流泥沙浓度最少,说明增加秸秆覆盖量可有效减少坡耕地水土流失,与已有研究^[31-33]结果一致。然而, T1 处理径流量高于对照组(CK),与 CHEN 等^[34]与 GAO 等^[35]的研究结果类似,前者在研究秸秆还田量对坡耕地径流和水土流失时发现, 1 125 kg/hm² 秸秆还田处理相比无秸秆覆盖处理侵蚀量更高,而秸秆还田量 $>4\,500\text{ kg/hm}^2$ 时才能有效缓解径流和侵蚀,在 9 000 kg/hm² 才能达到最佳效果。后者在研究模拟降雨条件下对红壤产流产沙的影响时发现, 20% 秸秆还田的径流量超过无秸秆还田的处理。秸秆还田主要通过地面覆盖来保护耕地表土^[6],但秸秆还田量过少使得秸秆在雨滴击打地面时的保护作用降低,导致土壤结构被雨滴击打破坏,加剧降雨对耕地的侵蚀,且过少的秸秆在耕地表面分布不均匀,可能导致地表水流集中,反而增加径流量。

表 1 各处理径流、泥沙量、TN 流失量、TP 流失量之间的相关性

Table 1 Correlation between runoff, sediment amount, TN loss, and TP loss under each treatment

项目	泥沙浓度	泥沙流失量	TN 浓度	TP 浓度	TN 流失量	TP 流失量	摩尔比
径流深	0.375**	0.837**	ns	-0.317*	0.860**	0.488**	0.275*
泥沙浓度		0.653**	ns	-0.345**	ns	ns	0.403**
泥沙流失量			ns	-0.271**	0.841**	0.459**	0.266*
TN 浓度				ns	ns	-0.479**	0.386**
TP 浓度					ns	0.546**	-0.979**
TN 流失量						0.707**	ns
TP 流失量							-0.612**

注: *表示相关性($p<0.05$)(单尾); **表示极显著相关性($p<0.01$)(双尾); ns 表示相关性在 0.05 水平上不显著。

T3 (低量秸秆+腐熟剂)处理的产流产沙量显著低于其他处理,表明腐熟剂的施用可增强水土保持效果。相比 T1 (低量秸秆)处理, T3 处理通过腐熟剂快速分解秸秆,形成分布均匀的秸秆碎片,解决 T1

处理秸秆分布不均匀的问题,可有效保护耕地表面不受雨滴击打,同时施用腐熟剂后可有效提升土壤团聚体稳定性^[36],从而改善土壤结构,提升土壤入渗率,减少径流产生。

尽管T4处理(高量秸秆+腐熟剂)也施用腐熟剂,但T4处理的径流量远高于T3处理,可能是由于其秸秆量与腐熟剂远高于T3处理,使得T4处理秸秆腐解速度更快,形成的腐殖质更多,腐殖质内的有机质超过一定阈值^[37],增加土壤表层的斥水性,阻拦降雨入渗,使得T4处理地表径流更多^[38];同时,未完全分解的秸秆碎片与腐殖质一同作用在土壤表面形成土壤结皮,从而增加芳香族化合物、酚类物质、硅质层等疏水性物质含量^[39];土壤结皮后还增加土壤体积质量^[40],再次减少土壤入渗率;在多重因素作用下,耕地表层的斥水性大幅提升,使T4处理的径流相比其他处理更大。相比T4处理,T3处理由于秸秆量低,腐殖质内有机质未达到一定阈值,且未与秸秆碎片结合形成结皮,故而未提升斥水性。

综上所述,川南紫色土坡耕地中,高量秸秆还田相比低量秸秆还田阻控产流产沙效果更好,添加腐熟剂后低量秸秆还田相比高量秸秆还田阻控产流产沙效果更好,而低量秸秆+腐熟剂效果强于高量秸秆还田。

3.2 不同秸秆还田方式对川南紫色土坡耕地氮磷流失的影响

研究发现,各处理的径流氮磷浓度均无显著变化,秸秆覆盖主要通过减少径流量来降低氮磷流失,而非直接影响氮磷浓度,与李刚浩等^[8]的研究结论相符,其研究指出秸秆覆盖主要通过降低径流量来减少氮磷流失,但对氮磷浓度影响较小。

尽管氮磷浓度无显著变化,但氮磷流失量的变化趋势与径流深度的变化趋势一致,表明降雨径流是氮磷流失的主要影响因素,而非氮磷浓度。相关性分析表明,TN、TP流失量与径流深呈极显著正相关($p < 0.01$),其相关性远高于TN、TP浓度,与ZHAO等^[41]的研究结论一致。后者指出,径流量对坡耕地养分流失的影响远大于养分浓度本身。因此,减少侵蚀性降雨产生的径流量是减少养分流失的关键策略。本研究发现,T3处理的水土保持效果最佳,同时其氮磷流失量也最低,进一步验证减少径流量可有效减少氮磷流失的结论。

本研究还发现,所有处理的径流TN/TP均低于22,表明研究区径流对下游主要为氮限制。T3与T4处理的TN/TP比值略大于其他处理,说明腐熟剂的施用可能增加氮素释放。ZHANG等^[42]的研究表明,腐熟剂可加速秸秆分解,并促进共养细菌活性,而共养细菌的相对丰度与土壤全氮、速效氮、速效磷呈显著正相关,从而提高土壤氮磷浓度。戴志刚等^[43]研究发现,秸秆分解过程中氮、磷元素的释放率分别可达40%和50%,这一过程可能进一步增加土壤养分。

然而,HAN等^[44]的研究指出,施用秸秆腐熟剂后,土壤氮磷均有增加,然而氮磷的去向较为复杂,可能被作物吸收,也可能被微生物吸收或二者共同吸收,也是本研究中腐熟剂处理(T3、T4)与未施用腐熟剂处理(T1、T2)的氮磷浓度无显著差异的原因。试验结果中TN比值高于TP,是因为氮磷流失的主要流失途径是径流,而磷主要以颗粒态磷的形式流失^[27],由于大量径流稀释泥沙浓度,从而减少TP的浓度,此消彼长之下使得TP浓度的比例相比TN更小。

各处理中TN浓度均随时间的增加而增加,而径流TP浓度(除CK、T3外)也呈上升趋势。是因为紫色土本身易风化、孔隙度大、入渗能力强^[10],极易受到土壤侵蚀的影响,而土壤氮磷流失与土壤侵蚀息息相关,在长达1a的降雨侵蚀下,土壤结构逐渐被破坏,导致氮磷流失加剧。由于秸秆需要长期还田才能完全分解,在分解过程中仍然继续释放N、P,这些释放的N、P在土壤结构破坏后随径流和泥沙一同流失,从而增加径流TN、TP的浓度。随着TN、TP浓度的增加,氮磷流失的主要途径可能从径流转变为氮磷浓度主导,意味着秸秆还田阻控氮磷流失的效果可能随时间减弱。维持措施到375d时,T3处理的径流TN、TP浓度最小,可见T3(低量秸秆+腐熟剂)处理在长期还田下对径流氮磷浓度的控制效果更好。

4 结论

1)相比CK径流深,T1、T4处理分别增加38.1%、21.0%($p > 0.05$),而T2、T3处理则分别减少20.1%、40.2%($p > 0.05$);对于产沙量,T1、T4处理分别增加71.7%、24.1%($p > 0.05$),而T2、T3处理分别减少21.5%、55.3%($p > 0.05$);相比CK,T1、T4处理的总氮(TN)流失量分别增加50.3%、40.8%($p > 0.05$),而T2、T3处理则分别减少17.5%、47.2%($p > 0.05$);对于总磷(TP)流失量,T1、T2、T4处理分别增加81.5%、3.5%、53.0%($p > 0.05$),而T3处理则减少56.5%($p > 0.05$)。结果表明,T3处理在阻控川南紫色土坡耕地产流、产沙与氮磷流失的效果最佳。

2)相关性分析显示,TN和TP流失量与径流深度呈极显著正相关($p < 0.01$),其相关性远高于TN和TP浓度。表明在影响川南紫色土坡耕地氮磷流失的因素中,径流深度的影响远高于氮磷浓度。

3)各处理TN/TP从大到小依次为T3>T4>CK>T1>T2($p > 0.05$),与氮磷浓度的大小顺序相反,表明添加腐熟剂的处理(T3、T4)使TN/TP比值增高。所有处理下TN/TP均<22,表明所有处理下产生的径流均为氮限制。

4)径流TN浓度均随时间增长而增加,表明秸秆

还田在长期作用下氮流失的控制效果逐渐减弱。

5) 川南紫色土坡耕地水土、氮磷协同流失亟待控制, 本试验明确秸秆还田与腐熟剂协同施用量, 为该区域优化秸秆还田方式提供科学依据。

参考文献:

- [1] 彭大力, 张斌, 吴林蓬, 等. 龙川江流域近 20 年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 29-37.
PENG D L, ZHANG B, WU L P, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River Basin in recent 20 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 29-37.
- [2] WANG C G, MA J Y, WANG Y X, et al. The influence of wheat straw mulching and straw length on infiltration, runoff and soil loss[J]. Hydrological Processes, 2022, 36(4): ee14561.
- [3] 李刚浩, 夏颖, 黄敏, 等. 三峡库区坡耕地免耕秸秆覆盖下氮磷流失特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 93-99.
LI G H, XIA Y, HUANG M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses on sloping farmland under no-tillage and straw mulch in the Three Gorges Reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 93-99.
- [4] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土[M]. 上篇. 北京: 科学出版社, 1994: 1-277.
Soil Research Office of Chengdu Branch, Chinese Academy of Sciences. Purple soil in China[M]. Volume I. Beijing: Science Press, 1994: 1-277.
- [5] 周琳, 许武成, 尹义星. 近 61 年四川省降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 8-14.
ZHOU L, XU W C, YIN Y X. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Sichuan Province in recent 61 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 8-14.
- [6] 田罗, 周文佐, 何万华, 等. 2000—2016 年四川省耕地种植指数时空变化及其自然潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1206-1216.
TIAN L, ZHOU W Z, HE W H, et al. Spatio-temporal evolution and potential analysis of cropping index in Sichuan Province during 2000—2016[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1206-1216.
- [7] 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, 20(1): 30-32.
XU T P, ZHU B, WANG T, et al. Effects of returned straw on nutrient loss from slope cropland of purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 30-32.
- [8] 刘海涛, 姚莉, 朱永群, 等. 深松和秸秆覆盖条件下紫色土坡耕地水分养分流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 52-57.
LIU H T, YAO L, ZHU Y Q, et al. Characteristics of water and nutrients loss under subsoiling and straw mulching in purple soil slope cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 52-57.
- [9] 肖金宝, 白延倩, 杨宝平, 等. 秸秆腐解与养分释放特征对腐熟剂用量的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 181-191.
XIAO J B, BAI Y Q, YANG B P, et al. Response of straw decomposition and nutrient release characteristics to the amount of decomposition agent[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 181-191.
- [10] WANG X, WANG X X, GENG P, et al. Effects of different returning method combined with decomposer on decomposition of organic components of straw and soil fertility[J]. Scientific Reports, 2021, 11: e15495.
- [11] WANG X G, WANG Q S, ZHANG Y C, et al. Influence of decomposition agent application and schedule in wheat straw return practice on soil quality and crop yield[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): e8.
- [12] 季鹏飞, 许海, 詹旭, 等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4030-4041.
JI P F, XU H, ZHAN X, et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4030-4041.
- [13] 李天阳, 何丙辉, 张海香, 等. 典型农作措施对沙溪庙组壤质紫色土坡耕地径流氮流失的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 3894-3905.
LI T Y, HE B H, ZHANG H X, et al. Effects of representative agricultural measures on runoff nitrogen loss in loamy purple sloping croplands originating from Shaximiao Group[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3894-3905.
- [14] 梁珂, 贺小容, 何丙辉, 等. 翻耕除草对不同坡长下紫色土氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 7-13.
LIANG K, HE X R, HE B H, et al. Effects of tillage and weeding on nitrogen and phosphorus losses of purple soil at different slope lengths[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 7-13.
- [15] MENG X M, ZHU Y, YIN M S, et al. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope[J]. Scientific Reports, 2021, 11: e16341.
- [16] LIANG Z W, CHEN X A, WANG C, et al. Response of soil moisture to four rainfall regimes and tillage measures under natural rainfall in red soil region, southern China[J]. Water, 2024, 16(10): e1331.
- [17] PARHIZKAR M, SHABANPOUR M, LUCAS-BORJA M E, et al. Effects of length and application rate of rice straw mulch on surface runoff and soil loss under laboratory simulated rainfall[J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(4): 468-478.
- [18] CHEN S Q, ZHANG G H, WANG C S. How does straw-incorporation rate reduce runoff and erosion on

- sloping cropland of black soil region? [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 357: e108676.
- [19] GAO Z C, XU Q X, SI Q, et al. Effects of different straw mulch rates on the runoff and sediment yield of young citrus orchards with lime soil and red soil under simulated rainfall conditions in southwest China [J]. Water, 2022, 14(7): e1119.
- [20] 陆峰, 廖超林, 周红审, 等. 稻草秸秆配施腐熟剂对植烟土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 35(2): 83-88.
- LU F, LIAO C L, ZHOU H S, et al. Effects of rice straw application combined with decomposition agent on soil aggregate stability and organic carbon in tobacco-planting soil[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35(2): 83-88.
- [21] 贾乾威, 刘秀状, 肖培源, 等. 盐城滩涂土壤剖面有机质组成及分布特征[J]. 湿地科学, 2015, 13(1): 74-79.
- JIA Q W, LIU X Z, XIAO P Y, et al. Composition and distribution characteristics of organic matter in soil profiles of Yancheng flats[J]. Wetland Science, 2015, 13(1): 74-79.
- [22] VERHEIJEN F G A, CAMMERAAT L H. The association between three dominant shrub species and water repellent soils along a range of soil moisture contents in semi-arid Spain [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(17): 2310-2316.
- [23] 赵晓乐, 王琦, 马文. 秸秆碎片-土壤结皮覆盖垄沟集雨种植对紫花苜蓿根系和产量的影响[J/OL]. 草原与草坪, 2025: 1-16. (2025-03-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1156.S.20250328.1039.004.html>.
- ZHAO X L, WANG Q, MA W. Effect of ridge-furrow rain-water harvesting compacted with chopped straw-soil crust on root characteristics and yield of alfalfa[J/OL]. Grassland and Turf, 2025: 1-16. (2025-03-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1156.S.20250328.1039.004.html>.
- [24] 麦合穆提·拜合提, 丁峰, 李彦, 等. 基于熵权-TOPSIS综合评价法的苜蓿最适灌溉方式研究[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(1): 249-256.
- Meihemuti B H T, DING F, LI Y, et al. Research on the most suitable irrigation method for alfalfa based on entropy weight-TOPSIS [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(1): 249-256.
- [25] ZHANG Q W, LIU D H, CHENG S H, et al. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 1-8.
- [26] ZHAO J, NI T, XUN W B, et al. Influence of straw incorporation with and without straw decomposer on soil bacterial community structure and function in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(11): 4761-4773.
- [27] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276.
- DAI Z G, LU J W, LI X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 272-276.
- [28] HAN J X, SONG X Y, FU H Y, et al. Effects of the decomposition agent application on the physicochemical properties and microbial community structure of wheat straw-returning soil [J]. Environmental Technology and Innovation, 2024, 35: e103668.