

## 水土保持措施对京郊板栗林地水土流失及面源污染的影响

郭子萱<sup>1</sup>, 郭建斌<sup>1,2</sup>, 孙驷阳<sup>3</sup>, 关红杰<sup>1,2</sup>, 王云琦<sup>1,2</sup>, 刘炳超<sup>1</sup>, 姜群鸥<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 3.长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站, 武汉 430010)

**摘要:** [目的] 探究水土保持措施对水土流失与面源污染的影响, 阐明不同措施的治理效果, 进而为筛选能够兼顾农业生态环境改善与农民经济收益的优化措施方案提供科学依据。[方法] 以北京市密云区板栗林地作为研究对象, 布设3种植被措施、5种工程措施及7种植被与工程组合措施, 分析了不同水土保持措施对水土流失及面源污染的影响, 对比不同措施减流减沙和面源污染控制效果, 从而揭示了减流减沙与面源污染削减效果的关系。[结果] (1) 在减流减沙效果上, 对于植被措施, 卷柏相较狗牙根和黑麦草减流减沙效果更好, 其减流率和减沙率分别为60.58%, 84.77%; 对于工程措施, 水平阶相较生态袋、鱼鳞坑+覆膜和鱼鳞坑减流减沙效果更好, 其减流率和减沙率分别为77.66%, 94.84%; 组合措施中, 椰丝毯与植被组合处理的减流减沙优于其他组合, 减流率达到90%以上, 减沙率接近100%。(2) 对于面源污染防治效果, 植被措施中卷柏面源污染削减效果最好, 总氮、氨氮、总磷、COD削减率分别为89.07%, 87.27%, 89.46%, 84.82%; 工程措施中水平阶面源污染削减效果最好, 总氮、氨氮、总磷、COD削减率分别为90.96%, 93.40%, 95.51%, 94.13%; 组合措施中, 椰丝毯与植被组合处理的面源污染削减效果更好, 削减率均能达到98%以上。(3) 减流减沙率与总氮、氨氮、总磷、COD的削减率呈显著的幂函数关系( $p < 0.05$ ), 且总磷和COD的削减率与减流率的相关性更强( $R^2 > 0.92$ ), 总磷削减率和减沙率相关性更强( $R^2 = 0.96$ ), 不同水土保持措施通过减少径流和泥沙对磷和有机物迁移具有更加有效的控制作用。[结论] 植被与工程组合措施对密云区板栗林地水土流失和面源污染控制效果更好。其中, 卷柏+椰丝毯综合防治效果最佳; 若以经济成本为首要考虑条件, 卷柏可作为该区域最佳水土保持措施。

**关键词:** 水土流失; 面源污染; 水土保持措施; 板栗林

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0058-14

### Effects of soil and water conservation measures on soil erosion and non-point source pollution in *Castanea mollissima* forest in suburban Beijing

Guo Zixuan<sup>1</sup>, Guo Jianbin<sup>1,2</sup>, Sun Siyang<sup>3</sup>, Guan Hongjie<sup>1,2</sup>, Wang Yunqi<sup>1,2</sup>, Liu Bingchao<sup>1</sup>, Jiang Qunou<sup>1,2</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3.Central Monitoring Station of Soil and Water Conservation in Yangtze River Basin, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the impact of soil and water conservation measures on soil erosion and non-point source pollution, to elucidate the effectiveness of different management measures, and to provide a scientific basis for selecting optimised measures that balance the improvement of the agricultural ecological environment with the economic benefits for farmers. [Methods] Taking the *Castanea mollissima* forest in Miyun District of Beijing as the research object, three vegetation measures, five engineering measures, and seven combined vegetation-engineering measures were designed to analyze the effects of different soil and water

收稿日期: 2025-04-30

修回日期: 2025-05-19

接受日期: 2025-05-22

资助项目: 北京市自然科学基金(8232040); 国家自然科学基金(42371291); 国家重点研发计划项目(2023YFF1304204)

第一作者: 郭子萱(1997—), 女, 新疆哈密人, 硕士研究生, 研究方向为水土流失与面源污染。E-mail: gzx\_bjfu@163.com

通信作者: 姜群鸥(1981—), 女, 河北冀州人, 博士, 教授, 主要从事数字流域综合管理研究。E-mail: jiangqo@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

conservation measures on soil erosion and non-point source pollution, and to compare the efficacy of various measures in reducing runoff and sedimentation, as well as mitigating non-point source pollution. The study further aimed to reveal the relationship between runoff and sediment reductions and the mitigation of non-point source pollution. [Results] (1) In terms of reducing runoff and sediment, among single vegetation measures, *Selaginella tamariscina* had better effect on runoff and sediment reduction compared with *Cynodon dactylon* and *Lolium perenne*, and its runoff and sediment reduction rates were 60.58% and 84.77%; among single engineering measures, contour trenches had better effect on runoff and sediment reduction compared with eco-bag, fish-scale terrace+mulch, and fish-scale terrace, and its runoff and sediment reduction rates were 77.66% and 94.84%. Among combination measures, the erosion control bio-blanket and vegetation combination treatment outperformed the other combinations in terms of runoff and sediment reduction, with runoff reduction rates of over 90% and sediment reduction rates of almost 100%. (2) Among single vegetation measures, *S. tamariscina* had the best effect in reducing non-point source pollution, with the reduction rates of Total Nitrogen (TN), Ammonia Nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), Total Phosphorus (TP) and Chemical Oxygen Demand (COD) being 89.07%, 87.27%, 89.46% and 84.82%, respectively. Among single engineering measures, contour trenches had the best effect in reducing non-point source pollution, with the reduction rates of TN, NH<sub>3</sub>-N, TP and COD being 90.96%, 93.40%, 95.51% and 94.13%, respectively. Among combination measures, the erosion control bio-blanket and vegetation combination treatment had a better effect in reducing non-point source pollution, with the reduction rates reaching more than 98%. (3) The runoff and sediment reduction rates showed a significant power function relationship with the reduction rates of TN, NH<sub>3</sub>-N, TP and COD ( $p < 0.05$ ). The correlation between the reduction rates of TP and COD and the runoff reduction rates was strong ( $R^2 > 0.92$ ), and the correlation between the reduction rates of TP and the sediment reduction rates was even stronger ( $R^2 = 0.96$ ). Different soil and water conservation measures were more effective in controlling the transport of phosphorus and organic matter by reducing runoff and sediment. [Conclusion] Vegetation and engineering combination measures are highly effective in controlling soil erosion and non-point source pollution in *C. mollissima* forest of Miyun District. Of these, the combination of *S. tamariscina* and the erosion control bio-blanket demonstrates the most effective integrated control. If economic cost is the primary consideration, *S. tamariscina* can be the most cost-effective soil and water conservation measure for this region.

**Keywords:** soil erosion; non-point source pollution; soil and water conservation measures; *Castanea mollissima* forest

水土流失和面源污染是两个具有密切关联的全球性生态环境问题。水土流失是面源污染发生的主要途径和载体,土壤中的养分和污染物质会随着水土流失进入水体,导致水体污染,进而影响水生生态系统的健康,对农业生产和生态系统可持续发展构成严重威胁。据中国和北京市水土保持公报数据显示,2024年全国水土流失总面积260.19万km<sup>2</sup>,其中,水力侵蚀面积105.10万km<sup>2</sup>,占水土流失总面积的40.39%;2023年北京市水土流失面积1788.69km<sup>2</sup>,占全市总面积的10.90%,密云水库流域水土流失面积达538.37km<sup>2</sup>,占全市水土流失总面积的30.26%。石匣小流域位于北京市密云区东北部,地处密云水库上游,是密云水库的重要生态屏障和水源保护区,且是密云主要经济作物燕山板栗的大规模种植区

域。然而,农民为满足果实采收及土壤保墒、堆肥的需要,破坏林下灌草等植被,导致地表裸露,水土流失问题日益凸显,而水土流失和面源污染互相影响、互相制约,共同作用形成典型的水土流失型面源污染<sup>[1]</sup>。由于经济林水土流失相较传统水土流失具有隐蔽性强、受关注度低、治理复杂度高等特点,导致当地水土保持措施不完善,过往治理方案的选择缺乏理论和实际依据,未能配备经济有效的阻控措施,石匣小流域板栗林种植区成为密云水库上游水土流失和面源污染的重要策源地。因此,进行多种水土保持措施对石匣板栗林地水土流失和面源污染治理效果的研究具有重要的理论和现实意义。

近年来,已有学者针对经济作物的水土流失与环境污染问题进行了研究,伍冰晨等<sup>[2]</sup>在红壤坡地果

园研究降雨—径流—侵蚀—养分输出过程发现,植被措施调节径流更有效,工程措施泥沙拦截更优,植被措施控制氮磷流失浓度更关键。Tan等<sup>[3]</sup>在黄土高原通过3种措施对土壤养分流失的影响进行研究,结果表明起垄和塑料薄膜覆盖对土壤有机质和总氮具有更好的保持效果。晏世杰等<sup>[4]</sup>在江西红壤坡地研究套种经济植物和传统水保措施秸秆覆盖+墒沟对幼龄油茶园产流产沙及氮磷流失的影响发现,地下收获药材郁金+植物篱模式是最经济高效的管理措施。具体到板栗林来说,目前板栗林水土流失和面源污染控制的相关措施主要包括耕作措施改进、工程措施和生物措施。向珊珊等<sup>[5]</sup>在板栗林下套种苍术和天麻,增加了土壤的容重和最小持水量,土壤全效氮、全效磷、全效钾、有效氮、有效磷和有机质增加。同在密云石匣小流域,杨润泽等<sup>[6]</sup>的研究表明在板栗林地水平阶和鱼鳞坑等工程措施在不同降雨条件下均有较好的减流减沙效益。目前,围绕密云水库周边水土流失的防治研究大部分采用较为单一的水土保持措施,关于植被和工程的组合措施研究较少,也未将农民经营成本考虑其中。此外,现有研究多聚焦减流减沙或面源污染,缺乏通过减流减沙从而拦截面源污染的研究。

鉴于此,本研究以北京市密云区石匣小流域板栗林地研究对象,通过布设3种植被措施、5种工程措施和7种植被与工程组合措施的简易径流小区,开展不同水土保持措施对水土流失与面源污染的影响研究。对比自然降雨条件下,不同水土保持措施减流减沙效果和面源污染削减效果,探讨不同治理措施下减流减沙率对面源污染削减率影响,解析水土流失与面源污染的相互作用关系,以期为京郊板栗林水土流失和面源治理,农业生态环境改善与农民经济收益增加提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验区位于北京市密云区高岭镇石匣小流域(117°00'34"—117°06'49"E, 40°30'42"—40°37'30"N),紧邻密云水库源头,属潮河流域下游,燕山山脉。地势北高南低,以低山丘陵为主,最高点海拔约358 m。气候类型为典型的暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥、夏季炎热湿润,年均降水量约为662 mm,年均降水日数约为75 d,80%的降水集中在夏季6—9月,此时降雨强度大,降雨侵蚀力显著增强,为水土流失和面源污染发生提供了重要条件。土壤以砂质壤土和粉砂质壤土为主,砾质含

量中等,土层较厚但耕层较薄。主要土地利用类型为坡耕地、林地和草地,其中天然次生林主要为山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)和椴树(*Tilia tuan*),经济林中板栗(*Castanea mollissima*)占据主导地位,占比高达80%。研究区面积为33 km<sup>2</sup>,水土流失面积约为32.22 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的97.7%。

### 1.2 试验设计与方法

试验于2021年5—6月在北京市密云区石匣水土保持示范园区布设坡度、坡长、坡向基本一致,规格为3 m×3 m的简易径流小区16个(1号小区为对照组),均用不透水厚度3 mm的PVC板构建,PVC板露出地面20 cm,埋深30 cm。每两个相邻小区之间相距50~60 cm,上方设排水沟减轻坡顶来水对小区的影响,下边坡修筑集水槽外接10 cm的PVC管连通长宽高为34 cm×20 cm×47 cm的径流桶来收集降雨产生的径流。径流小区包括卷柏(*Selaginella tamariscina*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、黑麦草(*Lolium perenne*)3种植被措施,水平阶、生态袋、石笼、鱼鳞坑、鱼鳞坑+覆膜5种工程措施及以上3种植被与椰丝毯和水平阶组合、狗牙根+鱼鳞坑组合合计15种措施配置模式(表1),植被措施盖度均为95%。在样地布设虹吸式雨量计记录试验区的降雨数据。

为消除前期因修建小区扰动植被及土壤环境对试验结果的影响,在6—7月初进行预试验,对预试验期间降雨后的样品进行测定,确认对监测结果无影响后,于2021年7—9月进行正式试验。

表1 简易径流小区概况

小区编号	坡长/m	面积/m <sup>2</sup>	坡度/(°)	植被措施	工程措施
1	3	9	17.5		
2	3	9	17.5	卷柏	水平阶
3	3	9	17.5	狗牙根	水平阶
4	3	9	17.5		水平阶
5	3	9	17.5	黑麦草	水平阶
6	3	9	17.5	狗牙根	
7	3	9	17.5	卷柏	
8	3	9	17.5	黑麦草	
9	3	9	17.5	卷柏	椰丝毯
10	3	9	17.5	狗牙根	椰丝毯
11	3	9	17.5	黑麦草	椰丝毯
12	3	9	17.5		生态袋
13	3	9	17.5		石笼
14	3	9	17.5	狗牙根	鱼鳞坑
15	3	9	17.5		鱼鳞坑+覆膜
16	3	9	17.5		鱼鳞坑

### 1.3 数据测定及计算

1.3.1 径流量和产沙量的测定 在每次降雨产流后,测定径流桶中的水位,径流桶的底面积为固定值,降雨后测量径流桶的深度即可计算当次产流量;泥沙量的测量步骤为充分搅拌径流桶内的泥水混合物,用500 ml的聚乙烯瓶采集满瓶混合水样,在实验室内加入明矾沉淀后过滤,放入105℃的烘箱中烘干并称重,得到500 ml含沙量,利用径流量计算得出产沙量。

1.3.2 总氮、氨氮、总磷、COD的测定 将径流桶中的上层清水倒入500 ml聚乙烯瓶用于面源污染指标检测,收集的水样于-18℃冰箱冷冻后送至北京市农林科学院进行总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、化学需氧量(COD)4个指标的测定。其中总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法进行检测,总磷(TP)用钼酸铵分光光度法进行检测,氨氮(NH<sub>3</sub>-N)用纳氏试剂分光光度法进行检测,化学需氧量(COD)采用重铬酸钾法进行检测<sup>[7]</sup>。

1.3.3 径流系数和含沙量的计算 利用降雨量、径流量、泥沙量数据计算径流系数和含沙量,计算公式为:

$$D_i = R_i / A \quad (1)$$

$$\alpha_i = D_i / P_i \quad (2)$$

式中: $D_i$ 为径流深(mm); $R_i$ 为次降雨事件径流量(L); $A$ 为小区面积(m<sup>2</sup>); $\alpha_i$ 为径流系数,无量纲; $P_i$ 为第*i*次产流事件的降雨量(mm)。

$$C_i = M_i / R_i \quad (3)$$

式中: $C_i$ 为含沙量(g/L); $M_i$ 为次降雨事件产沙量(g)。

1.3.4 减流率、减沙率和面源污染削减率的计算 利用径流量、产沙量及面源污染指标 TN, NH<sub>3</sub>-N, TP, COD 含量计算减流率、减沙率和面源污染削减

率,计算公式为:

$$K_{ri} = \frac{R_{bi} - R_{mi}}{R_{bi}} \quad (4)$$

式中: $K_{ri}$ 为减流率(%); $R_{bi}$ 和  $R_{mi}$ 分别为对照组和各水土保持措施的产流量(L)。

$$K_{ci} = \frac{C_{bi} - C_{mi}}{C_{bi}} \quad (5)$$

式中: $K_{ci}$ 为减沙率(%); $C_{bi}$ 和  $C_{mi}$ 分别为对照组和各水土保持措施的产沙量(g)。

$$K_{fi} = \frac{F_{bi} - F_{mi}}{F_{bi}} \quad (6)$$

式中: $K_{fi}$ 为不同面源污染物削减率(%); $F_{bi}$ 和  $F_{mi}$ 分别为对照组和各水土保持措施的不同面源污染物流失量(mg/m<sup>2</sup>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 样地降雨事件特征

2021年7—8月共有7场有产流的降雨(表2),分别是7月12日、7月13日、7月18日、7月25日、7月26日、8月5日和8月24日,7次降雨事件的降雨总量为356.8 mm,单次降雨量最低16.5 mm,最高124 mm,平均降雨量50.97 mm,降雨历时合计4 792 min。其中,7月12日为124 mm大雨量、61.2 mm/h高  $I_{30}$ 、长历时;7月26日为100.6 mm大雨量、42.6 mm/h高  $I_{30}$ 、长历时;8月5日为45.4 mm中雨量、47 mm/h高  $I_{30}$ 、长历时。以上3场降雨强度为暴雨到大暴雨。8月24日降雨量为27.2 mm,达到大雨强度。7月25日为24.4 mm中雨量、9.1 mm/h高雨强、短历时,是典型的短时强降雨。7月13日和7月18日为中雨强度。7场降雨中具有极端降雨和短时强降雨事件,降雨类型丰富,能够最大程度上反映各水土保持措施下产流产沙和面源污染情况,具有良好的试验价值。

表2 样地降雨事件特征

Table 2 Characteristics of rainfall events in sample sites

日期(年-月-日)	降雨量/ mm	降雨历时/ min	平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	$I_{30}$ / (mm·h <sup>-1</sup> )	$I_{60}$ / (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨强度
2021-07-12	124	1917	3.9	61.2	46.06	大暴雨
2021-07-13	16.5	322	3.1	30	15.2	中雨
2021-07-18	18.7	590	1.9	10.8	8.5	中雨
2021-07-25	24.4	161	9.1	23.2	17.5	短时强降雨
2021-07-26	100.6	855	8.2	42.6	33.82	大暴雨
2021-08-05	45.4	732	4.9	47	32.9	暴雨
2021-08-24	27.2	215	7.6	27.8	19.1	大雨

### 2.2 水土保持措施对产流产沙的影响

2.2.1 植被措施下产流产沙量的对比 本研究对布设植被措施的径流小区,自然降雨条件下的产流产沙

量进行观测分析(图1)。结果显示,产流量最高的是对照组,其平均产流量为14.18 L;与对照组相比,狗牙根平均产流量最高,为8.29 L;卷柏和黑麦草的平均产

流量差异不大,分别为 6.05, 6.86 L。对照组产流量分别是狗牙根的 1.71 倍、卷柏的 2.34 倍、黑麦草的 2.07 倍。对照组与黑麦草和卷柏处理之间存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 但与狗牙根处理之间差异未达到显著水平 ( $p > 0.05$ )。径流系数是衡量降水转化为地表径流比例的关键参数, 由图 1 可知, 各小区径流系数由大到小的排序与产流量一致。最小值为卷柏处理小区, 其值为 1.80%; 最大值为对照组, 其值为 4.40%。对照组径流系数是狗牙根的 1.83 倍, 卷柏的 2.44 倍, 黑麦草与卷柏径流系数相近, 为 2.00%。对照组与各植被措施处理之间存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 但各植被措施处理之间差异未达到显著水平 ( $p > 0.05$ )。

产沙量最高的是对照组, 其平均产沙量为 237.78 g;

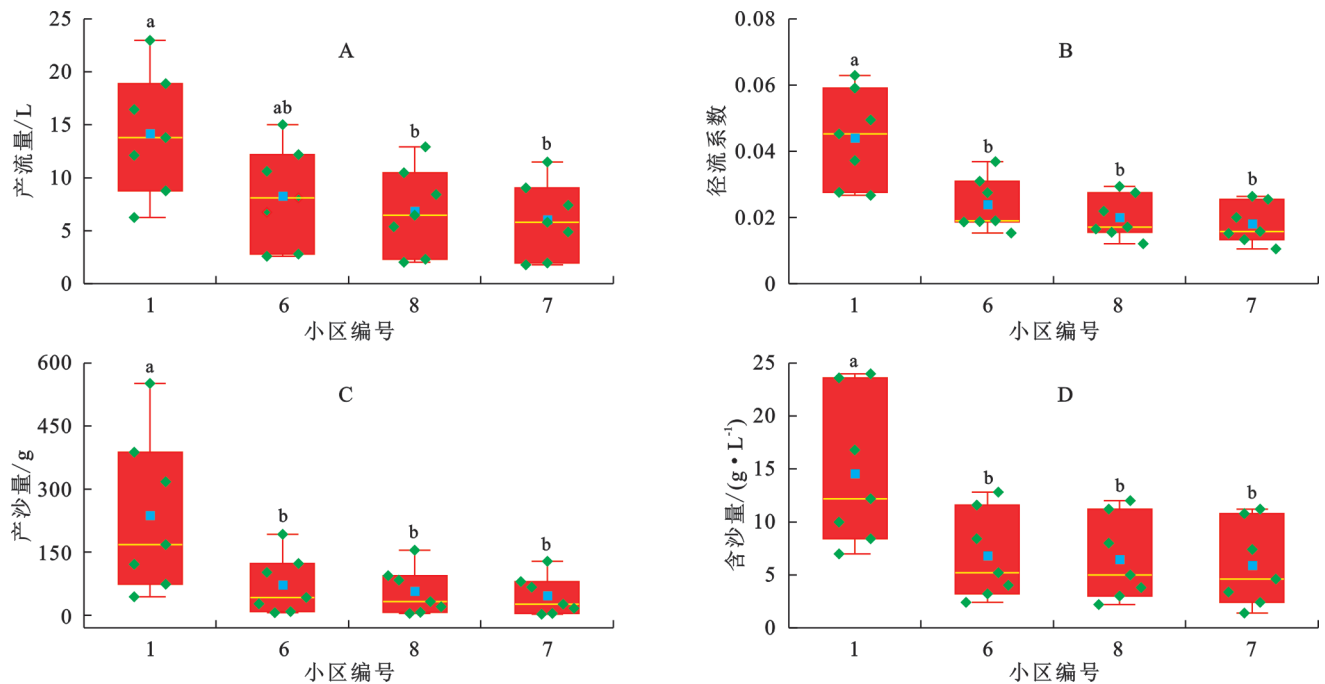


图 1 不同植被措施产流产沙量的对比

Fig. 1 Comparison of runoff and sediment yield by different vegetation measures

2.2.2 工程措施下产流产沙量的对比 本研究对布设工程措施的径流小区, 自然降雨条件下产流产沙量进行观测分析(图 2)。结果显示, 与对照组相比, 石笼平均产流量最高, 为 10.75 L; 鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜次之, 分别为 5.53, 4.99 L; 生态袋和水平阶平均产流量最低且差异不大, 分别为 3.85, 3.75 L。对照组产流量分别是石笼的 1.32 倍、鱼鳞坑的 2.56 倍、鱼鳞坑+覆膜的 2.84 倍、生态袋的 3.68 倍、水平阶的 3.78 倍。对照组与除石笼外的工程措施处理之间均存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 石笼与鱼鳞坑处理之间差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 但与其他工程措施均存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。从径流系数角度分析, 其由大到小排序与产流量一致。除对照组外, 石笼径流系数最大, 为 3.14%; 鱼鳞坑+覆膜、鱼鳞坑次之, 径流系数分别为

最低的为卷柏处理, 仅有 46.59 g。除对照组外, 狗牙根平均产沙量最高, 为 71.68 g; 黑麦草次之, 为 56.77 g。对照组产沙量是狗牙根的 3.32 倍、卷柏的 5.10 倍、黑麦草的 4.19 倍。另外从含沙量角度分析, 对照组的含沙量为 14.57 g/L, 含沙量最高; 3 种植被措施含沙量差异不大, 狗牙根相对较高为 6.8 g/L, 卷柏最低为 5.89 g/L。对照组含沙量是狗牙根的 2.14 倍、卷柏的 2.47 倍、黑麦草的 2.26 倍, 其由高到低排序与产沙量一致。对照组产沙量和含沙量与各植被措施处理之间存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 各植被措施处理虽存在一些差异, 但均未达到显著水平 ( $p > 0.05$ )。可以看出, 植被覆盖能够有效降低土壤侵蚀, 且卷柏作为板栗林地原生草本植物水土保持效果表现更优。

1.46%, 1.63%, 水平阶和生态袋径流系数最小, 分别为 1.11% 和 1.29%; 与其余工程措施相比, 径流系数最大的石笼是其余工程处理的 2 倍左右。对照组与各工程措施处理之间均存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 石笼与其他工程措施也存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

与对照组相比, 平均产沙量最低的水平阶处理仅有 18.49 g; 生态袋次之, 为 24.62 g; 对照组平均产沙量是水平阶的 12.86 倍、生态袋的 9.66 倍; 石笼平均产沙量最高, 为 141.11 g; 对于鱼鳞坑措施来说, 鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜平均产沙量差异较大, 分别为 72.46 g 和 37.72 g, 覆膜的产沙量明显降低。对照组与各工程措施处理之间均存在显著差异 ( $p < 0.05$ ), 但各工程措施处理之间差异并不显著 ( $p > 0.05$ )。从含沙量角度来看, 其由高到低排序与产沙量一致。

其中,水平阶和生态袋含沙量最低,分别为3.31,4.83 g/L;石笼和鱼鳞坑含沙量最高,分别为10.94,10.49 g/L。对照组含沙量是水平阶的4.40倍、生态袋的3.02倍、石笼的1.33倍、鱼鳞坑+覆膜的2.64倍、鱼鳞坑的1.39倍。对照组与覆膜+鱼鳞坑、生态袋及

水平阶处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),各工程措施处理虽存在一些差异,但均未达到显著水平( $p > 0.05$ )。可以看出,工程措施中石笼水土保持效果表现欠佳,鱼鳞坑与覆膜+鱼鳞坑差异不大,水平阶的综合表现更优,生态袋次之。

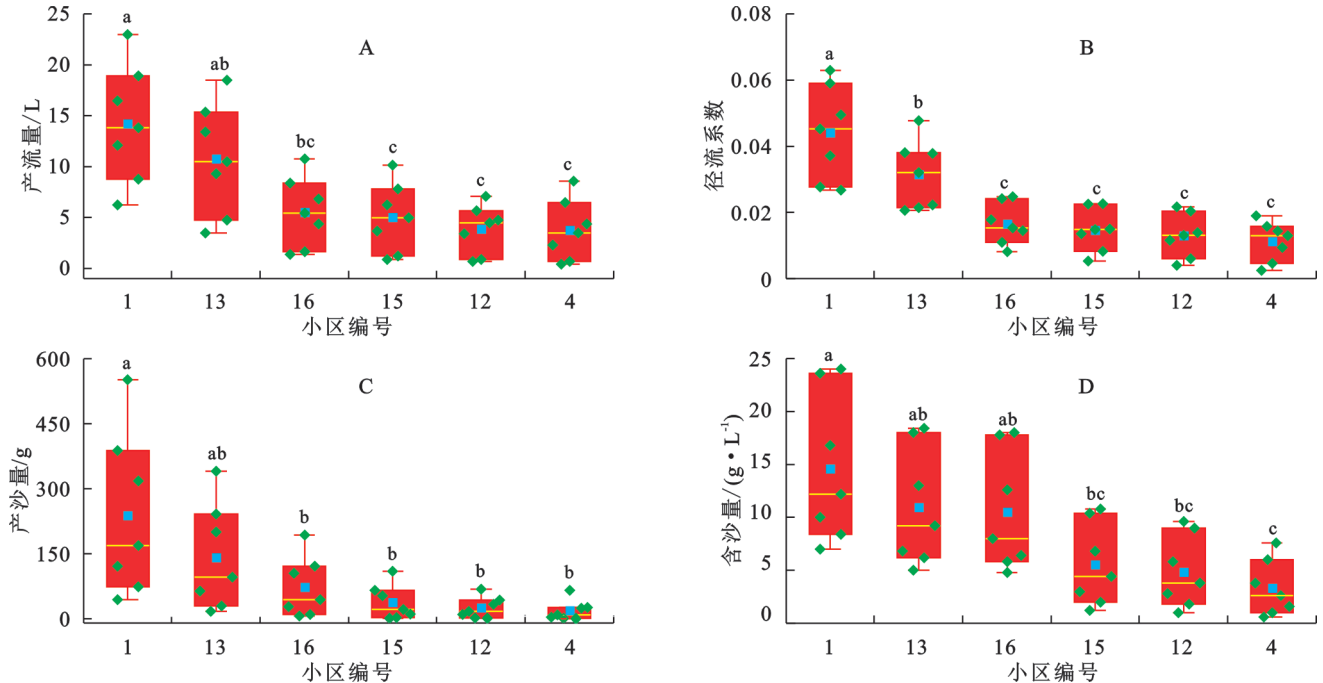


图2 不同工程措施产流产沙量的对比

Fig. 2 Comparison of runoff and sediment yield by different engineering measures

2.2.3 植被与工程组合措施下产流产沙量的对比  
本研究对布设植被与工程措施的径流小区,自然降雨条件下产流产沙量进行观测分析(图3)。结果显示,与对照组相比,组合措施的平均产流量都有明显降低,其中产流量最低的椰丝毯处理按组合植被狗牙根、黑麦草、卷柏的顺序分别为1.03,0.59,0.35 L;狗牙根+鱼鳞坑最高,为2.71 L;水平阶组合处理中,按组合植被狗牙根、黑麦草、卷柏的顺序分别为2.21,1.85,1.37 L;狗牙根与工程组合措施的产流量均高于其余植被;与相同工程措施的组合处理,卷柏组合产流量均较低。由图3可知,各小区径流系数由大到小的排序与产流量一致。与对照组相比,卷柏+椰丝毯处理小区径流系数最小,为0.24%;狗牙根+鱼鳞坑最大,为0.90%。对照组径流系数是狗牙根+鱼鳞坑的4.89倍、狗牙根+水平阶的5.95倍、黑麦草+水平阶的6.88倍、卷柏+水平阶的8.15倍,是椰丝毯组合的10倍以上。对照组产流量和径流系数与各组合处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),但各组合措施之间差异未达到显著水平( $p > 0.05$ )。

与对照组相比,组合措施的平均产沙量都有明显降低。产沙量最低的卷柏+椰丝毯处理仅有0.46 g;狗牙根和黑麦草与椰丝毯组合的处理分别为3.27,

1.38 g;整体来看,椰丝毯组合的产沙量最低;水平阶按组合植被卷柏、黑麦草、狗牙根的顺序分别为5.10,8.41,10.89 g;狗牙根+鱼鳞坑产沙量最高。从含沙量角度分析,其由高到低排序与产沙量一致。除对照组外,狗牙根+鱼鳞坑含沙量最高,为4.11 g/L;狗牙根、黑麦草、卷柏和水平阶的组合含沙量差异不大,分别为2.94,2.66,2.03 g/L;椰丝毯组合含沙量最低,按组合植被狗牙根、黑麦草、卷柏的顺序分别为1.57,1.2,0.66 g/L。对照组产沙量和含沙量与各组合处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),但各组合措施之间差异未达到显著水平( $p > 0.05$ )。可以看出,植被与工程组合措施下,产流产沙量较单一植被和工程措施更低,且椰丝毯组合综合表现更优。

## 2.3 水土保持措施对面源污染的影响

2.3.1 植被措施下面源污染物的对比  
本研究对布设植被措施坡面产流中的总氮、氨氮、总磷和化学需氧量(COD)浓度进行分析(图4)。结果显示,总氮浓度最高的是对照组,其单次降雨产流中的平均浓度高达12.68 mg/L。除对照组外,狗牙根处理平均总氮浓度最高,为7.70 mg/L;而卷柏平均总氮浓度仅为3.50 mg/L。对照组总氮浓度是狗牙根的1.65倍、卷柏的3.62倍、黑麦草的2.63倍。对照组与各植被措施处理

之间存在显著差异( $p < 0.05$ ), 狗牙根与黑麦草和卷柏处理之间也存在显著差异( $p < 0.05$ )。由图 4 可知, 各小区氨氮浓度由高到低排序与总氮一致。卷柏处理小区平均氨氮浓度最低, 为 1.02 mg/L; 对照组平均氨氮浓度最高, 为 3.14 mg/L, 是狗牙根的 1.91 倍、卷柏的 3.08 倍; 黑麦草平均氨氮浓度介于两者之间, 与卷柏相近, 为 1.21 mg/L。对照组与各处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ), 但各措施之间差异未达到显著水平( $p > 0.05$ )。总磷浓度与总氮、氨氮由高到低排序一致。卷柏单次降雨产流中的平均总磷浓度仅有 0.057 mg/L; 对照组平均总磷浓度则高达 0.214 mg/L, 是狗牙根的

3.15 倍、卷柏的 3.75 倍、黑麦草的 3.45 倍。对照组与各植被措施处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ), 但各组合措施之间差异未达到显著水平( $p > 0.05$ )。另外从 COD 的角度分析, 对照组 COD 浓度最高, 其单次降雨产流中的平均浓度为 118.06 mg/L; 狗牙根和黑麦草平均 COD 浓度差异不大, 分别为 75.07, 64.91 mg/L; 卷柏平均 COD 浓度最低, 为 45.03 mg/L。对照组与黑麦草和卷柏处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ), 狗牙根与其余植被措施处理虽存在一些差异, 但均未达到显著水平( $p > 0.05$ )。可以看出, 植被覆盖对氮磷流失和 COD 有一定控制作用, 其中, 卷柏的污染物浓度均最低。

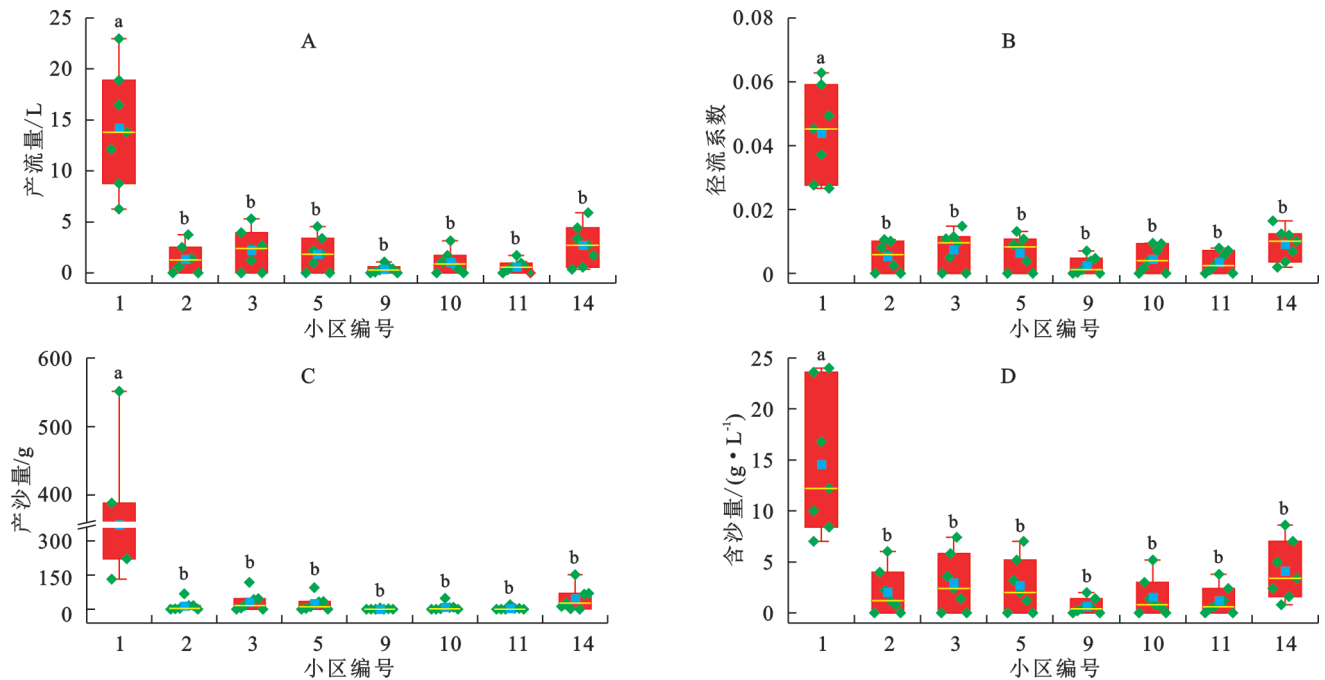


图 3 不同植被与工程组合措施产流产沙量的对比

Fig. 3 Comparison of runoff and sediment yield between different combined vegetation-engineering measures

2.3.2 工程措施下面源污染物的对比 本研究对布设工程措施坡面产流中的总氮、氨氮、总磷和 COD 浓度进行分析(图 5)。结果显示, 与对照组相比, 总氮浓度最高的是石笼, 其单次降雨产流中的平均浓度为 11.12 mg/L; 鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜平均总氮浓度差异不大, 分别为 9.05, 8.32 mg/L; 生态袋和水平阶平均总氮浓度最低, 仅为 5.89, 4.86 mg/L。对照组与除石笼外的工程措施处理之间均存在显著差异( $p < 0.05$ ), 石笼与生态袋和水平阶处理存在显著差异( $p < 0.05$ )。由图 5 可知, 各小区氨氮浓度由高到低的排序与总氮一致。最小值为水平阶处理小区, 其平均氨氮浓度仅为 0.92 mg/L, 对照组是其浓度的 3.14 倍; 生态袋次之, 为 1.58 mg/L; 石笼平均氨氮浓度最高, 为 2.19 mg/L; 鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜平均氨氮浓度差异不大, 分别为 1.71, 1.03 mg/L。对照组与各工程措施处理之间均存在显著差异( $p < 0.05$ ),

石笼与其余工程措施处理之间也存在显著差异( $p < 0.05$ ), 但除石笼外的其他工程措施之间差异不显著( $p > 0.05$ )。总磷浓度由高到低排序与总氮、氨氮一致。水平阶单次降雨产流中的平均总磷浓度仅有 0.043 mg/L; 生态袋次之, 为 0.051 mg/L; 除对照组外, 石笼平均总磷浓度则高达 0.118 mg/L; 鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜平均总磷浓度相近, 分别为 0.088, 0.078 mg/L。对照组与除石笼外的工程措施处理之间均存在显著差异( $p < 0.05$ ), 鱼鳞坑、覆膜+鱼鳞坑、生态袋及水平阶处理之间差异不显著( $p > 0.05$ )。另外从 COD 的角度分析, 与对照组相比, 石笼平均 COD 浓度最高, 为 85.15 mg/L; 鱼鳞坑、鱼鳞坑+覆膜次之, 分别为 57.72, 51.35 mg/L; 生态袋和水平阶平均 COD 浓度最低, 仅为 34.56, 29.93 mg/L。对照组与除石笼外的工程措施处理之间均存在显著差异( $p < 0.05$ ), 石笼与生态袋和水平阶处理之间差异显

著( $p < 0.05$ )。可以看出,工程措施中,石笼的氮磷浓度和 COD 浓度仍较高,鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜同种

污染物浓度差异不大,水平阶和生态袋的氮磷浓度和 COD 浓度均较低。

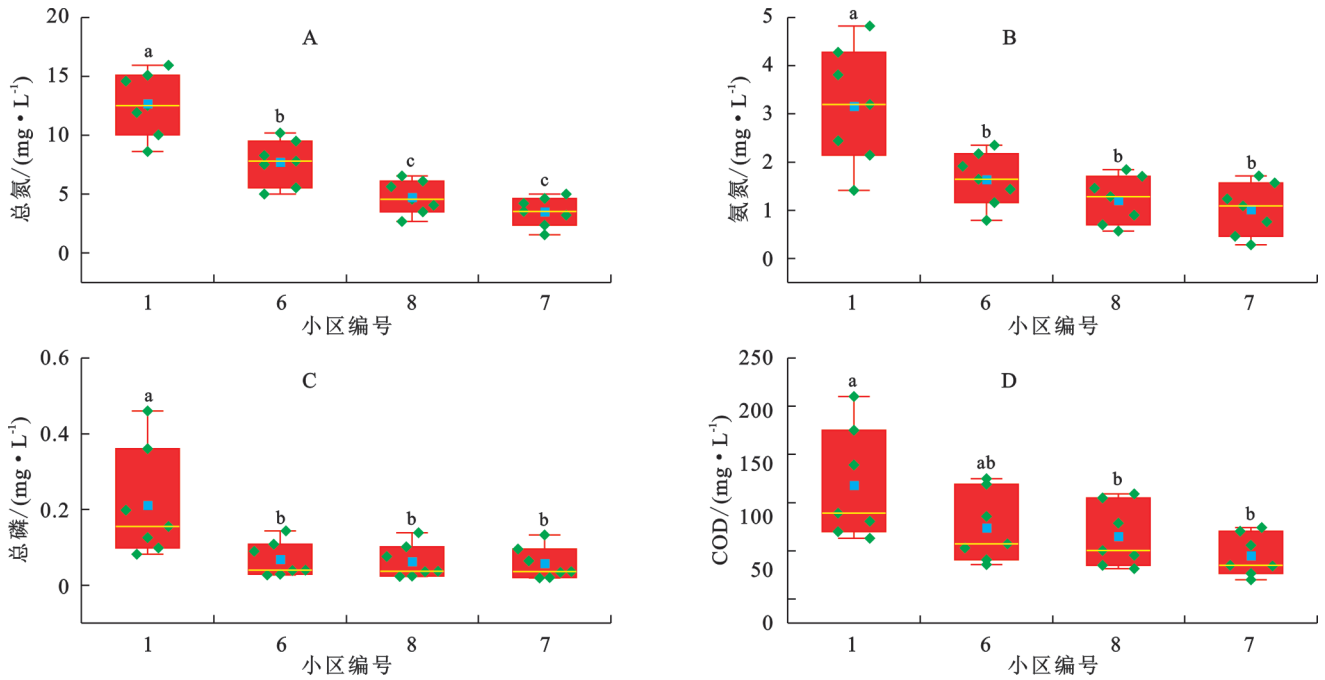


图 4 不同植被措施面源污染物浓度的对比

Fig. 4 Comparison of non-point source pollutant concentrations by different vegetation measures

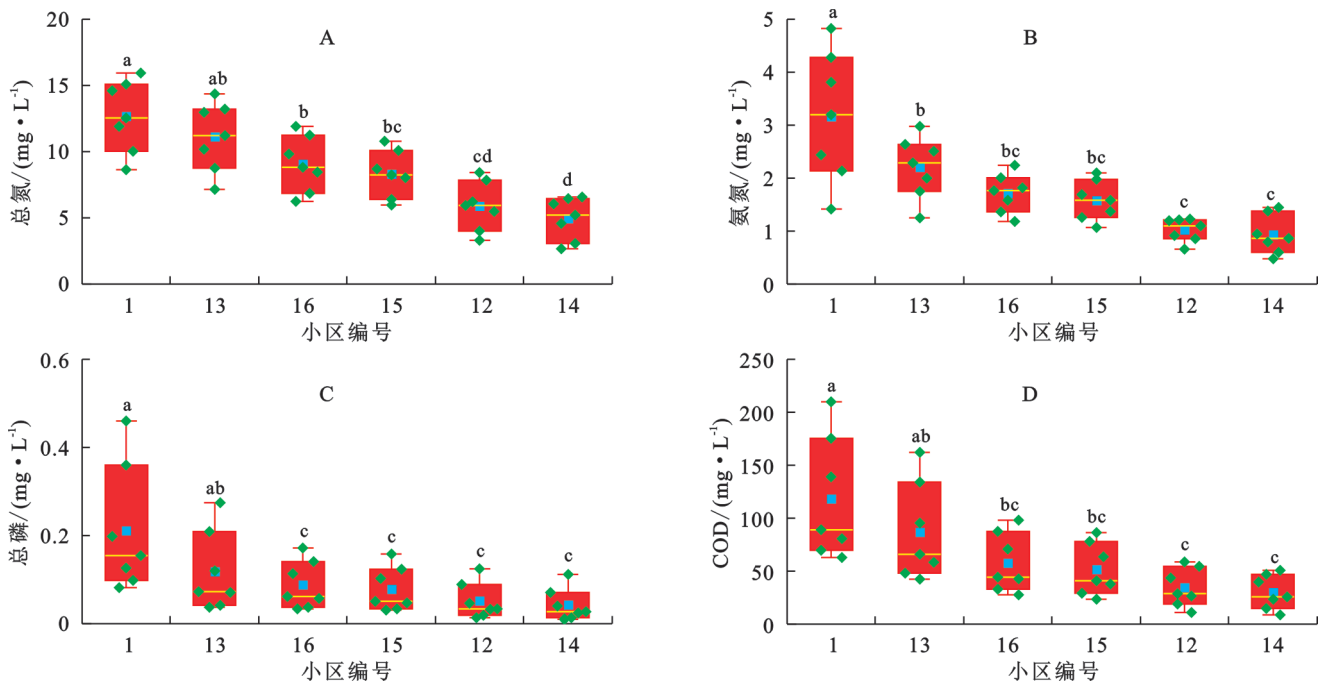


图 5 不同工程措施面源污染物浓度的对比

Fig. 5 Comparison of non-point source pollutant concentrations by different engineering measures

2.3.3 植被与工程组合措施下面源污染物的对比  
本研究对布设植被与工程组合措施坡面产流中的总氮、氨氮、总磷和 COD 浓度进行分析(图 6)。结果显示,与对照组相比,组合措施的总氮浓度均有明显降低。椰丝毯组合平均总氮浓度最低,按组合植被狗牙根、黑麦草、卷柏的顺序分别为 1.47, 1.26, 0.78 mg/L; 狗牙根+鱼鳞坑平均总氮浓度最高,为 6.71 mg/L;水

平阶组合处理中,按组合植被狗牙根、黑麦草、卷柏的顺序平均总氮浓度分别为 2.50, 2.21, 1.65 mg/L; 狗牙根在与工程措施的组合处理上总氮浓度均高于其余植被与相同工程措施的组合处理。对照组与各组合处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),狗牙根+鱼鳞坑处理与其余组合处理之间也存在显著差异( $p < 0.05$ ),但除狗牙根+鱼鳞坑外的组合措施之间差异未达到显著水平

( $p>0.05$ )。由图 6 可知,各小区氨氮浓度由高到低排序与总氮一致。与对照组相比,卷柏+椰丝毯处理小区平均氨氮浓度最低,为 0.16 mg/L;狗牙根+鱼鳞坑小区平均氨氮浓度最高,为 0.95 mg/L。对照组氨氮浓度是狗牙根+鱼鳞坑的 3.31 倍、狗牙根+水平阶的 5.81 倍、黑麦草+水平阶的 6.98 倍、卷柏+水平阶的 9.52 倍,是椰丝毯组合的 10 倍以上。对照组与各组合处理之间存在显著差异( $p<0.05$ ),狗牙根+鱼鳞坑与黑麦草+椰丝毯和卷柏+椰丝毯处理之间差异显著( $p<0.05$ ),其余组合处理之间虽存在一些差异,但均未达到显著水平( $p>0.05$ )。总磷浓度由高到低排序与总氮、氨氮一致。与对照组相比,狗牙根+鱼鳞坑总磷浓度最高,其单次降雨产流中的平均浓度为 0.047 mg/L;水平阶工程处理按组合植被狗牙根、黑麦

草、卷柏的顺序平均总磷浓度分别为 0.034, 0.032, 0.029 mg/L;卷柏+椰丝毯单次降雨产流中的平均总磷浓度仅有 0.021 mg/L。另外从 COD 的角度分析,狗牙根+鱼鳞坑平均 COD 浓度最高,为 38.30 mg/L;狗牙根+水平阶和黑麦草+水平阶平均 COD 浓度差异不大,为 23.28, 21.41 mg/L;卷柏+水平阶为水平阶组合中平均 COD 浓度最低的,为 18.13 mg/L;狗牙根+椰丝毯、黑麦草+椰丝毯、卷柏+椰丝毯的平均 COD 浓度分别为 16.09, 13.60, 11.41 mg/L, 椰丝毯组合的平均 COD 浓度最低。对照组总磷和 COD 浓度与各组合处理之间存在显著差异( $p<0.05$ ),但各组合措施之间差异未达到显著水平( $p>0.05$ )。可以看出,植被与工程组合措施的氮磷浓度和 COD 浓度较单一植被和工程措施更低,且椰丝毯组合综合表现更优。

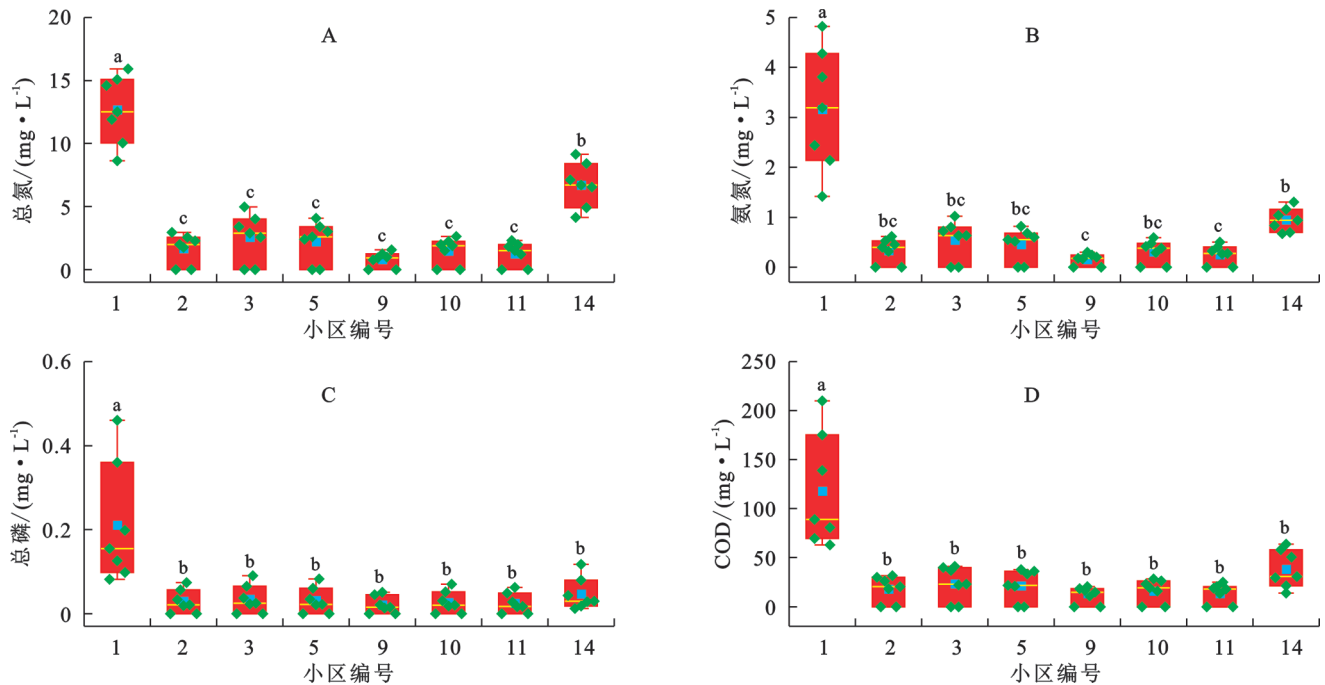


图 6 不同植被与工程组合措施面源污染物浓度的对比

Fig. 6 Comparison of non-point source pollutant concentrations between different combined vegetation-engineering measures

## 2.4 水土保持措施对减流率和减沙率及面源污染削减率的影响

### 2.4.1 水土保持措施对减流率和减沙率的影响

通过坡面试验发现,各水土保持措施减流减沙效益存在一定差异。总体来看,不同水土保持措施的减流率范围在 27.76%~97.40%。植被措施中,卷柏减流效果最好,减流率为 60.58%;狗牙根最差,为 45.49%。工程措施中,水平阶和生态袋减流效果最好,减流率分别为 77.66% 和 75.56%;鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜削减效果差异不大,分别为 64.57% 和 68.88%;石笼减流效果为所有措施中最不理想的,为 27.76%。植被与工程组合措施中,椰丝毯组合减流效果更好,减流率均在 90% 以上。从整体来看,植被与工程组合措施的

减流效果最好,单一工程措施除石笼外次之。

不同水土保持措施减沙率范围在 46.30%~99.85%。植被措施中,卷柏减沙效果最好,减沙率为 84.77%;狗牙根最差,为 75.39%。工程措施中,水平阶和生态袋减沙效果最好,减沙率分别为 94.84% 和 92.09%;鱼鳞坑+覆膜次之,为 88.41%,较未覆膜的鱼鳞坑高 14%;石笼减沙效果最差,为 46.30%。植被与工程组合措施中,椰丝毯组合减沙效果更好,均在 98% 以上;水平阶组合次之,在 95% 以上。从整体来看,植被与工程组合措施的减沙效果接近 100%,具有很好的减沙效果,工程措施中鱼鳞坑的减沙效果略逊于植被措施。

通过对各水土保持措施下减流减沙率关系进行

分析发现(图7),不同水土保持措施减沙效果较减流效果更好。以减流减沙效益在组间表现均不理想的石笼为例,其减沙率为46.30%,而减流率仅有27.76%。但在植被与工程组合措施中,减流减沙率逐渐趋于一致,椰丝毯组合减流减沙率均接近100%。对减流率和减沙率进行拟合发现, $R^2$ 为0.92,减流率和减沙率之间存在显著的幂函数关系( $p < 0.05$ ),部分组合措施如黑麦草+水平阶、狗牙根+水平阶等的散点多分布于拟合直线附近或上方,说明这些组合在协调减流与减沙方面表现更均衡。

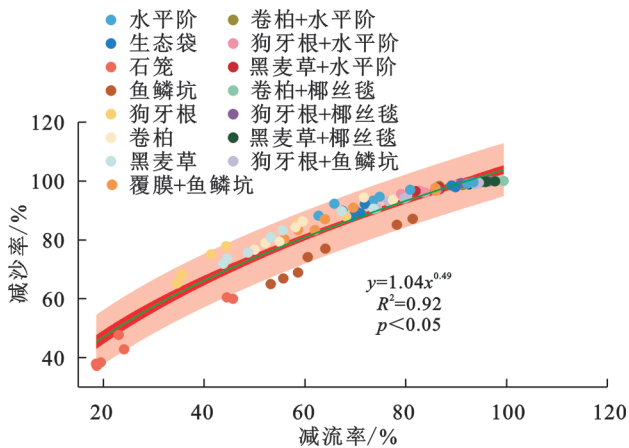


图7 各水土保持措施减流率和减沙率相关关系  
Fig. 7 Correlation between runoff reduction rate and sediment reduction rate for different soil and water conservation measures

2.4.2 水土保持措施对面源污染削减率的影响 各水土保持措施面源污染削减率也存在一定差异。不同水土保持措施总氮削减率范围在36.72%~99.79%。植被措施中,卷柏削减效果最好,削减率为89.07%;狗牙根最差,为66.83%。工程措施中,水平阶削减效果最好,削减率为90.96%;生态袋次之,为88.49%;鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜削减效果差异不大,分别为74.70%和79.63%;石笼削减效果在所有措施中最低,为36.72%。植被与工程组合措施中,椰丝毯组合削减率均能达98%以上,削减率最高的卷柏+椰丝毯为99.79%,且卷柏与任一工程措施的组合处理都更出色。从整体来看,椰丝毯与植被措施的处理组合总氮削减效果最好,水平阶组合次之,水平阶削减效果优于单一植被措施。

不同水土保持措施氨氮削减率范围在47.68%~99.84%。植被措施中,卷柏削减效果最好,削减率为87.27%;狗牙根最差,为71.08%。工程措施中,水平阶削减效果最好,削减率为93.40%;生态袋次之,为91.94%;鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜削减效果差异不大,分别为80.32%和84.34%;削减效果最差的石笼,削减率为47.68%。植被与工程组合措施中,植被与椰

丝毯组合处理的削减效果更好,削减率均在99%以上,且卷柏与任一工程措施的组合处理削减率均在95%以上。从整体来看,椰丝毯和水平阶与植被的组合措施削减效果更优于其他措施,卷柏削减效果虽略低于水平阶和生态袋,但优于其他工程措施。

不同水土保持措施总磷削减率范围在61.16%~99.71%,相比其他污染物削减率跨度较小。植被措施中,卷柏削减效果最好,削减率为89.46%;狗牙根最差,为82.22%。工程措施中,水平阶和生态袋削减效果最好,削减率分别为95.51%和94.15%,石笼削减效果最差,削减率为66.16%。植被与工程组合措施中,椰丝毯与植被组合措施的削减效果更好,削减率均在98%以上。从整体来看,以上措施对于总磷削减都较为有效,椰丝毯和水平阶与植被的组合措施削减效果优于其他措施,水平阶在单一措施中表现更好。

不同水土保持措施COD削减率范围在47.62%~99.71%。植被措施中,卷柏削减效果最好,削减率为84.82%;狗牙根最差,为65.93%。工程措施中,水平阶和生态袋削减效果最好,削减率为94.13%和92.66%;鱼鳞坑和鱼鳞坑+覆膜削减效果差异不大,分别为82.53%和86.29%;削减效果最差的石笼,削减率为47.62%;植被与工程组合措施中,植被与椰丝毯组合处理的削减效果更好,削减率均在98%以上,且卷柏与任一工程措施的组合处理削减率也均在95%以上。从整体来看,椰丝毯与植被组合措施削减效果更优于其他措施,单一措施中水平阶的削减效果更好,生态袋次之。

2.4.3 水土保持措施减流减沙率和面源污染削减率相关性分析 通过对各水土保持措施下减流率和面源污染削减率关系进行分析发现(图8),总氮、氨氮、总磷、COD的削减率均和减流率表现出显著的幂函数关系( $p < 0.05$ ),减流率的提升能够显著增强总氮、氨氮、总磷、COD的削减效果,且同一措施面源污染削减率较减流率更高。但在减流率达到80%左右时,面源污染削减效果与减流效果趋于均衡,例如在植被与工程组合措施中,减流率和面源污染削减率逐渐趋于一致,椰丝毯组合减流率和面源污染削减率接近100%。且总磷和COD削减率与减流率相关性更强,其 $R^2$ 分别为0.92,0.95,减流率对总磷和COD削减效果更为显著。

通过对各水土保持措施下减沙率和面源污染削减率关系进行分析发现,总氮、氨氮、总磷、COD的削减率均和减沙率表现出显著的幂函数关系( $p < 0.05$ ),且拟合优度较高, $R^2$ 均在0.91以上,减沙率的提高能够显著增强总氮、氨氮、总磷、COD的削减效果。不同

措施减沙率和面源污染削减效果存在差异,但总体趋势一致。例如,卷柏+水平阶和狗牙根+椰丝毯在总

氮和氨氮削减方面表现较好,而黑麦草+水平阶和水平阶在总磷和COD削减方面表现较为突出。

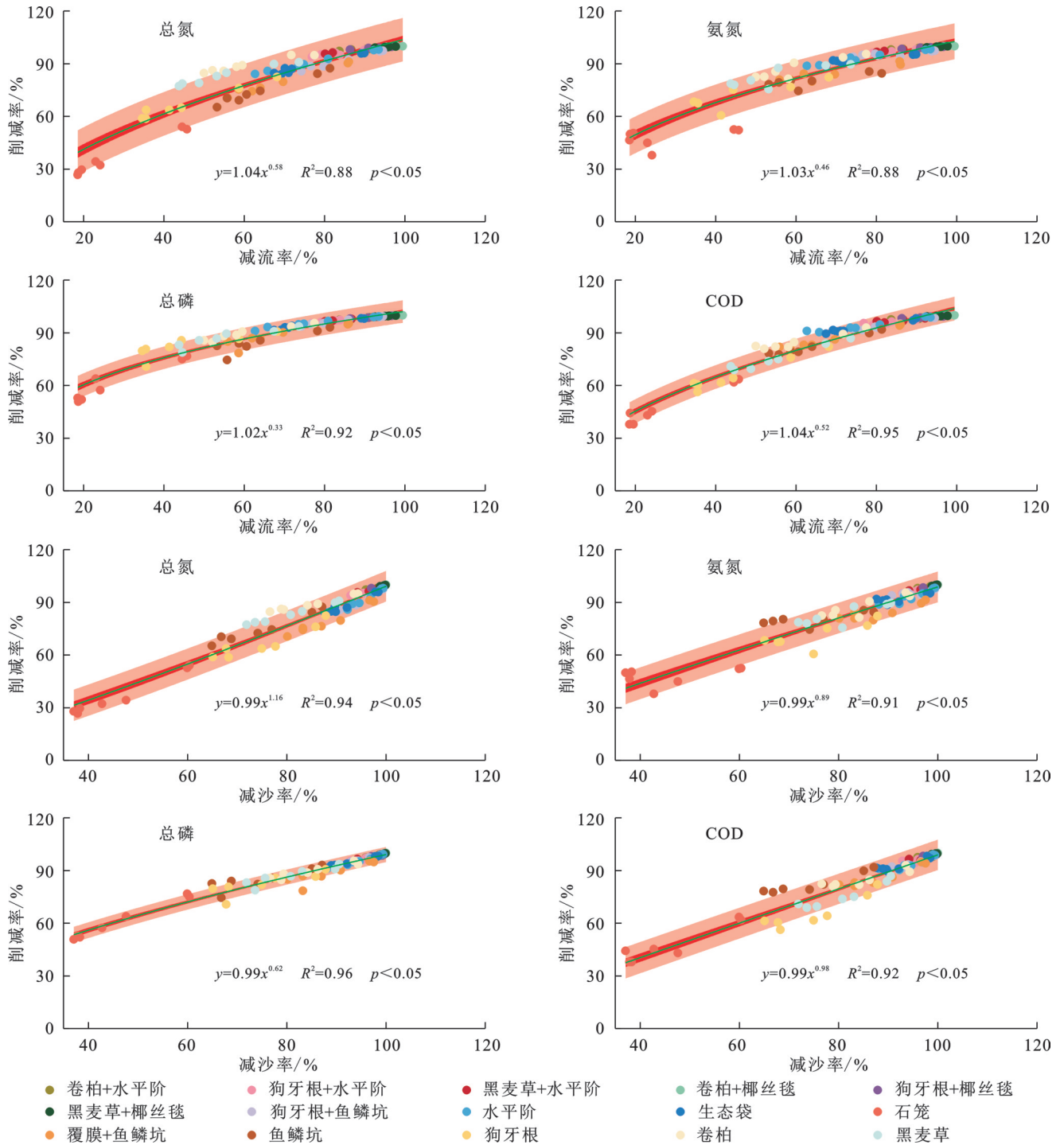


图 8 各水土保持措施减流减沙率与面源污染削减率相关关系

Fig. 8 Correlation between runoff reduction rate and sediment reduction rate and reduction rate of non-point source pollution for different soil and water conservation measures

### 3 讨论

#### 3.1 水土保持措施对减流减沙效果的影响

本试验结果表明,不同水土保持措施均能有效减少径流和土壤侵蚀。植被措施通过植被覆盖地表降低雨滴降落能量,使降雨再分配,增加土壤入渗减

少地表径流<sup>[8]</sup>;同时,植被根系能够有效固土,减少产沙量<sup>[9]</sup>。卷柏在多次降雨中减流减沙效果均是单一植被措施中最好的,这可能是因为卷柏为匍匐茎植物,对地表覆盖度更高,且其耐湿性好,在减缓部分坡面径流的同时,增加土壤持水量和减少土壤流失量;其次卷柏为试验地原生植被,具有更好的适宜

性。这与张萌等<sup>[10]</sup>的研究中对比结缕草与卷柏的减流减沙效益,卷柏表现更优的研究结果类似。

工程措施中,水平阶通过改变地表的坡度和水流方向,使原本集中快速的径流分散并减缓流速,减轻地表冲刷,从而达到减流减沙的效果<sup>[11]</sup>。本试验中,水平阶在单一措施中减流减沙效果最优,这可能与试验时的降雨条件有关<sup>[12]</sup>,7—8月北京多暴雨,水平阶快速分散冲刷水流,抑制水土流失<sup>[13]</sup>;且板栗林地本身坡度落差较大,水平阶能够弥补坡度带来的土壤侵蚀问题<sup>[14]</sup>。石笼主要是通过阻截和降低地表径流速度来削弱径流携带泥沙的能力,但由于单一石笼措施地表裸露,且石块填充具有较大孔隙,导致其阻截径流的效果相对较差,对径流、泥沙的截留效果欠佳<sup>[15]</sup>。覆膜后的鱼鳞坑减沙效果更好,这可能是因为覆膜可以增强鱼鳞坑的结构稳定性,使其在降雨或径流冲击下不易被破坏,从而更好地发挥拦截泥沙的作用<sup>[16]</sup>。

王玥欢等<sup>[17]</sup>通过对侵蚀性降雨条件下水土保持措施对坡面水土流失的影响发现,植被与工程组合措施的水土保持效果更佳。本试验中,椰丝毯和水平阶与植被的组合措施在所有样本降雨事件中,减流减沙效果均优于其他措施,但张萌等<sup>[10]</sup>的研究中虽然植被与工程措施的减流减沙效果略强于单一措施,但差异并不显著。此外,不同水土保持措施的减流减沙效果并不趋同。例如,狗牙根与工程组合措施中,鱼鳞坑的减流效果更好,而水平阶的减沙效果更好,这与Zhao等<sup>[18]</sup>和赵泽坤等<sup>[19]</sup>的研究结果类似。未来希望能够进一步探索多种植被与工程组合措施,对于植被可以选择适宜种植在板栗林下且具有经济效益的植物,以期带动果农共同维护林下植被的积极性,降低水土保持措施建设成本。

### 3.2 水土保持措施对面源污染控制效果的影响

大量研究皆表明,布设水土保持措施能够从过程拦截的角度进行面源污染防治,从迁移路径上对污染物进行控制<sup>[20]</sup>。植被措施通过覆盖地表拦截径流中的泥沙和悬浮物,减少进入水体的固体颗粒物,同时,吸收和转化径流中的氮、磷等污染物,降低其浓度。Wu等<sup>[21]</sup>对比狗牙根、白花三叶草、高羊茅对总氮、总磷和COD的削减效果发现狗牙根的削减效果最好,其总氮、总磷、COD削减率分别为45.7%,50.0%,43.4%,与本试验结果类似。在本试验中,卷柏在3种植被措施中面源污染削减效果最好,虽然从植被根系角度考虑,黑麦草和狗牙根根系更为发达,但卷柏是当地原生植被,而黑麦草和狗牙根为试验种植,对土壤结构扰动可能较大,从而导致面源污染

拦截效果降低<sup>[22]</sup>。工程措施中,水平阶和生态袋面源污染削减效果更好,而石笼和未覆膜的鱼鳞坑效果稍差,这可能是发生短时强降雨时,超渗产流导致径流携带更多污染物质进入水体,这与李凯等<sup>[23]</sup>在永定河流域的研究结果类似。

本试验结果表面,植被与工程措施的组合模式能够将面源污染削减效果最大化,这是因为植被与工程措施能够协同发挥作用,互相补足短板,达到相对更好的治理效果。这与孙棋棋等<sup>[24]</sup>在中国农业面源污染最佳管理措施研究进展中的结果相同,组合措施能够显著提升流域水质,有效降低面源污染物质输出负荷。汪栩志等<sup>[25]</sup>利用SWAT探究洱海流域面源污染最佳措施结果表明,综合措施的氮磷流失削减效果更好。面源污染是一个复杂的生态问题,无法一概而论,未来应当加大多种因素共同影响下的面源污染控制措施研究,从“产—流—汇”3个阶段合力治理。

### 3.3 水土保持措施减流减沙对面源污染削减效果的影响

本试验表明,总氮、氨氮、总磷、COD的削减率均和减流减沙率表现出显著的幂函数关系( $p < 0.05$ ),减流减沙率的提高对试验中的污染物削减效果均有显著的促进作用<sup>[26]</sup>。其中,总磷和COD削减率与减流率联系比总氮、氨氮削减率更紧密,这可能与氮素的迁移和转化机制复杂有关,在长历时降雨中氮素可能会挥发和转化。总磷削减率和减沙率相关性更强,这表明不同水土保持措施通过减少泥沙对磷的迁移具有有效的控制作用,物理拦截和吸附均能有效降低磷的流失。这与孙理阳等<sup>[27]</sup>和张旭琳等<sup>[28]</sup>的研究结果类似,磷流失斜率更大,流失量更多,表明磷流失量对产流产沙量的敏感性更高。

此外,不同水土保持措施在减沙率较低时的表现差异较大,例如卷柏+水平阶和狗牙根+水平阶在减流减沙率较低时面源污染削减效果一般,这可能是由于其对污染物的吸附和固定能力在产流产沙量较小时优势不明显;而生态袋和石笼等措施在减流减沙率较低时削减效果较好,可能是由于其物理结构能够在降雨初期快速拦截污染物<sup>[14]</sup>。因此,通过减流减沙能够有效控制污染物质迁移,既从源头又从过程上对面源污染进行双重拦截,因时制宜、精准规划和布局水土保持措施对流域综合治理具有深远意义。

## 4 结论

(1) 植被措施中,卷柏减流减沙效果最好,其减流率和减沙率分别为60.58%,84.77%;工程措施中,水平阶减流减沙效果最好,其减流减沙率分别为77.66%,

94.84%；覆膜后的鱼鳞坑减沙效果较未覆膜的更好；组合措施中，椰丝毯与植被组合处理的减流减沙效果更好，减流率达到90%以上，减沙率接近100%。

(2) 植被措施中，卷柏总氮、氨氮、总磷、COD削减效果最好，其削减率分别为89.07%、87.27%、89.46%、84.82%；工程措施中，水平阶总氮、氨氮、总磷、COD削减效果最好，其削减率分别为90.96%、93.40%、95.51%、94.13%；组合措施中，椰丝毯与植被组合处理的面源污染削减效果更好，削减率均能达到98%以上。

(3) 总氮、氨氮、总磷、COD削减率和减流减沙率呈显著的幂函数关系( $p < 0.05$ )，随减流减沙率的提高，面源污染削减率也更好。具体到措施上来看，植被与工程组合措施在协调减流与减沙方面表现更均衡。因此，综合考虑水土流失和面源污染防治效果，卷柏+椰丝毯预期表现会更好，且卷柏作为当地原生植被经济成本更低，但若考虑施工难度等问题，卷柏+水平阶为最优治理措施。

以上研究结果可为北京市密云区板栗林地选择既能达到治理水土流失和面源污染效果，又能改善农业生态环境，增加农民经济收益的措施提供科学依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 朱凯航,陈磊,王怡雯,等.分布式水土流失型面源污染模型初探[J].农业环境科学学报,2022,41(11):2382-2394.  
Zhu K H, Chen L, Wang Y W, et al. Preliminary study on distributed erosion-type non-point source pollution model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(11):2382-2394.
- [2] 伍冰晨,陈晓安,汤崇军,等.红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施响应[J].水利学报,2024,55(7):802-814.  
Wu B C, Chen X A, Tang C J, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(7):802-814.
- [3] Tan C J, Cao X, Yuan S, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil nutrients in sloping fields in regions characterized by water and wind erosion[J]. Scientific Reports, 2015, 5:17592.
- [4] 晏世杰,段剑,沈发兴,等.套种药材对红壤坡地幼龄油茶园产流产沙及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):70-78.  
Yan S J, Duan J, Shen F X, et al. Effects of interplanting medicinal herbs on runoff, sediment and nitrogen and phosphorus losses in young oil tea plantation on red soil sloping field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):70-78.
- [5] 向珊珊,李金柱,晏绍良,等.大别山区低山丘陵板栗林药套种对小气候和土壤性质的影响[J].中南林业科技大学学报,2018,38(3):82-87.  
Xiang S S, Li J Z, Yan S L, et al. Microclimate and soil property effects of Chinese chestnut-traditional Chinese medicine interplanting in hilly regions of Dabie mountain area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(3):82-87.
- [6] 杨润泽,肖辉杰,冯天骄,等.密云水库周边板栗林下不同水土保持措施效益评价[J].水土保持研究,2022,29(6):28-35.  
Yang R Z, Xiao H J, Feng T J, et al. Evaluation on benefits of different soil and water conservation measures under *Castanea mollissima* Bl. forest around Miyun Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6):28-35.
- [7] 庞珑瑾,袁增伟.平原河网区降雨径流污染负荷测算:以太湖流域望虞河西岸为例[J].湖泊科学,2021,33(2):439-448.  
Pang Y J, Yuan Z W. Quantification of pollutants in rainfall-runoff in plain areas with dense river networks: a case study in the western bank of Wangyu River, Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2):439-448.
- [8] 张蒙,胡桂清,张文太,等.长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J].水土保持研究,2024,31(5):164-172.  
Zhang M, Hu G Q, Zhang W T, et al. Effect of long-term vegetation coverage on runoff and sediment reducing ability of purple soil slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5):164-172.
- [9] 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.
- [10] 张萌,关红杰,王若水,等.水土保持措施对密云板栗林坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):130-136.  
Zhang M, Guan H J, Wang R S, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield on slopes of Miyun chestnut forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):130-136.
- [11] Kong D X, Miao C Y, Gou J J, et al. Sediment reduction in the middle Yellow River basin over the past six decades: attribution, sustainability, and implications[J]. Science of the Total Environment, 2023, 882:163475.
- [12] Li J L, He H B, Zeng Q H, et al. A Chinese soil conservation dataset preventing soil water erosion from 1992 to 2019[J]. Scientific Data, 2023, 10:319.
- [13] Li W Y, Ye J P, Guo X P, et al. Effects of ecological restoration modes on runoff and erosion reduction and

- vegetation restoration of waste dump slopes in Lingwu [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(4): 822-832.
- [14] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5067-5077.
- Ren K M, Wei W, Zhao X N, et al. Simulation of the effects of level bench terraces on water erosion reduction in the Loess Plateau based on the WEPP model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5067-5077.
- [15] 薛东明, 郭小平, 张晓霞. 干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 15-21, 30.
- Xue D M, Guo X P, Zhang X X. Runoff and sediment reduction under different slope ecological restoration modes of waste dump in arid mining area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 15-21, 30.
- [16] 李晓原, 张文太, 李建贵, 等. 伊犁河谷5种土壤管理措施减流减沙效果分析[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(3): 51-57.
- Li X Y, Zhang W T, Li J G, et al. Effects of five soil management measures on runoff and sediment reduction in Ili Valley of Xinjiang [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(3): 51-57.
- [17] 王玥欢, 颜婷燕, 魏商, 等. 密云水库上游侵蚀性降雨特征及水保措施对坡面水土流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3): 45-54.
- Wang Y H, Yan T Y, Wei S, et al. Characteristics of erosive rainfall and the impact of soil and water conservation measures on soil and water loss in the upper reaches of Miyun Reservoir, China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 45-54.
- [18] Zhao J L, Yang Z Q, Govers G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: evidence from erosion plot data [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 729-741.
- [19] 赵泽坤, 史明昌, 杨润泽, 等. 暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2): 43-51.
- Zhao Z K, Shi M C, Yang R Z, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and soil loss in sloping area under heavy rainfall conditions [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2): 43-51.
- [20] 单立楠, 丁能飞, 王洪才, 等. 蔬菜地面源污染生态拦截系统与效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 168-178.
- Shan L N, Ding N F, Wang H C, et al. Effect of ecological interception system in reducing non-point source pollution from vegetable fields [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(20): 168-178.
- [21] Wu J Q, Xiong L J, Sha C Y. Removal of N, P from seepage and runoff by different vegetated and slope buffer strips [J]. *Water Science and Technology*, 2020, 82(2): 351-363.
- [22] 史中奇, 王猛, 谭军, 等. 植被缓冲带对乌梁素海区域农业面源污染的削减效果[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 51-56.
- Shi Z Q, Wang M, Tan J, et al. Effect of vegetation buffer zone on reducing agricultural non-point pollution in Wuliangsu Hai Lake basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 51-56.
- [23] 李凯, 程金花, 祁生林. 永定河流域(北京段)不同生态护岸形式坡面侵蚀及面源污染特征[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(1): 74-83.
- Li K, Cheng J H, Qi S L. Characteristics of slope erosion and non-point source pollution in different ecological revetment in Yongding River Basin (Beijing section) [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(1): 74-83.
- [24] 孙棋棋, 张春平, 于兴修, 等. 中国农业面源污染最佳管理措施研究进展[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 772-778.
- Sun Q Q, Zhang C P, Yu X X, et al. Best management practices of agricultural non-point source pollution in China: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 772-778.
- [25] 汪栩志, 张克强, 沈修卿, 等. 基于SWAT模型的洱海流域面源污染最佳管理措施研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(2): 240-251.
- Wang X Z, Zhang K Q, Shen X Q, et al. Simulation of the best management practices for agricultural non-point source pollution in the Erhai Lake Basin based on SWAT model [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(2): 240-251.
- [26] 杨任翔, 邱凡, 郑佳舜, 等. 赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 904-913.
- Yang R X, Qiu F, Zheng J S, et al. Characteristics of runoff and the dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 904-913.
- [27] 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.
- [28] 张旭琳, 张梓涵, 尹高飞, 等. 农田氮磷流失与沟渠输移转化过程及影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(10): 1278-1286.
- Zhang X L, Zhang Z H, Yin G F, et al. The process and factors of nitrogen and phosphorus loss from farmland and transport in ditch [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(10): 1278-1286.