

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.018; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.018.

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 Renyu, Zeng Xiewei, Ding Weifeng, 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.

减氮增菌处理对川南紫色土坡耕地氮磷流失的影响

李仁宇^{1,2}, 曾谢伟^{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. 西南大学 宜宾研究院, 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] 明确坡耕地地表径流氮磷流失问题, 探讨减氮增菌措施对其的影响, 揭示菌肥用量与产沙量、径流氮磷流失量的关系, 为解决该流失治理难题提供新视角和新途径。[方法] 采用田间径流小区观测试验, 以不施肥为对照(CK), 并设置常规施肥(T₁)、减氮30%(T₂)、减氮30%加中量菌肥(T₃)、减氮30%加高量菌肥(T₄)处理, 比较不同处理下产流量、产沙量、径流总氮(TN)、可溶性氮(DN)、总磷(TP)和可溶性磷(DP)浓度及流失量变化特征。[结果] (1) 与CK相比, T₄处理的水土保持效果最好, 显著降低产沙量(减少84.11%)、TN流失量(减少60.49%)、DN流失量(减少70.11%)和DP流失量(减少55.78%)。另外, 与T₂相比, T₄处理的TN浓度、TN流失量、DN浓度和DN流失量分别显著减少46.75%、49.80%、54.25%和56.46%。(2) 回归分析表明, TN, DN, TP, DP流失量与产流量呈显著正相关。(3) 大部分处理径流TN/TP比值小于22, 表明该地区大部分土壤处于氮限制状态。[结论] 减氮增菌施肥处理有效降低坡耕地产流量、产沙量、径流氮素和磷素流失, 该施肥处理可作为促进西南地区坡耕地农业可持续生产和减少稻田面源污染的有效农艺推荐措施。

关键词: 紫色土; 减氮; 增菌; 氮磷流失; 菌肥用量

中图分类号: S157.1; S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0111-09

Effects of nitrogen reduction and bacterial enhancement on nitrogen and phosphorus losses in purple soil slope farmland in southern Sichuan

Li Renyu^{1,2}, Zeng Xiewei^{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] This study aims to clarify the problem of nitrogen (N) and phosphorus (P) losses via surface runoff on sloping farmland, investigate the effects of nitrogen reduction and bacterial enhancement, and reveal the relationship between application rate of bacterial biofertilizer, sediment yield, and N/P losses in runoff, providing new perspectives and approaches for addressing the challenges of controlling such losses. [Methods] Field runoff plot observation experiments were conducted, with no fertilizer application as the control (CK), and treatments of conventional fertilization (T₁), N reduction by 30% (T₂), N reduction by 30% with medium rate of bacterial biofertilizer (T₃), and N reduction by 30% with high rate of bacterial biofertilizer (T₄) were set up. The variation characteristics in runoff volume, sediment yield, and concentrations and loss amounts of total N (TN), dissolved N (DN), total P (TP), and dissolved P (DP) under different treatments were compared. [Results] (1) Compared with CK, the T₄ treatment demonstrated the best soil and water conservation effectiveness, significantly reducing sediment yield (by 84.11%), TN loss (by 60.49%), DN loss (by 70.11%),

收稿日期: 2025-03-10

修回日期: 2025-04-17

接受日期: 2025-05-05

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: 李仁宇(1997—), 男, 重庆市荣昌区人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与面源污染研究。E-mail: swulry@163.com

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

<http://stbcyj.paperonce.org>

and DP loss (by 55.78%). Furthermore, compared with T₂, the T₄ treatment significantly reduced TN concentration (by 46.75%), TN loss (by 49.80%), DN concentration (by 54.25%), and DN loss (by 56.46%). (2) Regression analysis revealed that the losses of TN, DN, TP, and DP were significantly positively correlated with runoff volume. (3) The TN/TP ratios in runoff under most treatments remained below 22, indicating that most soil in the study area was nitrogen-limited. [**Conclusion**] N reduction and bacterial enhancement treatments effectively reduce runoff volume, sediment yield, and N and P losses in runoff from slope farmland. These fertilization practices can be recommended as an effective agronomic measure to promote sustainable agricultural production on slope farmland in southwestern China and to reduce non-point source pollution from paddy fields.

Keywords: purple soil; nitrogen reduction; bacterial enhancement; nitrogen and phosphorus losses; application rate of bacterial biofertilizer

坡耕地水土流失是全球性环境问题,不仅关乎土壤资源的可持续利用,还对农业经济和生态环境产生深远影响^[1]。水土流失往往伴随着大量的营养物质流失,如氮、磷、钾等关键养分,从而直接影响该地区农作物产量和质量^[2]。此外,水土流失破坏生态环境,加剧生态失衡,流失的土壤还可能携带农药^[3]、化肥等^[4]污染物进入水体,加剧水体富营养化,威胁水资源安全。

紫色土是我国西南地区广泛分布的土壤类型,其有机成分较低,矿质养分含量充分,富含磷、钾、钙质等元素,是良好的肥沃旱耕土壤^[5]。由于紫色土表面岩层物理风化十分剧烈,易形成大量胶结能力差的松散碎屑物质,具有极强的侵蚀性,导致紫色土坡耕地具有土层薄、易风化、成土速率快、质地结构松散、孔隙度大、容易发生水土流失等特点^[6-7]。为减缓紫色土坡耕地水土流失,国内学者进行了大量研究^[8],研究发现,吕永强等认为减氮20%能够提升田间土壤全氮和有效磷含量,并减少水氮流失风险^[9];郑文琦等在红壤旱坡上试验发现,径流流失和渗漏淋失是红壤旱坡花生地氮素损失的重要途径,减氮处理可有效减少地表径流总氮损失^[10],减少氮肥施用可以降低氮素流失风险。减氮能否降低紫色土坡耕地产流、产沙和氮磷流失风险尚不明确。

菌肥是一种富含微生物的肥料,通过调控土壤微生物活动、促进养分转化^[11]和增强作物吸收^[12],对

减少氮磷流失具有显著影响^[13]。研究表明,施用菌肥通过减少硝化细菌的丰度进而减少土壤氮素硝化作用,可减少农业土壤中的氮素流失^[14]。然而,对于坡耕地土壤而言,径流氮磷流失受到该地区降雨量的影响较大,被雨水冲刷后的氮磷大部分会随地表径流迁移^[15],而菌肥中的微生物对土壤中的氮磷具有固持作用,添加菌肥能否减少紫色土坡耕地氮磷随径流迁移,从而减少坡耕地土壤径流氮磷损失值得进一步探究。

本研究采用原位小区径流试验,比较在不同减氮增菌方式的产流、产沙及氮磷流失差异,明确减氮增菌对减少紫色土坡耕地氮磷流失的作用和氮磷流失与产流量的相关性,为川南地区的水土流失防治提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于四川省宜宾市长宁县梅白镇的坡耕地(28°15'18"N, 104°44'22"E)。属典型的中亚热带湿润季风气候,年均降水量约为1 100 mm,降雨主要集中在6—8月,年均气温18.3℃,日照时数987.6 h,无霜期达357 d。试验基地的土壤类型为紫色土。主要植被类型为常绿阔叶林,农作物为冬白菜(*Brassica rapa* var. *glabra* Regel.)和夏高粱(*Sorghum bicolor* L.)。试验点基本情况见表1。

表1 试验点土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil at experimental site

土层/cm	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (g·kg ⁻¹)	总磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (g·kg ⁻¹)
0—20	5.80	1.49	8.91	8.66	2.53	2.22	1.32	1.25

1.2 试验设计

选取坡向一致且连片的紫色土坡耕地(坡度15°),建立10个径流小区,每个小区面积为12.5 m²(长5 m×宽2.5 m)。试验设置5个处理(每个处理设

置2次重复),分别为无施肥对照(CK)、常规施肥(T₁)、减氮30%(T₂)、减氮30%+施中量生物菌肥(T₃)、减氮30%+施高量生物菌肥(T₄)(表2)。施肥量和施肥方式均按当地农民保持一致。试验用肥料

为尿素、过磷酸钙、氯化钾,施肥方式为撒施,其中,尿素含N \geq 46.4%,过磷酸钙含P₂O₅ \geq 12%,氯化钾含K₂O \geq 60%,试验施用的生物菌肥含N \geq 5.8%。其中T₂,T₃,T₄中的减氮30%指N肥输入量为47.25 kg/hm²,中量生物菌肥施用量为168.6 kg/hm²,高量生物菌肥为337.2 kg/hm²。各小区采用白菜和高粱轮作,冬白菜采用移栽,株行距50 cm \times 50 cm,前一年10月上中旬移栽白菜,12月收获白菜;夏高粱采用播种,株行距70 cm \times 30 cm,来年4月初播种高粱,9月中下旬收获。

表2 不同处理的施肥量

Table 2 Fertilizer application rates under different treatments

种植季	施肥时间	处理	化肥养分输入量/ (kg \cdot hm ⁻²)			生物菌肥 投入量/ (kg \cdot hm ⁻²)
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
白菜	10月上旬 (基肥)	CK	0	0	0	0
		T ₁	68	68	68	0
		T ₂	47	68	68	0
		T ₃	47	68	68	169
		T ₄	47	68	68	337
白菜	12月上旬 (追肥)	CK	0	0	0	0
		T ₁	34	34	34	0
		T ₂	24	34	34	0
		T ₃	24	34 <td 34	0	
		T ₄	24	34	34	0
高粱	4月上旬 (基肥)	CK	0	0	0	0
		T ₁	68	68	68	0
		T ₂	47	68	68	0
		T ₃	47	68	68	169
		T ₄	47	68	68	337
高粱	6月上旬 (追肥)	CK	0	0	0	0
		T ₁	34	34	34	0
		T ₂	24	34	34	0
		T ₃	24	34	34	0
		T ₄	24	34	34	0

各小区之间通过PP板(厚约1 cm)隔开,PP板深入地下30 cm,高出地面20 cm。各小区出口设置T型集流槽(长2.5 m \times 宽0.4 m \times 高0.3 m)用于收集径流。每个小区配备一个单独的径流桶,桶底内径为29 cm,桶口内径为34.5 cm,水位高度为32 cm,容积为25.4 L(图1)。

1.3 样品采集与测定方法

径流水样采集时间为2024年1—9月。每次降雨后立即记录各小区产生的产流量,并利用径流桶采集径流样,采集径流样时先用搅拌棒将含沙的径流充分搅拌,使含泥沙径流充分混合均匀,后利用清洁矿泉水

水瓶收集(每个小区收集两瓶)带回实验室,经过滤处理后储存在4 $^{\circ}$ C冰箱内,供测定使用。取样结束后,剩余径流完全排放,清洗径流桶以备下次使用。水样各项指标在采集后第2天进行分析。产流量通过体积法测定,泥沙量采用烘干质量差减法测定,参照《水和废水监测分析方法》^[16],水样总氮(Total Nitrogen, TN)和可溶性氮(Dissolved Nitrogen, DN)采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定,总磷(Total Phosphorus, TP)和可溶性磷(Dissolved Phosphorus, DP)采用钼酸铵分光光度法测定。

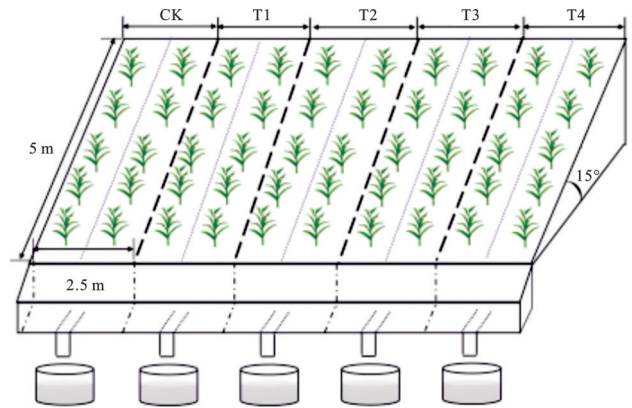


图1 径流小区设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of runoff plot setup

1.4 数据处理

根据国家降水量等级标准(GB/T28592-2012),将观测的次降雨事件按24 h降雨量划分为小雨($<$ 9.9 mm),中雨(10~24.9 mm)、大雨(25~49.9 mm)、暴雨(50~99.9 mm)、大暴雨(100~200 mm)和特大暴雨($>$ 200 mm)。

泥沙量计算公式^[17]:

$$S = VC \quad (1)$$

式中: S 为小区总泥沙量(g); V 为小区总产流量(L); C 为小区泥沙含量(g/L)不同形态氮磷流失量计算公式如下:

$$Q_i = C_i \times V_i \quad (2)$$

式中: Q_i 为观测期间第 i 次地表径流中各形态氮、磷流失量(mg); C_i 为第 i 次地表径流中各形态氮、磷质量流失浓度(mg/L); V 为第 i 次地表径流中产流量体积(L)。

1.5 数据分析

采用Excel 2016软件对数据进行处理,SPSS 25.0软件进行统计分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同处理下产流量、产沙量TN、DN、TP和DP浓度及流失量的差异;线性回归分析TN、DN、TP和DP浓度与产流量的相关性,Excel 2016软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下产流产沙特征

各月份降雨量如图2所示,其中最少降雨量发生在6月14日,为42 mm,最大降雨量发生在7月15日,为102.5 mm。不同施肥处理下的产流量不同时期表现各有不同。其中,与CK, T₁, T₂和T₃处理相比,10

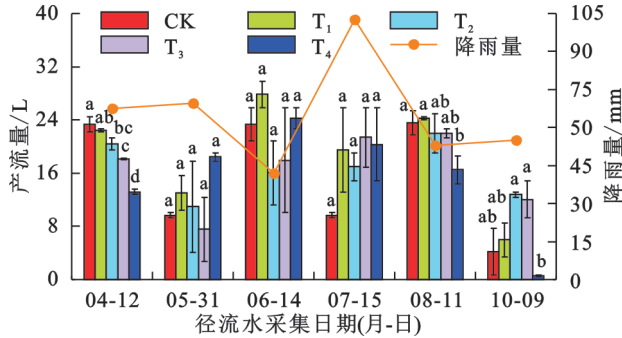


图2 不同时期内不同处理下降雨量和产流量的变化
Fig. 2 Variations in rainfall and runoff volume under different treatments across different periods

2.2 不同施肥处理下氮流失特征

如图4所示,不同处理径流TN浓度范围为CK: 7.06~11.33 mg/L, T₁: 5.49~10.17 mg/L, T₂: 4.14~10.79 mg/L, T₃: 3.91~8.48 mg/L和T₄: 3.08~4.55 mg/L。其中,在10月9日,与CK相比,T₁, T₂, T₃和T₄处理的TN浓度分别减少13.41%, 15.99%, 42.24%和50.49%。与T₂相比, T₃和T₄处理的TN浓度分别显著减少30.24%, 41.06%。与T₃相比, T₄处理的径流TN浓度减少14.28%。另外,与CK, T₂相比, T₄处理的年平均TN浓度分别显著减少57.23%, 46.75%。

不同处理径流TN流失量范围为CK: 28.49~206.85 g/hm², T₁: 34.66~163.18 g/hm², T₂: 52.82~165.78 g/hm², T₃: 37.44~147.30 g/hm²和T₄: 1.75~70.06 g/hm²。其中,在8月11日,与CK相比, T₁, T₂, T₃和T₄处理的TN流失量分别减少10.20%, 30.99%, 5.70%和67.71%。与T₃处理相比, T₄处理的径流TN流失量显著减少96.43%。另外,与CK, T₂相比, T₄处理的年平均TN流失量分别显著减少60.49%, 49.80%。

不同处理径流DN浓度范围为CK: 3.36~7.09 mg/L, T₁: 3.29~5.22 mg/L, T₂: 1.64~4.50 mg/L, T₃: 1.79~3.61 mg/L和T₄: 1.09~2.49 mg/L。7月15日、8月11日和10月9日这三个时间段内,与CK相比, T₁处理的DN流失浓度分别减少21.80%, 45.57%和20.29%, T₂处理减少32.13%, 54.06%和31.33%, T₃处理减少32.28%, 71.79%和70.08%, T₄处理减少53.28%, 84.65%和72.02%。另外,在10月9日,与T₂处理相比, T₃和T₄处理的径流DN浓度分别显著减少56.42%, 59.26%。另外,与CK, T₂相比, T₄处理的年平均

月9日T₄处理的产流量减少了87.11%~95.77%,年平均产流量无显著差异。

与CK相比,8月11日T₁, T₂, T₃和T₄处理下的产沙量分别显著减少31.87%, 52.76%, 67.45%和89.12%(图3),与T₁相比, T₃和T₄处理的产沙量分别显著减少31.10%, 76.96%。另外,与CK相比,和T₄处理的年平均产沙量显著减少81.11%。

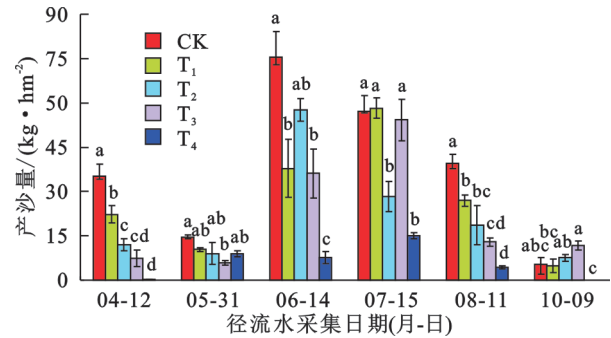


图3 不同时期不同处理下产沙量
Fig. 3 Sediment yield under different treatments across different periods

均DN浓度分别显著减少了70.51%, 54.25%。

不同处理径流DN流失量范围为CK: 23.26~132.81 g/hm², T₁: 24.61~74.87 g/hm², T₂: 18.71~68.80 g/hm², T₃: 8.80~63.58 g/hm²和T₄: 0.75~34.12 g/hm²。其中,在8月11日,与CK相比, T₁, T₂, T₃和T₄处理的DN流失量分别显著减少了3.63%, 54.98%, 73.86%和89.13%。另外,与T₂处理相比, T₃和T₄处理的径流DN流失量分别显著减少41.93%和75.86%。与CK, T₂相比, T₄处理的年平均DN流失量分别显著减少70.11%, 70.11%。

2.3 不同施肥处理下磷流失特征

如图5所示,不同处理径流TP浓度为CK: 0.37~1.62 mg/L, T₁: 0.32~1.56 mg/L, T₂: 0.29~1.31 mg/L, T₃: 0.26~0.187 mg/L和T₄: 0.18~0.67 mg/L。在7月15日和8月11日,与CK相比, T₁处理的径流TP浓度分别减少3.78%, 17.88%, T₂处理减少22.11%, 28.19%, T₃处理减少37.25%, 46.38%, T₄处理减少58.52%, 63.11%。另外,在8月11日,与T₂处理相比, T₄处理的径流TP浓度分别显著减少48.63%。

在径流水采集期间,径流TP流失量为CK: 1.65~19.72 g/hm², T₁: 1.93~22.81 g/hm², T₂: 3.02~24.88 g/hm², T₃: 2.73~20.82 g/hm²和T₄: 0.09~10.79 g/hm²。在8月11日,与CK相比, T₁, T₂, T₃和T₄处理的径流TP流失量分别减少14.71%, 32.24%, 49.56%, 73.58%。另外,在8月11日,与T₁处理相比, T₃和T₄处理的径流TP流失量分别显著减少40.86%和69.03%;与T₃处理相比, T₄处理的径流TP流失量显著减少61.01%。

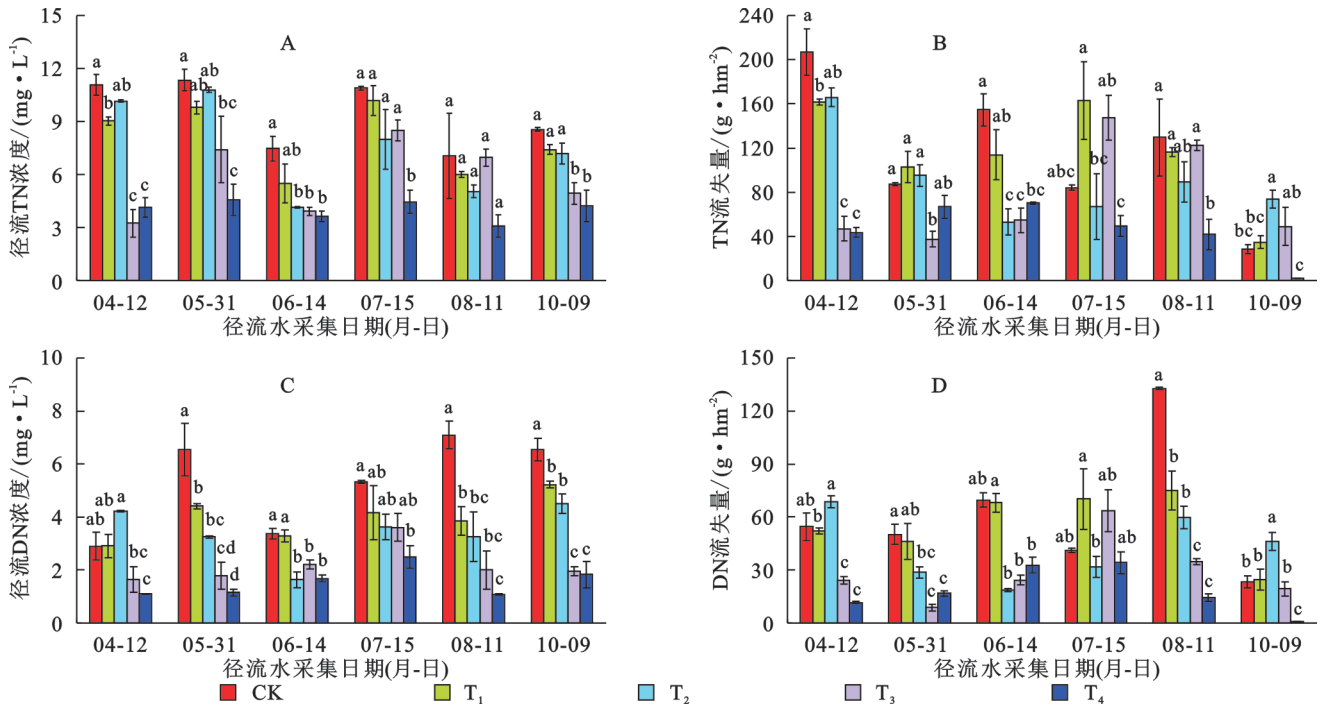


图 4 不同时期不同施肥处理对径流 TN 浓度、TN 流失量、DN 浓度、DN 流失量的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on runoff TN concentration, TN loss, DN concentration, and DN loss across different periods

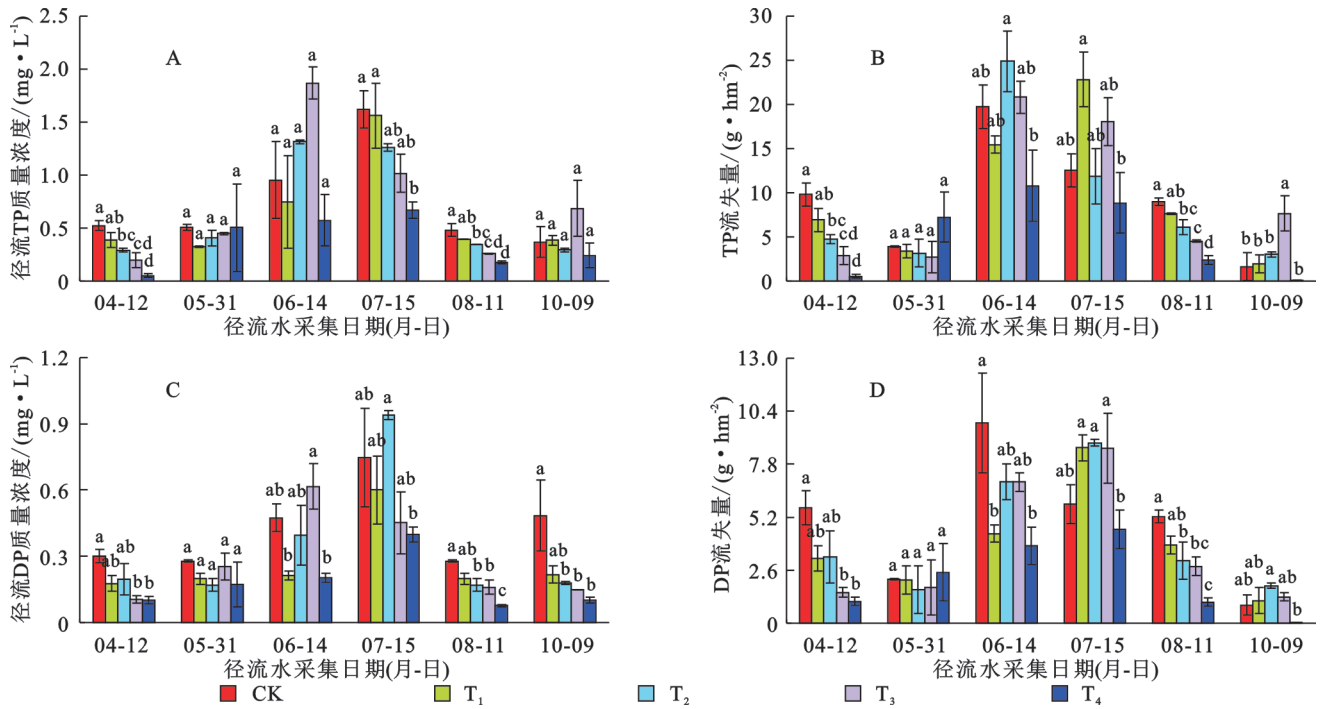


图 5 不同时期不同施肥处理对径流 TP 浓度、TP 流失量、DP 浓度、DP 流失量的影响

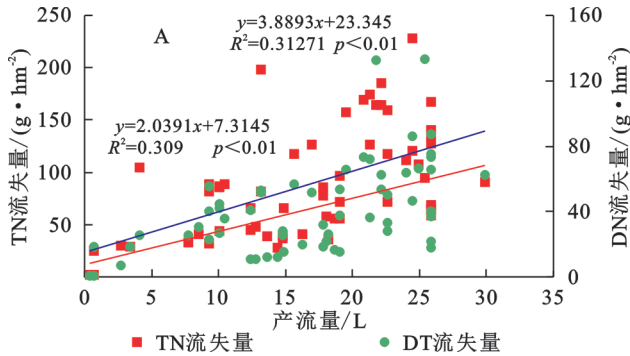
Fig. 5 Effects of different fertilization treatments on runoff TP concentration, TP loss, DP concentration, and DP loss across different periods

不同处理径流 DP 浓度范围为 CK:0.28~0.75 mg/L, T₁:0.20~0.60 mg/L, T₂:0.17~0.94 mg/L, T₃:0.15~0.62 mg/L 和 T₄:0.08~0.40 mg/L。在 8 月 11 日和 10 月 9 日,与 CK 相比,T₁处理的径流 DP 浓度分别减少 28.87%,55.17%,T₂处理减少 38.86%,17.52%,T₃处理减少 42.29%,17.64%,T₄处理减少

72.27%,31.35%。另外,在 8 月 11 日,与 T₂处理相比,T₄处理的径流 DP 浓度分别显著减少了 54.64%。对于年平均 DP 而言,与 CK 相比,T₄处理的年平均 DP 浓度显著减少 58.14%。

不同处理径流 DP 流失量范围为 CK:0.89~9.82 g/hm², T₁:1.11~8.60 g/hm², T₂:1.65~8.85 g/hm²,

T_3 : 1.29~8.58 g/hm²和 T_4 : 0.04~4.61 g/hm²。其中, 在8月11日, 与CK相比, T_1, T_2, T_3 和 T_4 处理的径流TP流失量分别减少26.82%, 41.53%, 46.65%, 80.33%。另外, 在8月11日, 与 T_2 处理相比, T_4 处理的径流DP流失量分别显著减少66.36%。与CK相比, T_4 处理的年平均DP流失量显著降低55.78%。



2.4 TN、DN、TP、DP流失量与产流量的回归分析

回归分析结果表明(图6), 径流TN, DN流失量与产流量呈显著正相关($p < 0.01$), 表明随着产流量增加, 径流TN、DN流失量逐渐增加; 径流TP、DP流失量与产流量呈显著正相关($p < 0.01$), 表明随着产流量增加, 径流TP、DP流失量逐渐增加。

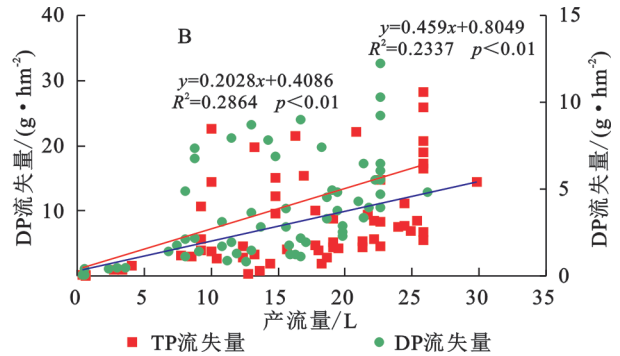


图6 TN、DN、TP、DP流失量与产流量的回归分析

Fig. 6 Regression analysis of TN、DN、TP and DP losses with runoff volume

2.5 径流TN/TP变化特征及氮磷限制状况

不同时期不同施肥处理对径流TN/TP表现不同, TN/TP整体变化范围为CK: 6.81~27.61, T_1 : 6.89~30.42, T_2 : 6.29~34.92, T_3 : 2.73~27.05, T_4 : 6.88~47.20(图7)。

参照多个研究结果为水土富营养化评估的营养

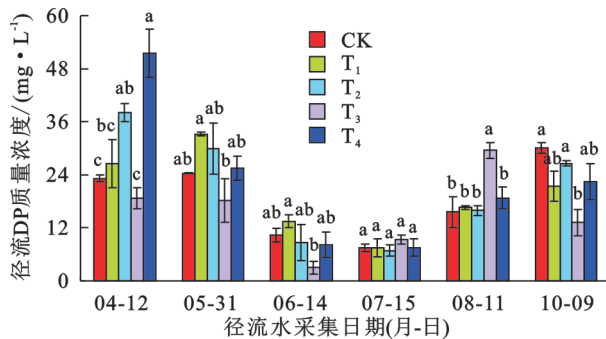


图7 不同施肥处理对径流TN/TP变化的影响

Fig. 7 Effects of different fertilization treatments on variations in runoff TN/TP ratios

物质限制性划分标准^[18-19]。本研究将TN/TP(摩尔比) > 50 时为磷限制, TN/TP(摩尔比) < 22 时认定为氮限制, 各次降雨中不同处理处于磷限制为CK, T_1, T_2, T_3, T_4 各有1, 4, 5, 2, 4次, 处于氮限制的CK, T_1, T_2, T_3, T_4 各有3, 3, 3, 5, 4次(图8)。

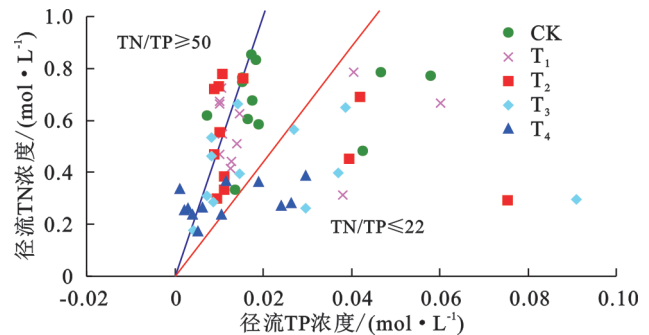


图8 不同施肥处理下径流TN和TP的限制状况

Fig. 8 Limitation status of runoff TN and TP under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 减氮增菌对产流量和产沙量的影响

地表径流的产生是因为当降雨量超过土壤的入渗能力时, 土壤达到饱和状态, 导致透水能力下降, 从而导致部分水沿着斜坡漫流^[20]。大量研究表明, 降雨量是影响径流的重要因素, 且降雨量与产流量呈显著正相关^[21-22]。在本研究中, 降雨量和产流量并不遵循这一规律, 这可能与高粱的种植有关, 4—6月高粱处于苗期—拔节期, 植被覆盖度低, 地表裸露多, 相同降雨下产流量较大; 7月份处于抽穗—灌浆期, 高粱生长旺盛, 蒸腾作用增强, 土壤中的水分被

大量消耗, 因此即使7月份降雨最多, 但产流量并不增多。另外, 本研究发现, 减氮增菌处理能够有效减少地表产流量, 且菌肥施用量越高对于减少地表产流量效果越好。这是因为长期施氮会加速土壤有机碳的周转, 使得土壤中微生物更加聚集在大团聚体附近, 进而小团聚体的形成减少, 因此土壤中的孔隙更多, 保持水分能力下降, 进而产流量变大^[23]。另一方面, 菌肥作为一种生物肥料, 不仅含有作物生长所必需的营养成分(有机质、氮、磷、钾), 还含有大量的有益微生物, 而这些微生物通过促进土壤有机质分解以形成更多的腐殖质, 进一步改善土壤团粒结构, 最终提高土壤保水性能^[24]。

研究表明,紫色土坡耕地表层是指在自然成土过程和常年耕种等因素作用下,耕作层土层浅薄,疏松多孔、渗透性强,而浅薄耕作层导致土壤持水能力及深层入渗能力下降,促进地表产流和产沙^[25],另外,水力驱动也是产沙形成的主要原因之一^[26]。在本研究中,减氮增菌处理能够有效减少产沙量,且菌肥用量越高,该土壤产沙量越少。菌肥中含有较多的有机质,腐殖化有机质是微团聚体形成的重要胶结物质,这种胶结物质可以通过物理、化学和生物化学过程吸附更多的土壤矿物^[27],进而减少土壤随径流水的损失。另外,通常认为土壤胶结物质就是土壤胶体,任凯璐等采用动态光散射技术监测发现,有机质的增加提高了土壤胶体颗粒表面电场强度,加大了胶体颗粒间的静电斥力,有机质组分的空间位阻效应使得胶体的凝聚现象减弱,这可能更有利于土壤团聚体的形成进而减少水土流失。

3.2 减氮增菌对径流氮磷流失量的影响

减氮处理对减少径流氮素流失具有比较明显的效果,这与朱泽宇等的研究结果保持一致,紫色土氮素的流失形态主要是以水溶态为主,原因可能在于紫色土中的胶体主要为蛭石和蒙脱石,其所带负电荷较多,不利于吸附土壤中带的硝酸根离子,造成硝酸根离子极易随径流流失。本研究中,增菌处理显著降低径流氮素损失,这可能与土壤微生物对氮素的固持作用有关。土壤微生物在生长发育过程中,会从土壤中吸收铵根离子、硝酸根离子,或简单有机含氮化合物,作为构成细胞物质的材料,并将其同化为细胞内生物大分子,这就是土壤微生物对氮素的固持作用,前人研究表明施用菌肥可以提高土壤中总氮含量。此外,菌肥中富含的有效微生物菌种,能够迅速分解并腐熟于土壤中,形成有机质。在这一过程中,有机质能够生成腐植酸,腐植酸与土壤中残留的氮元素结合,形成腐植酸铵,从而减少有机氮营养元素的流失,增加土壤中总氮积累。

在本研究中,减氮增菌处理显著降低径流DP损失。这是由磷素本身的性质所决定,大多数磷素施入土壤之后,经过一系列的化学、物理化学或生物化学过程,形成难溶磷酸盐,除了被微生物固持,还被土壤矿物吸附固定,这一部分磷很难被释放出来,也就不容易随径流损失。另一方面菌肥中富含大量外源碳、养分和微生物,促进原生土壤微生物大量繁殖,有利于产生磷酸酶、低分子有机酸和 H^+ 等,这些物质通过配位交换、 H^+ 活化和磷酸酶矿化等促进难溶性磷释放,形成各种生物有效磷(Enzyme-P, Citrate-P和HCl-P等),而这些生物有效磷能够迅速

被植物根系吸收,从而减少了在土壤表层富集,进而也不容易流失。另外,磷素较容易因为短期内暴雨导致的土壤侵蚀而流失。在本研究中,7月份是雨量最大的时候,而径流DP和TP流失量最大发生在6月份,这是可能由于6月份对高粱进行了追肥,大部分磷素未被植物吸收,而随雨水流失,表明在紫色土坡耕地农业活动安排中,应当重点关注施肥后的首场暴雨。

3.3 减氮增菌对氮磷限制特征的影响

氮磷比是用来衡量土壤养分状况的一个重要指标,氮磷比偏高或者偏低均会导致作物对土壤养分吸收不足。与李清藐等研究相比^[7],本研究中的TN/TP数值普遍偏低,这可能是由于氮素主要以溶解态(如硝态氮、氨氮)形式存在于径流中,容易随水流迁移。而磷素主要以颗粒态(如颗粒结合态磷)形式存在,在酸性土壤中,磷易被铁、铝、钙等离子固定形成难溶性化合物,其迁移依赖于土壤颗粒的冲刷。在相同条件下,氮素更容易通过径流流失,而磷素的流失则受到土壤颗粒吸附和冲刷能力的限制,因此TN/TP数值普遍偏低。另外,本研究中,各处理TN/TP大部分处于氮限制状态,这与王祥等的研究结果保持一致,他认为在高强度降雨(90 mm/h)和小坡度(6°)条件下,径流中的TP浓度较高,而TN浓度相对较低,导致TN/TP比值偏低,而对于本研究来说,这可能与该地区种植作物相关,该地区采取的白菜—高粱轮作,这两种作物对土壤氮素需求较大,而硝态氮又是氮素随地表径流的主要形式,因此,当白菜和高粱持续吸收硝态氮,则径流产生的硝态氮就会相应减少,在径流水中TN/TP就处于氮限制状态。因此,未来可以有更多研究关注于径流氮、磷生态化学计量特征,以及从径流水到土体的氮、磷化学计量特征变化及其之间的关系,制定更准确的径流营养物限制性划分标准,这将对精准化防治农田氮、磷流失及下游水体富营养化有一定指示意义。

4 结论

减氮增菌有效降低了产流量、产沙量、TN、DN、TP和DP流失量,且与减氮处理相比,增施高量菌肥处理的TN和DN流失量均显著降低。回归分析表明,TN、DN、TP、DP流失量与产流量呈显著正相关。另外,本研究大部分处理径流TN/TP比值小于22,表明该地区大部分土地处于氮限制状态。综上,减氮增菌处理为川南地区紫色土坡耕地的适宜农业管理措施,有效减少坡耕地土壤水土及养分流失,可作为该地区促进农业可持续生产的推荐施肥方式。

参考文献 (References):

- [1] Zhang S H, Hou X N, Wu C S, et al. Impacts of climate and planting structure changes on watershed runoff and nitrogen and phosphorus loss [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 706: 134489.
- [2] Zhao Y, Li Y L, Yang F. Critical review on soil phosphorus migration and transformation under freezing-thawing cycles and typical regulatory measurements [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141614.
- [3] Zhang Y, Yan Y J, Dai Q H, et al. Glyphosate spraying exacerbates nitrogen and phosphorus loss in karst slope farmland [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 196(1): 80.
- [4] Liu X Y, Shi H D, Bai Z K, et al. Assessing soil acidification of croplands in the Poyang Lake Basin of China from 2012 to 2018 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(8): 3072.
- [5] 张伟, 曾凤铃, 邹玉霞, 等. 秸秆和生物炭对紫色土坡耕地产流产沙与氮素流失的影响 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 20-27.
- Zhang W, Zeng F L, Zou Y X, et al. Effects of straw and biochar on runoff, sediment yield and nitrogen loss in sloping farmland of purple soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 20-27.
- [6] 王舒, 王子芳, 龙翼, 等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 [J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2406-2415.
- Wang S, Wang Z F, Long Y, et al. Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2406-2415.
- [7] 李清藐, 李天阳, 何丙辉, 等. 不同农作措施下紫色土坡耕地氮磷流失特征 [J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2024, 46(4): 46-54.
- Li Q M, Li T Y, He B H, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss from purple soil of sloping land under different farming practices [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2024, 46(4): 46-54.
- [8] 袁沛, 周旋, 杨威, 等. 化肥减氮配施对洞庭湖区双季稻产量和田面水氮磷流失风险的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2023, 37(5): 518-528.
- Yuan P, Zhou X, Yang W, et al. Effects of combined application of chemical fertilizers and nitrogen reduction on the yield of double-cropping rice and the risk of nitrogen and phosphorus loss in field water in Dongting Lake area [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(5): 518-528.
- [9] 吕永强, 郑铭洁, 吴家森, 等. 不同减量氮肥配施紫云英对田面水氮磷流失及水稻生长的影响 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 148-155.
- Lü Y Q, Zheng M J, Wu J S, et al. Effects of different nitrogen reduction fertilizer combined with milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on the loss of nitrogen and phosphorus in field water and rice growth [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 148-155.
- [10] 郑文琦, 谭文峰, 刘昭, 等. 氮肥减施对红壤旱坡花生地氮素径流和渗漏损失及表观平衡的影响 [J]. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1540-1550.
- Zheng W Q, Tan W F, Liu Z, et al. Effect of reduced nitrogen fertilization on nitrogen runoff loss and apparent balance on red-soil dry slope peanut land [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(6): 1540-1550.
- [11] 徐嘉昕, 肖元明, 王小赞, 等. 微生物菌肥与氮磷肥回补对退化高寒草甸土壤理化性质和酶活性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2025, 49(1): 159-172.
- Xu J X, Xiao Y M, Wang X Y, et al. Effects of microbial fertilizer and nitrogen and phosphorus fertilizer back-filling on soil physicochemical properties and enzyme activities in degraded alpine meadows [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(1): 159-172.
- [12] 许立阳, 王亚男, 曾希柏, 等. 微生物菌肥对瘠薄稻田土壤养分及水稻生长的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(10): 2350-2362.
- Xu L Y, Wang Y N, Zeng X B, et al. Microbial fertilizer effects on soil nutrients and rice growth in barren paddy fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(10): 2350-2362.
- [13] 朱泽宇, 毛志伟, 苏柠, 等. 控释氮肥减量施用对稻田氮素径流流失与水稻氮肥利用率的影响 [J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2025, 51(1): 74-82.
- Zhu Z Y, Mao Z W, Su N, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer reduced application on nitrogen runoff loss in paddy field and nitrogen use efficiency of rice [J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2025, 51(1): 74-82.
- [14] Sun B, Gu L K, Bao L J, et al. Application of biofertilizer containing *Bacillus subtilis* reduced the nitrogen loss in agricultural soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107911.
- [15] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 [J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5330-5339.
- Cao R X, Liu J, Deng K K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5330-5339.
- [16] 魏复盛, 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会编. 水和废水监测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Wei F S, Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, Editorial Board of

- Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th Edition, Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] 白力鑫,何丙辉,李天阳,等.长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J].水土保持学报,2024,38(1):31-39.
Bai L X, He B H, Li T Y, et al. Effects of long-term fertilization and tillage on the production of runoff and sediment on purple soil slope cropland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):31-39.
- [18] 聂泽宇,梁新强,邢波,等.基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略[J].生态学报,2012,32(1):48-55.
Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, et al. The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(1):48-55.
- [19] 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.
- [20] 王承书,杨晓楠,孙文义,等.极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J].土壤学报,2020,57(2):296-306.
Wang C S, Yang X N, Sun W Y, et al. Soil water storage capacity and rainwater infiltration in hilly-gully loess region under severe rainstorm [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(2):296-306.
- [21] 袭培栋,张鹏程,何为媛,等.模拟降雨下不同农作措施紫色土坡耕地氮磷流失特征[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):69-76.
Xi P D, Zhang P C, He W Y, et al. Response of nitrogen and phosphorus losses to different farming treatments in purple sloping farmland under simulated rainfall [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(6):69-76.
- [22] 赫恬,薛重华,孙家荣,等.城市雨水径流颗粒物中氮磷赋存特征及其影响因子研究进展[J].环境工程,2024,42(8):61-71.
He T, Xue C H, Sun J R, et al. Research progress on forms and influencing factors of nitrogen and phosphorus in particulate matters in urban stormwater runoff [J]. Environmental Engineering, 2024,42(8):61-71.
- [23] Wang Y D, Wang Z L, Zhang Q Z, et al. Long-term effects of nitrogen fertilization on aggregation and localization of carbon, nitrogen and microbial activities in soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1131-1139.
- [24] 张维理, KOLBE H, 张认连.土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J].中国农业科学,2020,53(2):317-331.
Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(2):317-331.
- [25] 张紫薇,赵文俊,李奇,等.表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响[J].土壤学报,2024,61(2):434-444.
Zhang Z W, Zhao W J, Li Q, et al. Effects of top soil structure on runoff and sediment yield of red soil slope cropland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 434-444.
- [26] 柳宏才,张会兰,夏绍钦,等.金沙江流域水沙变化及其驱动机制[J].水土保持研究,2023,30(2):107-115.
Liu H C, Zhang H L, Xia S Q, et al. Runoff and sediment discharge variations and corresponding driving mechanism in Jinsha River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):107-115.
- [27] 谭文峰,许运,史志华,等.胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J].土壤学报,2023,60(5):1297-1308.
Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5):1297-1308.