DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.017 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.017
张泽豪, 李鑫, 刘兵, 等. 自然降雨下紫色土坡耕地碳源添加对氮素流失的影响效应[J]. 水土保持研究,2026,33(6):150-159,167.
Zhang Zehao, Li Xin, Liu Bing, et al. Effects of carbon source addition on nitrogen loss in purple soil slope farmland under natural rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):150-159,167.

自然降雨下紫色土坡耕地碳源添加对氮素流失的影响效应

张泽豪[1,2,3], 李 鑫[1,3], 刘 兵[2], 刘 煜[2], 展晓莹[2],
张晴雯[2], 陈红琳[4], 陈尚洪[4], 刘定辉[4], 郝 卓[2]
(1.石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2.中国农业科学院
农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3.道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室
(石家庄铁道大学), 石家庄 050043; 4.四川省农业科学院 农业资源与环境研究所, 成都 610066)

摘 要:[**目的**]探究自然降雨条件下外源碳添加对长江中上游紫色土氮素流失的阻控效应及其影响因素,为紫色土区农业面源污染防控及水土资源可持续利用提供科学依据。[**方法**]以长江中上游的紫色土丘陵区作为研究对象,设置了6种不同处理,分别为化肥+秸秆生物炭(T_1)、化肥+猪粪有机肥料(T_2)、化肥+牛粪有机肥料(T_3)、化肥+高有机质含量生物有机肥(T_4)、化肥+复合微生物肥料(T_5)、施用常规化肥NPK处理作为对照组(T_6),每种处理重复3次,监测2023年、2024年地表径流、壤中流铵态氮、硝态氮以及总氮的流失通量,分析了不同处理对土壤氮素流失的影响效应。[**结果**](1)研究区降雨主要集中在4—10月,研究中,当降雨量大于50 mm时,不同处理下的地表产流量大小为$T_2>T_3>T_4>T_1>T_6>T_5$,不同处理下的产沙量大小为$T_4>T_2>T_1>T_3>T_6>T_5$,各处理地表径流总氮流失占比大小为T_5(11.97%)<T_4(12.97%)<T_1(15.12%)<T_3(15.32%)<T_6(17.54%)<T_2(27.08%),各处理壤中流氮素流失占比为T_4(13.8%)<T_1(15.29%)<T_3(15.31%)<T_5(16.8%)<T_2(17.5%)<T_6(21.3%)。(2)偏最小二乘路径模型(PLS-PM)表明,降雨特征、不同碳源添加、土壤理化性质在不同程度上影响氮素的流失。[**结论**]T_1,T_3,T_4,T_5外源碳添加有效缓解了自然降雨下紫色土的氮素流失,且土壤中氮素主要是硝态氮流失。PLS-PM模型进一步分析,降雨是氮素流失的重要环境因素,同时通过改变土壤团聚体结构和容重间接影响农田氮素流失。

关键词:紫色土; 碳源添加; 自然降雨; 地表径流; 氮素流失
中图分类号:S157.1; S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0150-10

Effects of carbon source addition on nitrogen loss in purple soil slope farmland under natural rainfall

Zhang Zehao[1,2,3], Li Xin[1,3], Liu Bing[2], Liu Yu[2], Zhan Xiaoying[2], Zhang Qingwen[2],
Chen Honglin[4], Chen Shanghong[4], Liu Dinghui[4], Hao Zhuo[2]
(1.*School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang* 050043, *China*; 2.*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; 3.*Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang* 050043, *China*; 4.*Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu* 610066, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study investigates the mitigation effects and influencing factors of exogenous carbon addition on nitrogen loss from purple soil in the middle and upper reaches of the Yangtze River under natural

收稿日期:2025-11-26 **修回日期:**2026-01-30 **接受日期:**2026-02-07
资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1901401);国家自然科学基金(42107083);中央引导地方科技发展资金项目(236Z5405G)
第一作者:张泽豪(2001—),男,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为流域生物地球化学循环。E-mail:810932654@qq.com
通信作者:李鑫(1989—),男,陕西商洛人,博士,讲师,主要从事岩土体渗流及其环境地质效应研究。E-mail:xinli@stdu.edu.cn
郝卓(1990—),女,吉林省吉林市人,博士,副研究员,主要从事流域碳-氮-水耦合过程与机制研究。E-mail:haozhuo@caas.cn

rainfall conditions, providing a scientific basis for the prevention and control of agricultural non-point source pollution and the sustainable utilization of water and soil resources in purple soil regions. [**Methods**] Taking the hilly purple soil region in the middle and upper reaches of the Yangtze River as the research subject, six treatments were established, each with three replicates: chemical fertilizer + straw biochar (T_1), chemical fertilizer + pig manure organic fertilizer (T_2), chemical fertilizer + cattle manure organic fertilizer (T_3), chemical fertilizer + high-organic-matter bio-organic fertilizer (T_4), chemical fertilizer + compound microbial fertilizer (T_5), and a control group receiving conventional NPK fertilizer (T_6). The loss fluxes of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and total nitrogen in surface runoff and interflow were monitored in 2023 and 2024, and the effects of different treatments on soil nitrogen loss were analyzed. [**Results**] (1) Rainfall in the study area was predominantly concentrated from April to October. When rainfall was greater than 50 mm, the surface runoff volume across different treatments followed the order of $T_2 > T_3 > T_4 > T_1 > T_6 > T_5$, while the sediment yield was ranked as $T_4 > T_2 > T_1 > T_3 > T_6 > T_5$. The proportion of total nitrogen loss through surface runoff was T_5 (11.97%) < T_4 (12.97%) < T_1 (15.12%) < T_3 (15.32%) < T_6 (17.54%) < T_2 (27.08%), and the proportion of nitrogen loss via interflow was T_4 (13.8%) < T_1 (15.29%) < T_3 (15.31%) < T_5 (16.8%) < T_2 (17.5%) < T_6 (21.3%). (2) Partial least squares path modeling (PLS-PM) revealed that rainfall characteristics, carbon source addition, and soil physicochemical properties influenced nitrogen loss to varying degrees. [**Conclusion**] Exogenous carbon addition in treatments T_1, T_3, T_4, and T_5 effectively mitigates nitrogen loss from purple soil under natural rainfall, and nitrate nitrogen is the predominant form of nitrogen loss in the soil. Further analysis using PLS-PM shows that rainfall is a critical environmental driver of nitrogen loss, while also indirectly influencing nitrogen loss in farmland by altering soil aggregate structure and bulk density.

Keywords: purple soil; carbon source addition; natural rainfall; surface runoff; nitrogen loss

坡耕地因其特殊的地形条件，在降雨和地表径流的作用下，成为土壤侵蚀、水土流失的重灾区，其对我国水土流失的贡献率高达28.3%[1]。水土流失不仅使表层肥沃土壤的剥离与厚度降低，还会造成泥沙和洪涝灾害，导致土壤养分流失与水体污染。大量的营养物质如氮、磷、钾等关键土壤养分随泥沙和径流流失，导致该地区的土壤肥力下降，影响农作物产量和质量[2]。

紫色土[3]作为我国长江中上游的重要耕地资源，占土地总面积的18%[4]，因其多分布于丘陵坡地，土层较薄，多为初育土[5]，是我国水土流失、土壤侵蚀最为严重的地类之一[6-7]。为减缓紫色土坡耕地土壤营养物质流失，国内学者进行了大量研究。研究发现，刘自飞等[8]研究表明，降雨是造成地表径流最主要的驱动因子。孙理阳等[9]研究表明，降雨是坡面产流产沙的关键驱动因素，且产流产沙量是影响氮磷流失的重要因素。史广宇等[10]研究表明，施加生物炭缓解土壤氮素流失的机理主要为缓解铵态氮和硝态氮的流失、抑制N_2O的逸散、提高植物吸收氮素的能力。生物炭不仅拥有较强的铵态氮吸附能力，还具有提高土壤碳含量、pH值和土壤含水量等能力，从而降低因地表径流和水分入渗导致的铵态氮和硝态氮的流失量。刘懿枢等[11]研究表明，施肥模式显著影响径流中氮磷流失特征，其中综合优化施肥模式对降低流失负荷的效果最优。与常规施肥相比，有机物料还田（秸秆）与矿质肥料（灰肥）协同施肥可有效减少稻田氮磷流失负荷。周晓航等[12]研究表明，施加猪粪导致硝态氮流失量大于施加牛粪的流失，猪粪主要表现为硝态氮流失。目前关于紫色土坡耕地氮流失过程的研究主要集中在模拟降雨[13-14]下土壤氮素随径流及泥沙的流失，虽然便于控制变量，但难以反映紫色土区自然降雨的复杂特征。亚热带湿润季风气候下的紫色土区自然降雨具有雨强变异性大、雨型多样、间隔时间不确定等特点，这些因素共同影响氮素流失过程。同时施肥处理单一，多以传统碳源为主，模拟降雨与自然降雨产生的径流亦有显著差异，实际估算氮素流失量方面有较大的误差。因此，在自然降雨条件下开展多碳源添加对氮素流失影响效应的研究，对于揭示紫色土坡耕地真实环境中的氮素流失阻控效应具有重要意义。

因此，本研究依托四川省农业科学院中江仓山综合试验示范基地，以紫色土坡耕地为研究对象，在自然降雨条件下，进行不同新型碳源（动物源、植物源）添加，对降雨产生径流泥沙以及氮素流失进行相关分析，探究不同处理下径流中不同形态氮素迁移特征，为提高紫色土坡地土壤肥力和减少土壤氮素流失提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究地点位于四川省德阳市中江县仓山镇的生态试验基地，该地区经度为105°3′1.04″E，纬度为30°37′59.43″N。属于典型的紫色土坡耕地区域。气候类型为亚热带湿润季风气候，雨量充沛，年平均气温16.7 ℃，年降水量882 mm左右。试验区以丘陵和山地地形为主，主要种植油菜、玉米和小麦。土壤母质来源于侏罗纪遂宁组，发育形成紫色土，土层厚度约60 cm。由于长期耕作，土壤有机质含量较低，质地为砂壤，整体抗侵蚀能力较弱。表1为该土壤的理化性质。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic soil physicochemical properties

土壤有机碳/($g \cdot kg^{-1}$)	全氮/($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/($g \cdot kg^{-1}$)	有效磷/($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾质量分数/($g \cdot kg^{-1}$)	pH值	体积质量/($g \cdot cm^{-3}$)
7.43±0.27	1.06±0.13	0.92±0.08	3.03±0.55	0.21±0.03	8.19±0.11	1.58±0.04

1.2 试验设计

用混凝土浇筑多个坡度为10°的土壤区域，土壤的表面面积为16 m^2(3.2 m×5 m)，深度60 cm，在各个小区末尾设计一个汇流沟，使得降雨产生的地表径流汇集到一起，并在最后安放集流桶，为防止水流过多，在集水桶旁再添加一个分流桶，具体模型见图1。采用夏季种玉米的种植方式，玉米使用“仲玉3号”，试验在玉米生长期进行，2023年5月17日播种，2023年9月20日收获。每个小区添加不同的碳源有机肥和土壤改良材料等N替代，一共设置6种处理，分别是化肥＋秸秆生物炭(T_1)、化肥＋猪粪有机肥料(T_2)、化肥＋牛粪有机肥料(T_3)、化肥＋高有机质含量生物有机肥(T_4)、化肥＋复合微生物肥料(T_5)、施用常规化肥NPK处理作为对照组(T_6)，每种处理进行3次重复，进行等N量施肥。玉米季氮肥分两次进行添加，第一次添加在玉米种植时作为基肥添加，添加量为总量的70%，第二次在7月上旬添加，在玉米种植前，把有机肥均匀地覆盖在土壤表面，并把土壤进行翻耕使有机肥进入0—20 cm土壤。每种处理的3个小区碳源添加量和管理都相同，每种处理的施肥量见表2。

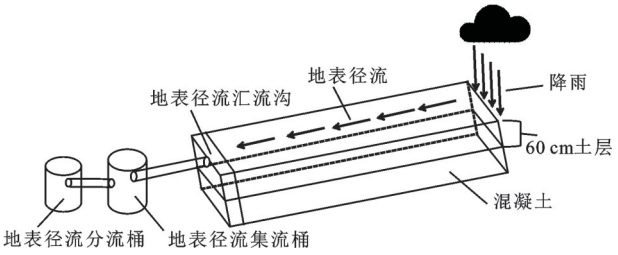


图1 径流小区示例图

Fig. 1 Schematic diagram of runoff plot

表2 不同处理施肥量

Table 2 Amount of fertilizer applied in each treatment

作物	处理	N-尿素/($kg \cdot hm^{-2}$)	有机肥/($kg \cdot hm^{-2}$)	秸秆/生物炭/($kg \cdot hm^{-2}$)	P_2O_5/($kg \cdot hm^{-2}$)	K_2O/($kg \cdot hm^{-2}$)
玉米	T_1	192	0	6611.6	60	90
	T_2	168	3429	0	60	90
	T_3	168	8674.7	0	60	90
	T_4	168	3730	0	60	90
	T_5	168	4615	0	60	90
	T_6	240	0	0	60	90

1.3 样品采集

在玉米播种前，收集基础土样。监测期间，玉米生育期无机氮质量分数变化比较大。把玉米各生育期期间的0—20 cm土层作为代表性样本，作为当月土壤无机氮含量背景值，玉米收获后再行取样。用梅花形多点法在0—20 cm土层进行采样，四分法混匀后装入自封袋，迅速带回实验室。把土样中的石块、根系、枯落物、土壤动物及秸秆等杂物清理干净，对土样进行自然风干，按分析需求研磨并通过20目和100目筛，用于测定土壤有机碳(SOC)含量和基本理化性质。每次降雨之后，对地表径流、壤中流、泥沙进行采样。采样时，观测各处理集水桶和分流桶的水位，计算各处理地表径流的产量。将各个处理集水桶里的水搅拌均匀，分别装入500 ml聚乙烯瓶，水样经过0.45 μm过滤，之后把过滤膜放到铝盒里，等至完全干燥，进行称重，计算流失泥沙量。

1.4 样品测定

SOC采用干烧法(multiN/C2100S)测定，土壤基本理化指标的测定方法见《土壤农化分析与环境监测》。水样测定指标包括硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)和总氮(TN)，总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定，铵态氮(NH_4^+-N)用纳氏

试剂比色法测定，硝态氮（NO_3^--N）用紫外分光光度法测定。采用凯氏定氮法测试土壤的固态氮素含量（T）。土壤团聚体为水稳性团聚体，采用湿筛法测定，容重采用环刀法测定。

1.5　数据处理与分析

径流小区氮湿沉降通量计算公式为[15]

$$F = cp \tag{1}$$

式中：F为氮湿沉降通量（mg/m²）；c为降水事件中氮化合物的浓度（mg/L）；p为降雨事件的降水量（mm）。

径流中各氮元素迁移通量计算公式为[16]

$$Q = C_i q \tag{2}$$

式中：Q为径流中氮元素迁移量（mg/m²）；C_i为径流中不同氮化合物的浓度（mg/L）；q为小区单位面积产生的径流量（L/m²）。

本文采用Origin 2024进行图表绘制，采用SPSS 27版本进行影响氮素流失的相关性分析。用RStudio中的PLSPM软件包进行分析，采用偏最小二乘法路径模型（PLS-PM）来模拟降雨量、土壤理化性质、碳源添加、各种氮化合物的流失通量和土壤有机碳的关系，得出路径系数和R^2。

2　结果与分析

2.1　自然降雨下氮湿沉降通量

如图2所示，2023年总降雨量为983.1 mm，2024年总降雨量为835.2 mm。降雨主要集中在4—10月份，其中两年的7月份降雨量都达到顶峰，分别为386.3，317.1 mm。2023年10月为2023年降雨次数最多的月份，降雨14次，但总降雨量只有54.7 mm，只有2023年7月份降雨量的14.16%。2024年4月为2024年降雨次数最多月份，为17次，总降雨量为146.3 mm，只有2024年7月降雨量的46.13%。研究期间，小区共产生8次径流，分别为2023年的7月27日、8月7日、8月26日和9月11日以及2024年的7月8日、7月10日、7月14日和7月17日，具体降雨量见图3A。图3B是总氮湿沉降通量变化，2023年7月27日和9月11日产生的总氮湿沉降远高于其他6天，其中9月11日各处理的氮湿沉降达到峰值。T_1处理沉降通量达到最大值，为6.28 kg/hm²。T_2，T_3，T_4，T_5与T_6处理沉降通量，分别为4.91，3.76，4.46，3.13，4.38 kg/hm²。

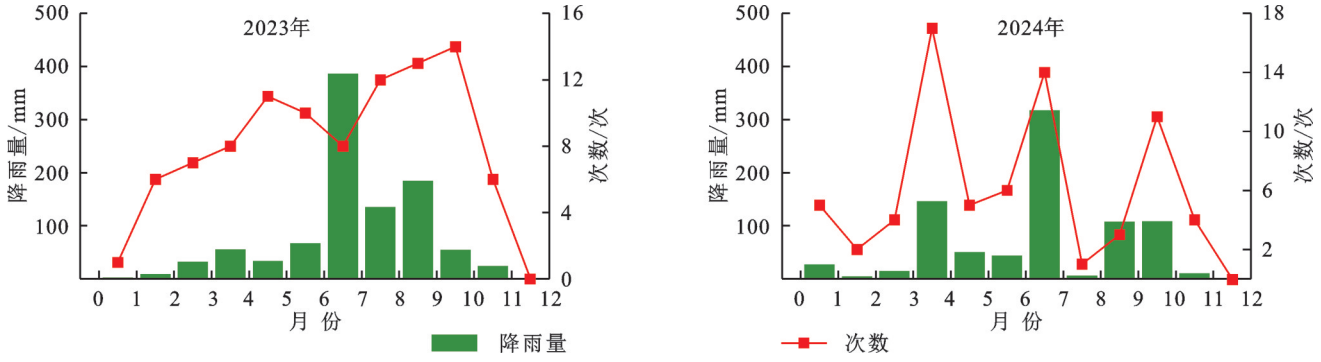


图2　2023年、2024年月降雨量变化及降雨次数

Fig. 2　Monthly variations in rainfall and number of rainfall events in 2023 and 2024

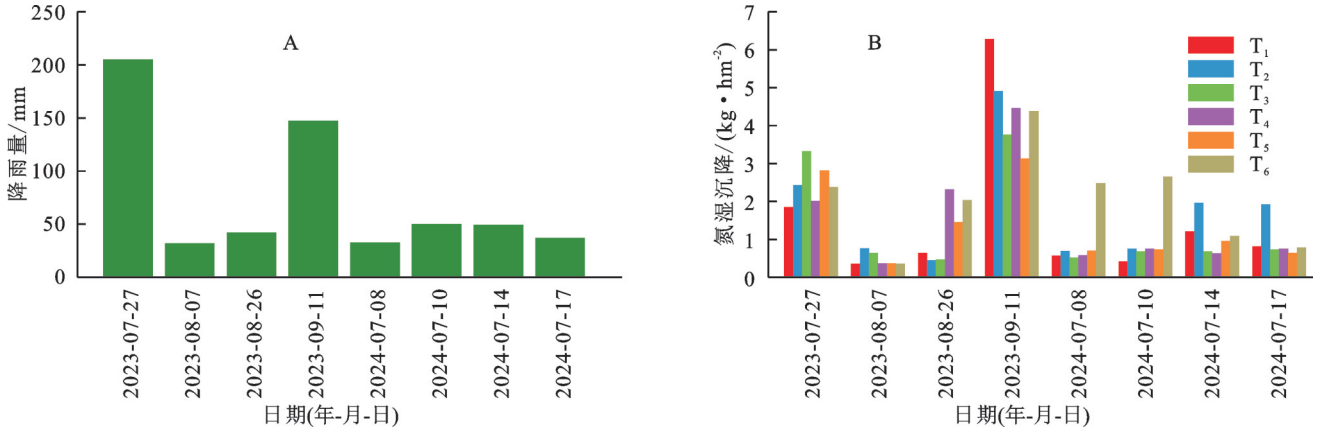


图3　次降雨事件的降雨量及氮湿沉降通量变化

Fig. 3　Variations in rainfall and nitrogen wet deposition flux during individual rainfall events

2.2　降雨产流产沙的影响分析

图4是降雨产流产沙拟合图，可以看出降雨与产流与产沙均呈正相关，降雨量越大，产流与产沙越多。由图4A可以看出，T_5处理的斜率（0.86）最低，表

明 T_5 处理可以较好地延缓径流产生，但是 T_5 处理的截距较高，较低降雨量时延缓径流产生的效果并不如其他几种处理。T_2 处理斜率（3.00）最大，对抑制径流产生的能力最弱。在较大降雨时，各处理对抑制径流产生的能力为 $T_5>T_6>T_1>T_4>T_3>T_2$。图 4B 是降雨量与泥沙流失量的关系，降雨量与泥沙流失量均呈正相关，降雨量越大，泥沙流失量越大。对各处理的斜率进行比较，各处理抑制产沙能力为 $T_5>T_6>T_3>T_1>T_2>T_4$，T_5 相对其他几种处理为最有效的减沙措施。这表明化肥＋复合微生物肥料不仅可以减少径流产生，还可能通过增强土壤团聚体稳定性，降低径流对表土的冲刷力。在 T_6 和 T_1，T_2，T_3，T_4 处理比较中，常规化肥处理（T_6）的产沙量拟合线具有最高截距，表明其在中小降雨事件中具有最高的土壤侵蚀风险，这与其土壤结构恶化、表面物质松散的特征相符。

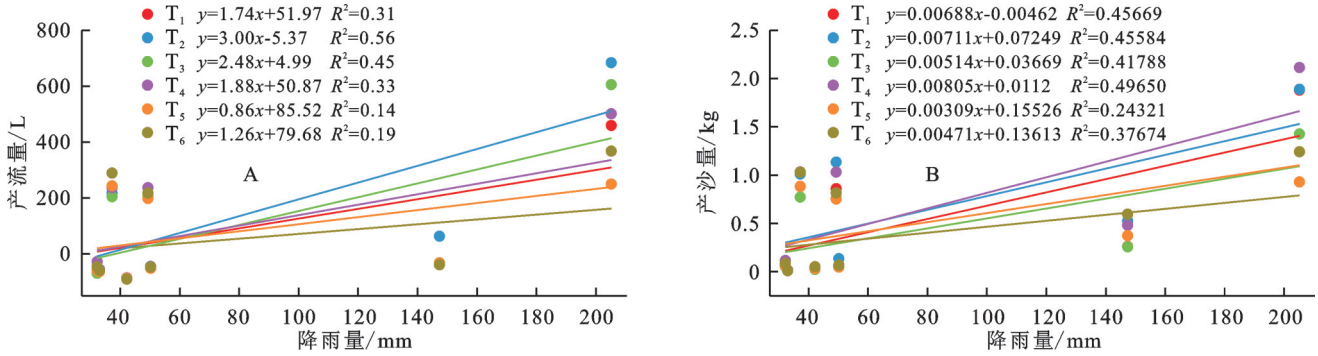


图 4 降雨产流产沙拟合图

Fig. 4 Fitting graphs of rainfall-runoff and rainfall-sediment yield

图 5 是产流产沙关系图，表示产流产沙之间的相互关系，各处理产流—产沙回归曲线均呈显著正相关（$p<0.001$），产流增大，产沙量也增大。其中增长速率为 $T_1>T_4>T_5>T_3>T_6>T_2$，其中 T_4，T_5 幂指数分别为 1.157，0.979，产流产沙相对稳定，T_6 处理的幂指数虽然不是最大，但是其对应的系数远大于其他 5 种处理，在本研究所设计的降雨量中，依旧是产沙量相对较多的处理。

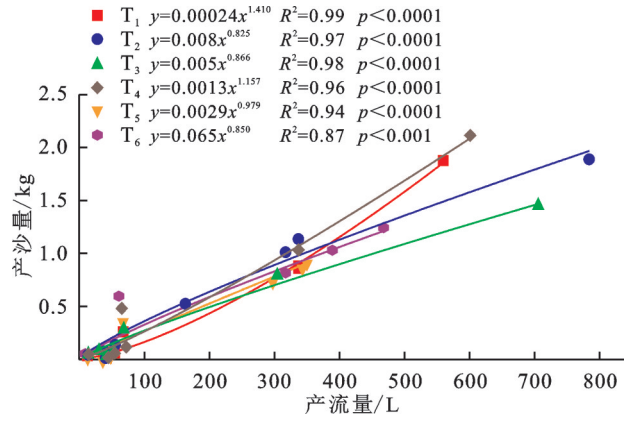


图 5 2023—2024 年 8 场降雨事件产流量产沙量拟合图

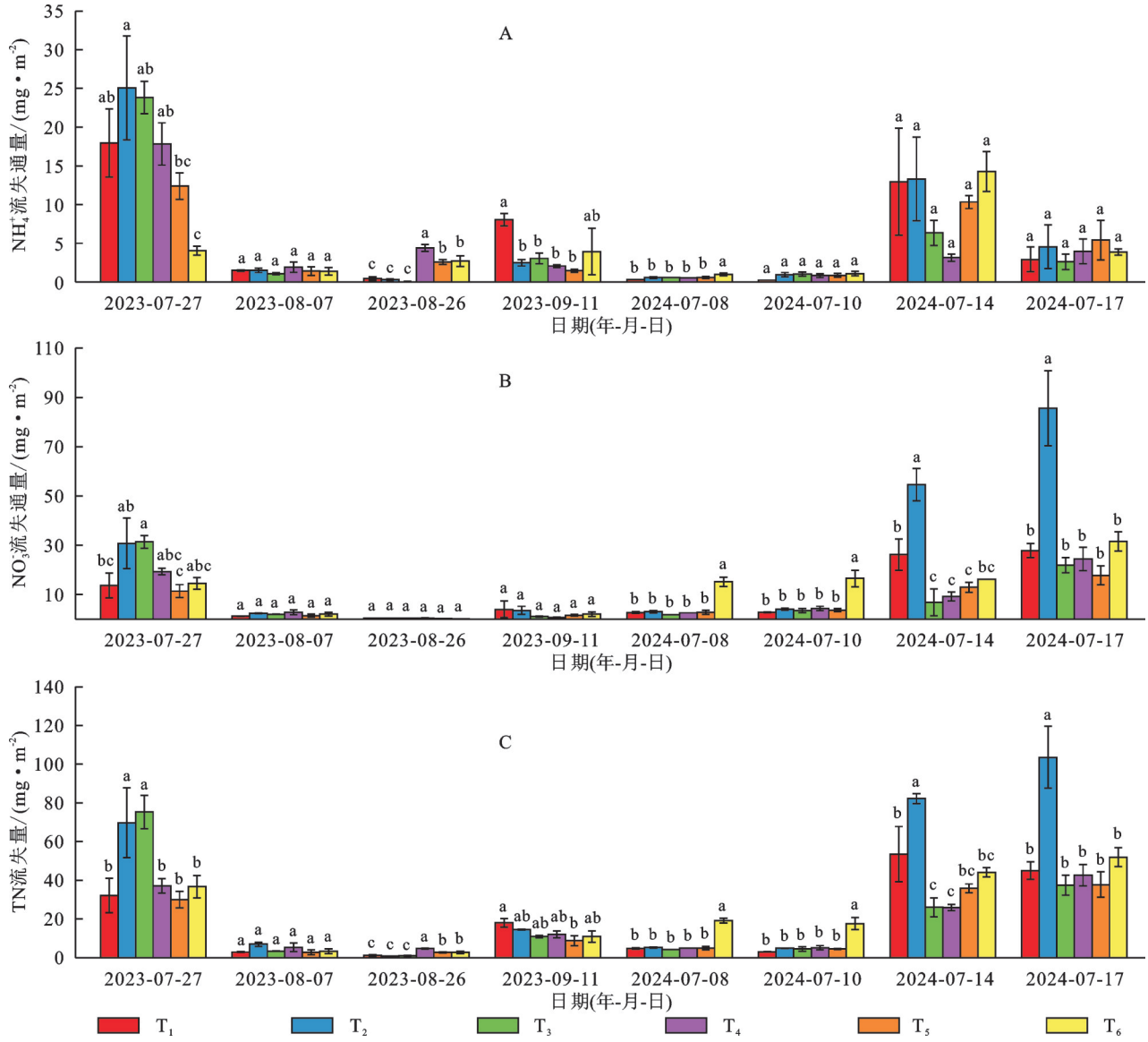
Fig. 5 Fitting plots of runoff and sediment yield for eight rainfall events (2023—2024)

2.3 不同形态氮在地表径流中的流失量

图 6A 是各种处理在产生地表径流时的铵态氮（NH_4^+）的流失通量，在 2023 年 7 月 27 日除 T_6 处理外，其他 5 种处理铵态氮流失通量均达到峰值，2023 年的铵态氮流失先减后增，分析原因是降雨量先减后增，泥沙流失量先减后增，铵态氮易吸附于土粒随之流出，2024 年先增后减，4 次试验数据降雨量相近，但 7 月 14 日的铵态氮流失显著变多，推测原因是经过多天的降雨，土壤水饱和，不易向下渗透，地表径流强度增大，泥沙流失也变多，导致铵态氮流失量变多，其中 T_4 处理流失总量最少，该处理可以更好地改良土壤环境，使土壤的抗侵蚀能力提高。图 6B 是各种处理在产生地表径流时的硝态氮（NO_3^-）的流失通量，通过与铵态氮对比，可以看出，氮素的流失大多是硝态氮的流失，2023 年硝态氮流失先减后增，分析原因是硝态氮易随水流失，降雨量大，产生地表径流大，所流失的硝态氮越多，其中 T_5 处理流失硝态氮通量最少，T_2 处理硝态氮流失量远大于其余 5 种处理。图 6C 是各种处理在产生地表径流时的总氮（TN）的流失通量，从各处理的 TN 流失量总和来看，各处理占地表径流总流失量为 T_5（11.97%）＜T_4（12.97%）＜T_1（15.12%）＜T_3（15.32%）＜T_6（17.54%）＜T_2（27.08%）。

2.4 不同形态氮在壤中流中的流失量

图 7A 是壤中流中铵态氮（NH_4^+-N）的流失通量，在 2024 年 7 月 14 日，T_4，T_5 处理铵态氮流失高于其余 4 种处理，7 月 17 日，T_4 处理铵态氮流失远低于其余 5 种处理。图 7B 是壤中流硝态氮（NO_3^--N）的流失通量，与铵态氮流失相比，硝态氮是壤中流里氮素流失的主要形式，且流失通量远高于铵态氮。图 7C 是壤中流总氮流失通量，2024 年 7 月 14 日时，T_3 处理流失量最小，T_6 处理流失量最大，7 月 17 日，T_5 处理流失量最少，T_3 与 T_6 处理流失通量最大。各处理壤中流氮素流失占比 T_4（13.8%）＜T_3（15.3%）＜T_1（15.32%）＜T_5（16.82%）＜T_2（17.5%）＜T_6（21.26%）。



注:不同小写字母表示同场降雨下不同处理各氮素流失差异显著($p<0.05$)。

图 6　各处理不同形态地表径流氮流失通量

Fig. 6　Nitrogen loss fluxes in different forms via surface runoff under various treatments

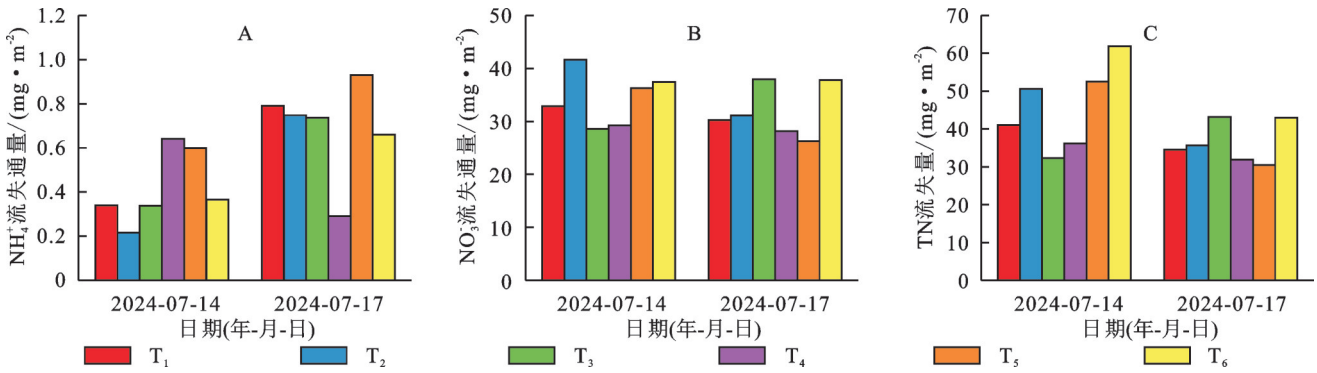


图 7　各处理不同形态壤中流氮流失通量

Fig. 7　Nitrogen loss fluxes in different forms via interflow across various treatments

2.5　碳源泥沙 SOC 与地表径流氮素流失的相关性

图 8 是添加碳源,泥沙 SOC 与地表径流不同形态氮素流失通量的相关性分析,6 种处理中,除 T_2 处理外,其余 5 种处理中,硝态氮流失通量与总氮流失通量呈显著正相关($p<0.01$)。除 T_6 处理外,5 种处理铵态氮流失通量与总氮流失通量呈显著正相关,其中 T_2,T_4 处理显著正相关($p<0.05$),其余 3 种处理显著

正相关($p<0.01$)。T_4,T_5处理,碳源添加量与SOC显著正相关($p<0.05$),T_3,T_5处理,固态氮素含量(T)与SOC显著正相关($p<0.05$),T_6处理碳源添加量与SOC显著正相关($p<0.01$)。

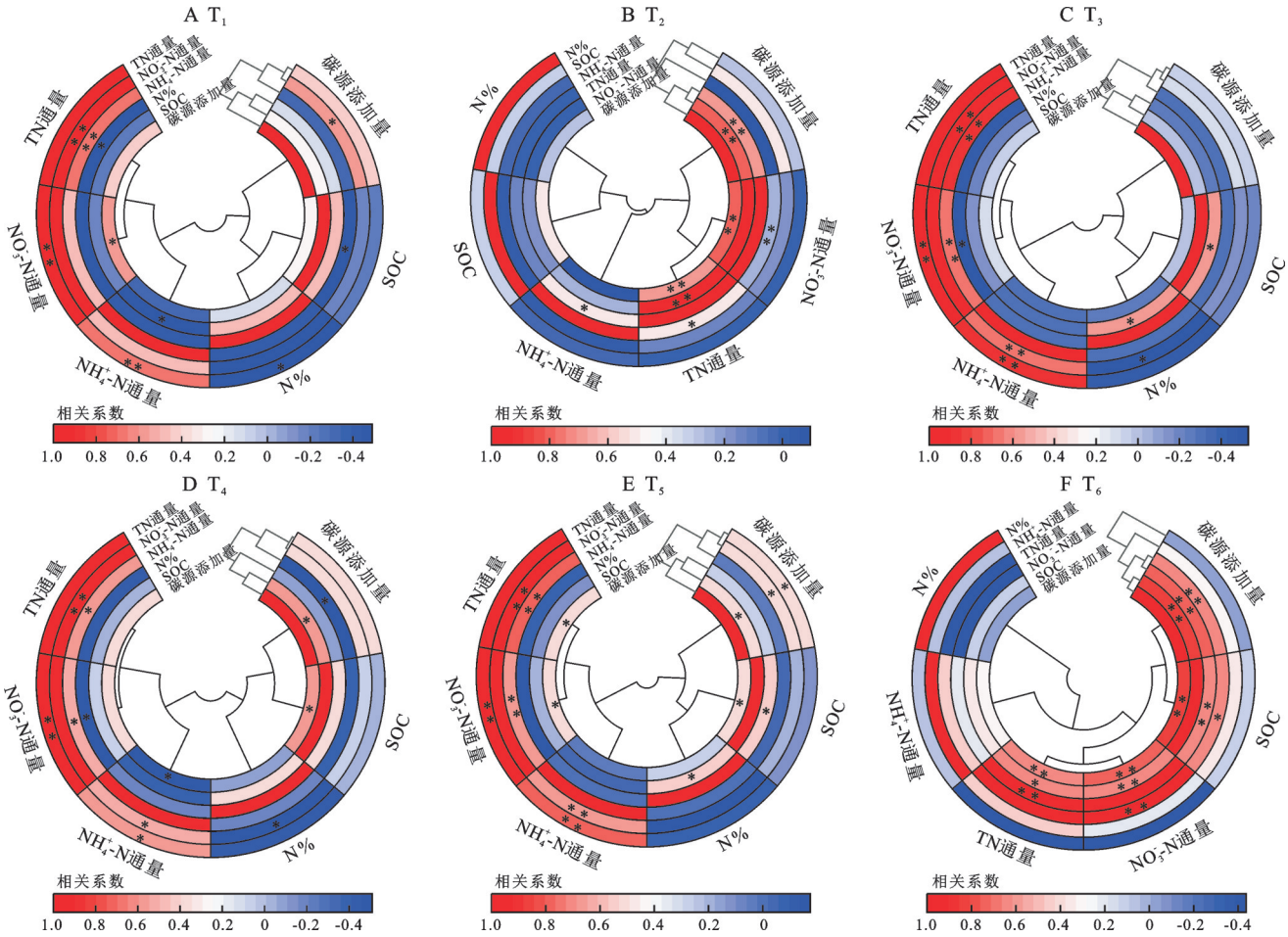


图8 新型碳源添加与地表径流不同形态氮流失通量的相关性环形热图

Fig. 8 Circular heat maps of correlation between novel carbon source addition and nitrogen loss fluxes in different forms in surface runoff

2.6 不同碳源添加对地表径流氮素流失的影响因素

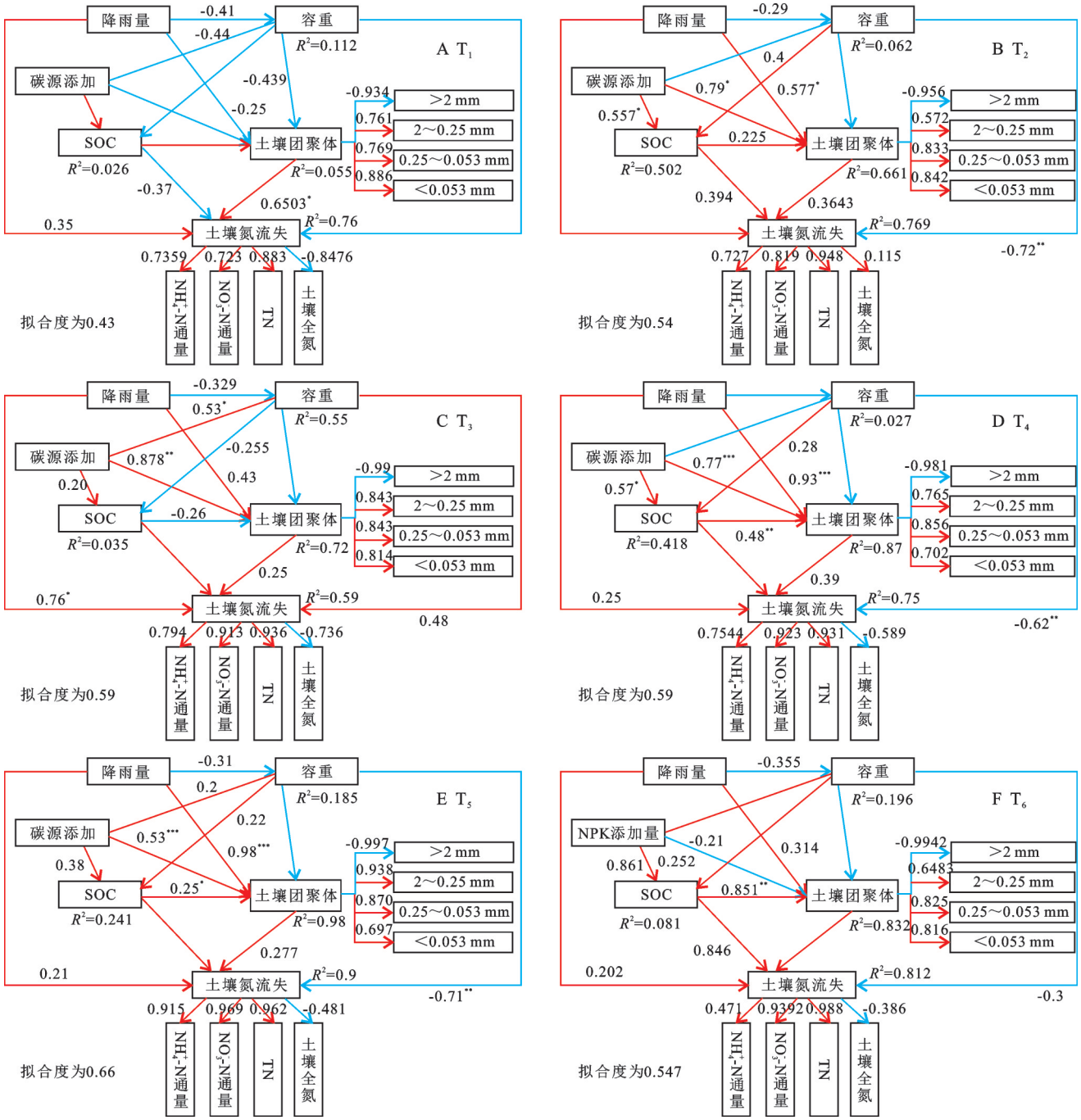
PLS-PM分析进一步探究了不同碳源添加下降雨、土壤团聚体、容重、SOC、氮素流失之间的作用关系(图9)。6种处理中,降雨量与氮流失通量均呈正向路径,其中T_3处理降雨量与氮流失通量路径最大(路径系数0.76,$p<0.05$),这说明T_3处理(化肥+牛粪有机肥料)较其他处理对于保氮的能力较弱。碳源添加与SOC呈正向路径,其中T_2(路径系数0.577,$p<0.05$)、T_4(路径系数0.570,$p<0.05$)处理路径较大。降雨量与容重均呈负向路径且容重与土壤团聚体呈负向路径。T_4处理是化肥+高有机质含量生物有机肥,T_5处理是化肥+复合微生物肥料,这两种处理相比其他4种处理,降雨对土壤团聚体的路径系数(T_4路径系数0.93,$p<0.001$;T_5路径系数0.98,$p<0.001$)显著高于其他4种处理,但对大团聚体(>2 mm)形成起到了负面作用,降雨破坏了土壤大团聚体,进一步减少了土壤氮素随泥沙和径流的流失。

3 讨 论

3.1 自然降雨对土壤氮流失的驱动机制

氮流失与降雨冲刷、产流以及冲刷产生的泥沙量有关,氮湿沉降是土壤氮流失重要驱动力,是氮素地球化学循环的重要途径[17-18],氮素通过沉降进入水体后,对生态环境系统的生产力及稳定性有着重要的影响。本研究期间,共有8次降雨产生地表径流,且都为强降雨(>30 mm)级别。通过对地表径流的各种氮元素流失通量进行分析,得出硝态氮是地表径流氮元素流失的主要部分,占地表径流总氮流失的52%,这与罗艺[19]和任秀文[20]等研究结果一致。硝态氮也是壤中流流失的主要部分,占壤中流总氮流失的80.67%。降雨量与产沙量呈正相关关系,在T_6和T_1,T_2,T_3,T_4处理比较中,常规化肥处理(T_6)的产沙量拟合线具有最高截距,表明其在中小降雨事件中即具有最高的土壤侵蚀风险,这与其土壤结构恶化、表面物质松散的特征相符。较多铵态

氮随地表径流流失，在壤中流流失较少。这与熊子怡等[21]研究结果一致。推测原因是，土壤颗粒会吸附铵态氮但几乎不吸附硝态氮，导致铵态氮大量滞留在土壤剖面的上中层，而硝态氮主要富集在下层，因此在本文中，各处理的地表径流铵态氮流失浓度均高于壤中流。



注：GOF 为模型拟合度，A 图拟合度为 0.43，B 图拟合度为 0.54，C 图拟合度为 0.59，D 图拟合度为 0.59，E 图拟合度为 0.66，F 图拟合度为 0.547；红色箭头表示有正向影响，蓝色箭头表示有负向影响，*表示 $p<0.05$，**表示 $p<0.01$，***表示 $p<0.001$。

图 9　不同处理降雨、土壤性质对农田氮流失的偏最小二乘路径模型（PLS-PM）分析

Fig. 9　Partial least squares path modeling (PLS-PM) analysis of effects of rainfall and soil properties on nitrogen loss in farmland under different treatments

碳源添加下，各处理壤中流中的铵态氮流失通量差距不大，表明碳源对壤中流中铵态氮流失的阻控效果较弱，T_4处理壤中流氮素流失占所有处理总氮流失的 13.8%。梁亚宇[22]、刘平[23]等研究表明降雨量是影响氮湿沉降通量的重要因素，呈正相关关系，但本研究 2023 年 7 月 27 日和 2023 年 9 月 11 日降雨量和氮湿沉降通量与上述研究结果有明显差异。7 月 27 日降雨量 205.2 mm，降雨历时达 1 080 min，雨强 11.4 mm/h；9 月 11 日降雨量 147.4 mm，降雨历时达 1 800 min，雨强 4.91 mm/h。9 月 11 日降雨量总体小于 7 月 27 日，

但是氮湿沉降通量总体大于27日。经过多日连续降雨,氮湿沉降通量有所下降,是由于雨水对空气中的氮素多次冲刷,导致地表径流中氮素的浓度远不如9月11日的氮素浓度。氮湿沉降对于土地氮循环是一个重要过程,我们需要进一步加强对大气氮沉降的监测和研究,优化田间施肥,并采取科学措施减少农田氮损失及人为氮排放,降低氮沉降带来的环境问题,为区域可持续发展提供科学依据。

3.2 土壤增碳对土壤固氮的影响机制

本研究通过添加多种碳源,减少地表径流中的氮素流失,碳源添加处理中,当降雨量大于50 mm(暴雨)时,T_5处理化肥+复合微生物肥料对地表径流、泥沙量的产生具有较好的抑制效果。T_1,T_2,T_3处理抑制产流产沙的能力弱于T_6施加常规化肥处理,T_4处理抑制产流能力弱于T_6处理,抑制产沙能力高于T_6处理,推测原因是,T_6处理团聚体部分,大于2 mm部分与小于0.053 mm部分占比小于其他处理,导致地表径流量与泥沙产量较低,但6种处理中,T_6处理产生的壤中流最多。除T_2处理(化肥+猪粪有机肥料)外,均有效地减少地表径流氮素的流失,推测原因是猪粪分解较快,短期内不能较快地改善土壤团聚体结构,其次,猪粪的快速矿化使得氮素浓度较高,导致氮素流失量变大。本研究所产生降雨量大多数小于50 mm,碳源的添加在抑制产流产沙上均有成效,其中T_5处理的地表径流总氮流失最少。T_5处理氮元素流失量远少于只添加化肥的T_6处理,说明添加复合微生物肥料,使得微生物产生多种可以促进土壤团粒结构形成的物质,使土壤变得疏松透气,保水保肥能力增强。且T_5处理对产生径流和泥沙的抑制效果也高于其他5种处理。碳源添加下,各处理壤中流氮素流失占比T_4(13.8%)<T_1(15.29%)<T_3(15.31%)<T_5(16.8%)<T_2(17.5%)<T_6(21.3%)。5种处理均有效地抑制了壤中流中氮素的流失。

T_1处理在固氮上具有较好的稳定性,周期性较长[24],提供了持续而非爆发性的碳源,避免了因碳源快速耗竭导致的固氮功能衰退。T_2与T_3处理在快速提升土壤整体肥力的同时,其对固氮功能的促进效率随时间波动的特征较为明显。T_4处理通过引用高质量碳源,与SOC正向路径较大,输入的稳定有机质能更高效地转化为持久性SOC。这一持续扩增的SOC库,为固氮微生物提供了长期稳定的碳源,确保了固氮功能的持续性,综合效率较高。T_5处理通过直接添加微生物,微生物主导了氮的矿化和固定,有效削减了氮素的流失[25]。本研究通过PLS-PM模型和对影响氮元素流失因素的相关性进行分析,6种处理中,降雨量对土壤氮素流失均表现为稳定的正向直接影响,同时对土壤容重产生稳定的负向影响。这印证了降雨是氮素损失的主要环境驱动力。同时通过改变土壤团聚体结构和容重间接影响农田氮素流失。碳源添加通过改变土壤容重和土壤团聚体结构间接影响农田氮素流失。

4 结 论

降雨显著影响地表径流的产生,降雨与泥沙流失呈正相关关系,与产流产沙之间呈正相关关系。在降雨量大于50 mm时,T_5(化肥+复合微生物肥料)处理可以较好地抑制地表径流和泥沙量的流失,T_5,T_4处理产生的氮素流失相对较少,占地表径流总流失的11.97%和12.97%,壤中流流失为13.8%和16.8%。

地表径流与壤中流中,硝态氮均是氮素的主要流失且铵态氮大多在地表径流中流失。各处理地表径流中氮素流失占比T_5(11.97%)<T_4(12.97%)<T_1(15.12%)<T_3(15.32%)<T_6(17.54%)<T_2(27.08%),各处理壤中流氮素流失占比为T_4(13.8%)<T_1(15.29%)<T_3(15.31%)<T_5(16.8%)<T_2(17.5%)<T_6(21.3%)。

参考文献(References):

[1] 李东原,申楠,张风宝,等.不同调控措施下黄土高原坡耕地氮磷流失特征研究[J].水土保持研究,2025,32(6):84-95.
Li D Y, Shen N, Zhang F B, et al. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus loss in slope farmland on the Loess Plateau under different control measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(6):84-95.

[2] 李仁宇,曾谢伟,丁炜锋,等.减氮增菌处理对川南紫色土坡耕地氮磷流失的影响[J].水土保持研究,2026,33(1):111-119.
Li R Y, Zeng X W, Ding W F, et al. Effects of nitrogen reduction and bacterial enhancement on nitrogen and phosphorus losses in purple soil slope farmland in southern Sichuan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026,33(1):111-119.

[3] 徐婷,李清藐,张高宁,等.紫色土坡耕地优化施肥配合秸秆覆盖还田有效提高作物产量降低径流氮损失[J].植物营养与肥料学报,2024,30(12):2267-2280.
Xu T, Li Q M, Zhang G N, et al. Optimization of fertilization and straw returning on purple sloping croplands effectively increases crop yield and reduces total runoff nitrogen loss[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024,30(12):2267-2280.

[4] 薛晶玲,成金礼,陈丹,等.四川盆地紫色土耕层有机碳含量变化特征及影响因素[J].中国生态农业学报(中英

文),2025,33(1):1-13.
Xue J L, Cheng J L, Chen D, et al. Characteristics and influencing factors of topsoil organic carbon content changes in purple soils of the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025,33(1):1-13.

[5] 汪璇,邓利梅,崔荣阳,等.川中丘陵区典型紫色土肥力及风化程度的演变趋势及影响因素[J].土壤,2025,57(3):683-691.
Wang X, Deng L M, Cui R Y, et al. Evolution and influencing factors of fertility and weathering degree of typical purple soils in hilly areas of central Sichuan[J]. Soils, 2025,57(3):683-691.

[6] 苟俊菲,甘凤玲,刘春红.紫色土坡面细沟形态变化及其对产流产沙的影响[J].水土保持研究,2023,30(5):61-68,75.
Gou J F, Gan F L, Liu C H. Variation of rill morphology and its effect on runoff and sediment yield on purple soil slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):61-68,75.

[7] 苏正安,张建辉,聂小军.紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J].农业工程学报,2009,25(5):54-60.
Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland[J]. Transactions of the Csae, 2009, 25(5):54-60.

[8] 刘自飞,李红波,陶增蛟,等.自然降雨和施用缓释肥对北运河上游大田氮磷径流流失的影响[J].中国农学通报,2024,40(5):74-79.
Liu Z F, Li H B, Tao Z J, et al. Effects of natural rainfall and application of slow-release fertilizers on nitrogen and phosphorus runoff loss in the upper Beiyun River watershed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(5):74-79.

[9] 孙理阳,李华林,张帆,等.降雨特征及不同水土保持措施对坡面产流、产沙和氮磷流失的影响[J].东北农业大学学报,2024,55(8):111-122.
Sun L Y, Li H L, Zhang F, et al. Effects of rainfall characteristics and soil conservation measures on runoff, sediment yield, and nitrogen-phosphorus loss on slopes[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(8):111-122.

[10] 史广宇,吴贝贝,胡嘉源,等.施加生物炭缓解土壤氮流失机理的研究进展[J].环境化学,2025,44(1):149-163.
Shi G Y, Wu B B, Hu J Y, et al. Advances in nitrogen loss reduction mechanism study by biochar application[J]. Environmental Chemistry, 2025,44(1):149-163.

[11] 刘懿枢,张立进,金晓毅,等.降雨条件下稻田非点源污染氮磷流失特征[J].农业环境科学学报,2026,45(4):1000-1008.
Liu Y S, Zhang L J, Jin X Y, et al. Effects of rainfall on migration of non-point source nitrogen and phosphorus in paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2026,45(4):1000-1008.

[12] 周晓航,徐诺,夏金悦,等.等氮施用不同畜禽粪便对坡耕地氮素分布与转化的影响[J].农业资源与环境学报. https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0882.
Zhou X H, Xu N, Xia J Y, et al. Effects of different livestock manures under equal nitrogen rates on nitrogen distribution and transformation in sloping croplands[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment. https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0882.

[13] 杨佳宇,侯永莉,滕超,等.模拟降雨下坡长对矿山坡面水土与氮磷流失的影响[J].土壤通报,2025,56(5):1269-1277.
Yang J Y, Hou Y L, Teng C, et al. Effects of slope length on soil and water loss, as well as nitrogen-phosphorus loss from mining slopes under simulated rainfall[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025,56(5):1269-1277.

[14] 袁远,杨海洋,王江彦,等.人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出[J].农业环境科学学报,2022,41(1):123-131.
Yuan Y, Yang H Y, Wang J Y, et al. Simulated rainfall effect on non-point source nitrogen output from fluvo aquic soil in the Huaihe River watershed, Henan Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(1):123-131.

[15] 刘东辉,周宇,胡艳丽,等.南充市主城区大气氮湿沉降特征研究[J].绿色科技,2024,26(20):162-167,194.
Liu D H, Zhou Y, Hu Y L, et al. Research on the characteristics of atmospheric wet nitrogen deposition in the urban areas of Nanchong City[J]. Journal of Green Science and Technology, 2024,26(20):162-167,194.

[16] 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.

[17] 吴树平,黄廷林,高爱平,等.黑河金盆水库大气氮湿沉降特征研究[J].环境科技,2024,37(5):1-6.
Wu S P, Huang Y L, Gao A P, et al. Characteristics of atmospheric nitrogen wet deposition in Jinpen Reservoir of Heihe River[J]. Environmental Science and Technology, 2024,37(5):1-6.

[18] 王小剑,张海霞,蔡昂祖,等.邯郸市大气氮干湿沉降特征研究[J].环境科学与技术,2020,43(12):104-111.
Wang X J, Zhang H X, Cai A Z, et al. Study on the nitrogen characteristics of atmospheric dry and wet deposition in Handan City[J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(12):104-111.

(下转第 167 页)