

DOI: 10.11766/trxb202501100021

CSTR: 32215.14.trxb202501100021

武英杰, 王美艳, 徐江兵, 解鹏, 马瑞, 田芷源, 梁音. 基于 Meta 分析的东北黑土坡耕地水土保持措施效益研究[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1665–1679.

WU Yingjie, WANG Meiyang, XU Jiangbing, XIE Peng, MA Rui, TIAN Zhiyuan, LIANG Yin. Meta-analysis Study on the Effectiveness of Soil and Water Conservation Measures on Sloping Black Soil Farmlands in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1665–1679.

基于 Meta 分析的东北黑土坡耕地水土保持措施效益研究*

武英杰^{1, 2}, 王美艳^{2†}, 徐江兵¹, 解鹏², 马瑞², 田芷源², 梁音²

(1. 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044; 2. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘要: 东北黑土区是中国粮食生产的重要基地, 受自然和人为因素的影响存在严重的水土流失。目前国内外学者开展了许多水土保持措施的研究, 但不同水土保持措施的综合效益及其适用性评价还较缺乏。基于此, 本研究收集了 2000—2023 年间有关东北黑土坡面侵蚀已发表的 59 篇文献(共 414 组研究数据), 利用 Meta 分析方法, 综合评估了 18 种水土保持措施对坡面径流和泥沙量的阻控效益及其对坡度、土壤类型的响应, 并评价了不同措施的适用性与有效性。结果表明: 所有水土保持措施对黑土坡耕地径流和泥沙的平均阻控效率分别为 63.1% 和 73.2%, 组合措施的平均效益优于单一措施。除生物质炭改良(Bi)和掺沙(As)措施外, 其他措施对减少径流与泥沙均呈现显著效应, 其中垄间竹节壕(Bt)的减流减沙效果最佳(98.9% 和 99.9%), 其次为深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田(SSR)的组合措施(92.4% 和 99.4%)。水土保持措施的阻控效益对坡度和土壤类型响应显著, 4°~6° 水土保持措施的平均阻控效益最高(减流效率: 66.4%, 减沙效率: 80.6%); 暗棕壤的减流效益最显著(78.7%), 黑钙土的减沙效果最佳(96.4%); 中坡段 7°~9° 的减流减沙效率的协同关系更为一致。基于径流泥沙相对减少评价指数(Relatively Reduced Evaluation Index, RREI), 从水土保持效益角度可优选地埂植物带(Rp)等 6 种高效水保措施; 但从水土保持和社会经济可行性双重维度考虑, 东北黑土坡耕地优先推广垄间竹节壕(Bt)等 3 种措施。本研究为东北黑土区坡耕地侵蚀治理的精准施策提供了理论支撑。

关键词: 黑土; 坡耕地; 水土保持措施; 径流; 泥沙; Meta 分析

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Meta-analysis Study on the Effectiveness of Soil and Water Conservation Measures on Sloping Black Soil Farmlands in Northeast China

WU Yingjie^{1, 2}, WANG Meiyang^{2†}, XU Jiangbing¹, XIE Peng², MA Rui², TIAN Zhiyuan², LIANG Yin²

(1. School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28010202)和国家重点研发计划项目(2024YFD1501101)资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA28010202) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFD1501101)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mywang@issas.ac.cn

作者简介: 武英杰(2000—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wuyingjie23@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2025-01-10; 收到修改稿日期: 2025-04-28; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-24

Abstract: 【 Objective 】 The Northeast Black Soil Region, a vital grain production base in China, suffers from serious soil erosion due to natural and anthropogenic factors. Numerous studies on soil and water conservation measures have been conducted by scholars both domestically and internationally. However, most existing research focuses on evaluating either specific regions or individual measures, while lacking a comprehensive assessment of both the combined benefits and practical applicability of different conservation approaches. 【 Method 】 We collected 414 sets of research data from 59 published papers on slope erosion of northeastern black soils during 2000-2023 and conducted a comprehensive meta-analysis to evaluate the efficacy of 18 soil and water conservation measures. Our analysis focused on their capacity to mitigate slope runoff and sediment, while examining their responsiveness to variations in slope gradient and soil characteristics. Furthermore, we assessed the regional applicability of these conservation measures based on their performance across different environmental conditions. 【 Result 】 The analysis revealed that soil and water conservation measures demonstrated substantial effectiveness on black soil slope cultivated land, with average control efficiencies of 63.1% for runoff reduction and 73.2% for sediment control. Integrated measures consistently outperformed individual interventions in terms of overall effectiveness. Among the evaluated measures, all except biochar improvement (Bi) and adding sand (As) demonstrated statistically significant impacts on both runoff and sediment reduction. Particularly noteworthy was the performance of bamboo trenches between ridges (Bt), which achieved exceptional control efficiencies of 98.9% for runoff and 99.9% for sediment reduction. This was closely followed by the combined approach of subsoiling tillage + straw mulching + ridge-furrow intervals (SSR), which yielded control efficiencies of 92.4% and 99.4% for runoff and sediment, respectively. The effectiveness of these conservation measures showed significant spatial variability, being strongly influenced by slope gradient and soil characteristics. Optimal performance was observed on slopes ranging from 4°-6°, where average control efficiencies reached 66.4% for runoff reduction and 80.6% for sediment control. Soil-specific analysis indicated that dark brown forest soil exhibited the highest runoff reduction capacity (78.7%) while chernozem demonstrated superior sediment retention properties (96.4%). Furthermore, the most consistent synergistic relationship between runoff and sediment reduction efficiencies was identified in mid-slope sections with gradients of 7°-9°, suggesting an optimal range for implementing these conservation measures. 【 Conclusion 】 This study evaluates the applicability of various soil and water conservation measures for Northeast China's black soil region, based on their effectiveness in reducing runoff and sediment yield. Based on the Relatively Reduced Evaluation Index (RREI) for runoff and sediment, ridge plant belt (Rp) and five other highly effective water conservation measures were prioritized for implementation from a soil and water conservation perspective. For comprehensive consideration of both conservation effectiveness and socio-economic feasibility, three measures; bamboo trenches between ridges (Bt), no-tillage + straw mulching (NTS), and subsoiling tillage + straw mulching + ridge-furrow intervals (SSR), are recommended as priority conservation practices for cultivated slopes in Northeast China's black soil region. Future research on soil and water conservation measures should simultaneously consider their long-term ecological benefits, economic viability, and social acceptability, as these factors are critical for ensuring the sustainable implementation of such conservation practices.

Key words: Black soil; Slope farmland; Soil and water conservation measures; Runoff; Sediment; Meta-analysis

东北黑土区是我国粮食生产的重要基地^[1]。长期以来,受漫川漫岗地形、季节性集中强降雨及高强度农业开发等因素影响,该区水力侵蚀广泛发生^[2],其中以坡面侵蚀和沟道侵蚀最为突出^[3]。在众多水力侵蚀类型中,坡面侵蚀尤为关键,不仅导致地表土层变薄、土壤肥力下降^[4],还为沟道侵蚀的发生创造了条件。随着坡面侵蚀的加剧,分散的地表径流逐渐汇集,当坡面径流集中度超过地表抗蚀临界值时(如细沟发育后),水流切割作用将直接诱发切

沟等侵蚀沟形态^[5],直接威胁农业生产的可持续性与区域生态环境的稳定性^[6]。坡耕地是黑土区水土流失的主要策源地,坡耕地水土流失面积占黑土区水土流失总面积的 46.4%^[7],治理黑土坡耕地坡面侵蚀,遏制黑土资源退化,对保障国家粮食安全具有重要意义。

早在 20 世纪 50—60 年代,众多学者就已经关注了坡耕地治理。这一时期,陈景岚^[8]提出,通过修建梯田,可以有效减少坡面径流,降低土壤侵蚀

程度；在一些易侵蚀区域，开始大规模种植树木和草本植物^[9]，以固定土壤，防止进一步侵蚀。20 世纪 80—90 年代，随着工程技术的进步，拦沙坝、鱼鳞坑等更为复杂的工程措施开始逐渐被应用，这些措施不仅减少了土壤流失，还改善了局部水文条件^[10]。进入 21 世纪以来，黑土区土壤侵蚀与水土保持逐步受到关注^[11]。过去二十余年间，国家先后启动了东北黑土区水土流失综合防治试点工程、黑土坡面水土流失综合治理技术、黑土侵蚀防治机制与调控技术等重大项目，形成了系列效果显著的水土保持技术体系^[5]，在地埂植物带、保护性耕作、水平梯田和秸秆覆盖等坡面侵蚀治理措施方面取得了丰硕的成果^[12-18]。然而，现有研究多集中于特定区域或单一措施的评估，缺乏对多种措施在区域尺度上的综合效益评估^[19]。

近年来，Meta 分析作为研究整合的有效工具^[20]，已在全球、国家和区域尺度的水土保持措施效益评估研究中发挥了其优势。如，Xiong 等^[21]研究发现全球尺度的水土保持措施可减少 53% 的径流量和 84% 的土壤侵蚀量，且巴西和坦桑尼亚地区的阻控效果优于中国、美国和欧洲。Wei 等^[16]通过 Meta 分析研究发现全球尺度梯田措施的减沙效果（效益比值： 11.46 ± 2.34 ）优于减流效果（效益比值： 2.60 ± 1.79 ）。Jia 等^[22]通过对中国保护性耕作的水土保持效率研究发现，保护性耕作在西北黄土高原地区减流减沙效率均为最低（减流效率：17.5%，减沙效率：37.6%），西南喀斯特地区减流效率最高（80.1%），华北山区减沙效率最高（63.1%）。Chen 等^[23]整合南方红壤丘陵区水土保持措施效率，研究发现其径流量和泥沙量综合阻控效果分别为 73% 和 92%。这些研究凸显了地理环境特异性对措施效益的显著影响。东北黑土区具有独特的气候、地形与土壤特性，针对区域主要水土保持措施进行综合效益评估，定量区域适用性指标，对选择适宜的水土保持措施并优化其推广应用具有重要意义。

本研究整合 2000—2023 年间有关东北黑土坡耕地坡面侵蚀的研究成果，采用 Meta 分析方法，旨在解决三个关键问题：（1）量化主要水土保持措施对径流泥沙的阻控效率；（2）解析坡度、土壤类型等环境因子对措施效益的调控作用；（3）定量区域适用性指标，建立基于多准则决策的区域适用性水

土保持措施优选方案。研究结果可为东北黑土区坡耕地侵蚀治理精准施策提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 文献检索与数据提取

本文利用 Web of Science (<http://www.webofknowledge.com>)、中国知网 (<https://www.cnki.net>)、万方和维普等中英文数据库，通过输入“土壤侵蚀(soil erosion)或水土流失(soil and water loss)或水土保持(soil and water conservation)或径流(runoff)或泥沙沉积物(sediment)或埂带植物(ridge plant)或免耕(no tillage)或秸秆还田(straw return)或秸秆覆盖(straw mulching)”和“中国东北(northeast China)或黑土(Black soil/Mollisols)”等关键词，检索了 2000 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日间发表的有关东北黑土坡耕地坡面侵蚀的水土保持措施相关文献，进行 Meta 分析。

为确保数据质量并减少偏差，选择符合以下筛选条件的文献纳入分析：（1）研究区位于东北黑土区；（2）试验类型为田间试验，且包含实施水土保持措施的处理组与未实施水土保持措施的对照组；（3）提供至少一组径流量或泥沙量的数据；（4）对照组和处理组的试验在相同地点、相同环境条件下进行；（5）数据记录清晰，包含处理组和对照组的平均值、标准差(SD)或标准误(SE)及重复次数，可从文中直接提取，或通过 GetData Graph Digitizer 2.22 软件提取。

1.2 数据整理与分类

基于上述筛选标准，剔除试验时间、地点和试验结果数据相同的文献，保留相同试验地点不同试验年限的数据。最终得到符合标准的 59 篇文献，包含 414 组数据观测值（表 1）。根据 Maetens 等^[24]的分类方法将水土保持措施分为三类：生物措施(BM)、工程措施(EM)和耕作措施(TM)。

1.3 效益评价指标计算

本研究采用以下 3 个公式计算径流减少效率(RRE)、泥沙减少效率(SRE)和径流泥沙减少效率比(RRS)^[25]。

$$RRE = \frac{R_c - R_t}{R_c} \times 100\% \quad (1)$$

表 1 纳入 Meta 分析的数据分类与统计情况

Table 1 Classification and statistics of the data included in the meta-analysis

措施类型	措施	说明	数据对
Type of measures	Treatment	Description	Data pair
生物措施 BM	地埂植物带 Rp	修筑地埂, 栽植经济作物	82
Biological measures	秸秆粉碎深还 Sc	翻耕, 秸秆粉碎还田	34
	秸秆覆盖 Sm	秸秆全量覆盖还田	23
	植物篱 Hd	移栽灌木植物, 修筑植物篱	8
工程措施 EM	掺沙 As	掺沙改良土壤结构	14
Engineering measures	垄向区田 Rf	在垄沟中隔一定距离修筑小土垱	30
	生物质炭改良 Bi	连续施加生物质炭改良土壤	17
	鼠洞+暗管 Sp	模拟鼠洞埋设于地下与暗管相接导出径流	4
	水平梯田 Ht	平整土地, 修筑水平梯田	21
	垄间竹节壕 Bt	沿垄沟方向间隔布设, 两相邻竹节壕之间形成蓄水沟	6
耕作措施 TM	横坡垄作 Ct	改顺坡垄作为横坡垄作	104
Tillage measures	免耕 Nt	不翻动土壤, 直接播种	10
	深松 St	深松土壤, 一般为 25~30 cm	7
	无垄作 Nr	不起垄, 直接播种	6
生物措施+耕作措施 BM + TM	横坡垄作 + 地埂植物带 CR	组合措施	17
	免耕+秸秆覆盖 NTS	组合措施	18
生物措施+工程措施+耕作措施 BM + EM + TM	深松+秸秆覆盖 STM	组合措施	7
	深松+秸秆覆盖+垄向区田 SSR	组合措施	6

注: BM: 生物措施; EM: 工程措施; TM: 耕作措施; Rp: 地埂植物带; Sc: 秸秆粉碎深还; Sm: 秸秆覆盖; Hd: 植物篱; As: 掺沙; Rf: 垄向区田; Bi: 生物质炭改良; Sp: 鼠洞+暗管; Ht: 水平梯田; Bt: 垄间竹节壕; Ct: 横坡垄作; Nt: 免耕; St: 深松; Nr: 无垄作; CR: 横坡垄作 + 地埂植物带; NTS: 免耕 + 秸秆覆盖; STM: 深松 + 秸秆覆盖; SSR: 深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田。下同。Note: BM: Biological measures; EM: Engineering measures; TM: Tillage measures; Rp: ridge plant belt; Sc: straw crushing and returning; Sm: straw mulching; Hd: hedgerow; As: adding sand; Rf: ridge-furrow intervals; Bi: biochar improvement; Sp: mousehole + drainage pipes; Ht: horizontal terracing; Bt: bamboo trenches between ridges; Ct: counter tillage; Nr: no-tillage; St: subsoiling tillage; Nr: no ridge cropping; CR: counter tillage + ridge plant belt; NTS: no-tillage + straw mulching; STM: subsoiling tillage + straw mulching; SSR: subsoiling tillage + straw mulching + ridge-furrow intervals. The same below.

$$SRE = \frac{S_c - S_t}{S_c} \times 100\% \quad (2)$$

高于泥沙减少效率; $RRS < 1$, 则表明减沙效率高于减流效率。

$$RRS = \frac{RRE}{SRE} \times 100\% \quad (3)$$

采用径流泥沙相对减少评价指数 (Relatively reduced evaluation index, RREI), 综合评价东北黑土坡耕地面蚀水保措施的有效性^[22], 以筛选适用于治理东北黑土坡耕地面蚀最有效的水土保持措施, 计算公式如下:

$$RREI_r = \frac{RRE}{ROE_r} \quad (4)$$

式中, R_c 和 R_t 分别为未实施水土保持措施与实施水土保持措施的径流量, S_c 和 S_t 分别为未实施水土保持措施与实施水土保持措施的泥沙量。RRE 和 SRE 值越高, 代表水土保持措施减少径流和泥沙的效率越高; $RRS > 1$, 表明水土保持措施的径流减少效率

$$RREI_s = \frac{SRE}{ROE_s} \quad (5)$$

式中, ROE_r 和 ROE_s 分别表示东北黑土坡耕地水保措施的整体减流效率和整体减沙效率。若 $RREI < 0$, 表明该水土保持措施对本地区的减流减沙效益为负; 若 $0 < RREI < 1$, 表明该水土保持措施的有效性低于本地区的平均水平, 则该措施不推荐为本地区水土保持的有效措施; 若 $RREI > 1$, 说明该水土保持措施的有效性高于本地区平均水平。当径流量和泥沙量的 $RREI$ 均 > 1 时, 则认为该措施可作为本区域较为适用的水土保持措施。

1.4 Meta 分析

本研究采用 OpenMEE 软件^[26]进行 Meta 分析, 选择自然对数响应比为效应值 (log-response ratio, $\ln R$), 计算公式如下:

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (6)$$

$$V = \frac{SD_t^2}{N_t X_t^2} + \frac{SD_c^2}{N_c X_c^2} \quad (7)$$

式中, X_t 和 X_c 分别表示处理组和对照组的平均径流量或泥沙量; SD_t 和 SD_c 分别表示处理组和对照组的方差; N_t 和 N_c 分别表示处理组和对照组的重复次数。各效应值 ($\ln R$) 的权重 (W) 为其方差 (V) 的倒数, 计算公式如下:

$$W = \frac{1}{V} \quad (8)$$

通过这种方法, 方差较小的研究案例将被赋予更高的权重计算其效应值, 从而提高了各效应值的精确性。采用随机效应模型和自举法 (bootstrap)^[27-28] 计算每个处理的加权平均效应值 (Average effect size, LRR) 和 95% 的置信区间 (95% confidence interval, 95%CI)。LRR 计算公式如下:

$$LRR = \frac{\sum_{i=1}^k \ln R_i W_i}{\sum_{i=1}^k W_i} \quad (9)$$

式中, $\ln R_i$ 和 W_i 是各研究案例的效应值及其所对应

的权重, k 为研究案例的数量。

若置信区间不包含 0, 说明水土保持措施对径流量和泥沙量产生了显著影响; 若置信区间包含 0, 则说明无显著影响; 若置信区间小于 0, 说明水土保持措施减少了径流量或泥沙量; 若置信区间大于 0, 则说明水土保持措施增加了径流量或泥沙量。

为了方便描述和理解, 将 LRR 转化为百分比, 计算公式如下:

$$\text{变化百分比}(\%) = (1 - \exp^{LRR}) \times 100\% \quad (10)$$

2 结果

2.1 水土保持措施减少径流及阻控侵蚀的效益

东北黑土坡耕地治理坡面侵蚀实施的水土保持措施可分为以下几类: 生物措施、工程措施、耕作措施、生物措施 + 耕作措施和生物措施 + 工程措施 + 耕作措施 (图 1)。综合效应评价结果表明, 水土保持措施对径流和泥沙量的总体效应值均为负值 (径流量: $LRR = -1.48$, 泥沙量: $LRR = -2.29$), 说明水保措施对黑土坡耕地径流与泥沙均表现为减少效益, 且对泥沙的阻控效益要强于径流, 径流与泥沙的平均阻控效率分别为 63.1% 和 73.2%。

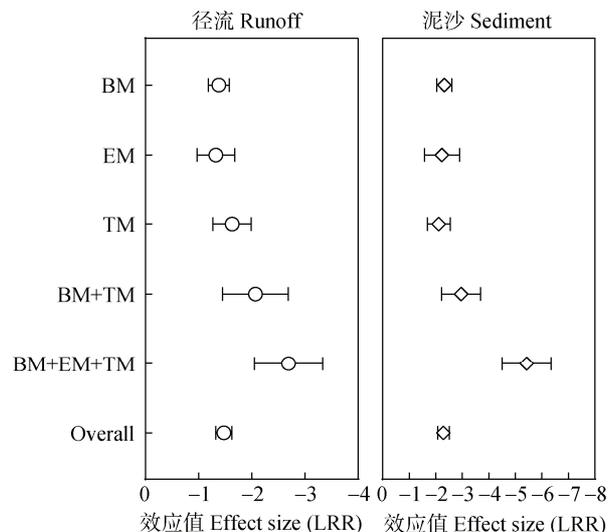


图 1 生物措施 (BM)、工程措施 (EM) 和耕作措施 (TM) 径流和泥沙减少效应

Fig. 1 Reducing effects of biological measures (BM), engineering measures (EM) and tillage measures (TM) on runoff and sediment

不同类型措施组合的水土保持效益往往优于单一类型措施，其中生物措施 + 工程措施 + 耕作措施的径流和泥沙量减少效应最显著，径流与泥沙减少率分别达到 92.4%和 99.4%，远高于生物措施 + 耕作措施（减流效率：80.6%，减沙效率：89.2%）、耕作措施（减流效率：65.8%，减沙效率：70.2%）。

不同水土保持措施减流减沙效应存在显著差异（图 2）。在生物措施下，地埂植物带（Rp）、植物篱和秸秆覆盖的减流效果均较显著，减流效率分别为 77.5%、62.6%和 61.4%，而秸秆粉碎深还的减流效率仅为 36.4%。工程措施类型中，各措施减流效益差异较大，垄间竹节壕的减流效果最好，减少率达到 98.9%，而生物质炭改良的减流效果最差，仅为 9.80%。其中水平梯田和垄向区田占比达到了东北黑土坡耕地面蚀水土保持工程措施研究总量的 55.4%，减流效率也较高，分别为 82.8%和 70.2%。耕作措施中，横坡垄作措施减流效果最佳，达到 70.5%，显著优于无垄作（59.7%）、免耕（52.6%）和深松（29.4%）等措施。在组合措施（BM + TM

和 BM + EM + TM)类型中,深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田减流的效果最佳,达到 92.4%,较深松、秸秆覆盖和垄向区田单一措施的减流效率分别提高了 63.0%、31.0%和 22.2%。

在土壤侵蚀的阻控效果方面，除工程措施中的生物质炭改良和掺沙措施外，其他 16 种水土保持措施均呈现显著的泥沙阻控效益。其中 6 种措施表现尤为突出（减沙率>92%）：水平梯田、鼠洞 + 暗管、免耕 + 秸秆覆盖、横坡垄作 + 地埂植物带、深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田和垄间竹节壕；其次，植物篱、地埂植物带、免耕、横坡垄作、深松 + 秸秆覆盖、秸秆覆盖和垄向区田减沙效果较好，泥沙减少效率为 73.2%~85.8%。相比之下，无垄作（66.2%）、秸秆粉碎深还（57.7%）、深松（43.7%）减沙效益显著低于区域平均水平（73.2%）。而生物质炭改良（1.62%）和掺沙措施则几乎无效，尤其是掺沙措施不仅未能减少泥沙量，反而导致泥沙量增加，减沙效率为负（-23.4%）。

2.2 水土保持措施效益对坡度与土壤类型的响应

不同坡度间，水土保持措施对径流和泥沙量效应存在显著差异（图 3a、图 3b）。4°~6°水土保持措施的平均阻控效益最高（减流效率：66.4%，减沙效率：80.6%）；其次为 7°~9°（减流效率：65.8%，减沙效率：77.9%）和 1°~3°（减流效率：60.8%，减沙效率：76.9%）；相比之下，10°~15°的减流减沙效果最差（减沙效率：74.9%），特别是减流效率仅为 54.9%。总体而言，>3°的坡耕地，水土保持效率随坡度增加而降低。分类比较发现（图 4a），不同类型水土保持措施效益对坡度的响应不同。其中生物措施的减流效果随坡度增加而增加，但土壤侵蚀阻控效益对坡度的响应不敏感，说明其区域适用范围较广；而工程措施在 1°~3°梯度范围减流减沙效应较低，说明其更适用于有一定坡度的区域；相反，耕作措施在低坡度（<9°）效益显著高于生物与工程措施，在高坡度段（10°~15°）效应显著降低。与单一类型措施相比，不同类型组合能减少单一措施对坡度的限制，显著提升了各坡度下的阻控效益。

不同土壤类型间水保措施的总体效应各不相同（图 3c、图 3d）。从减少径流量看，暗棕壤的径流量减少效应最显著（径流 LRR = -1.78；减流效率：78.7%），其次为黑土（径流 LRR = -1.39）、黑钙土

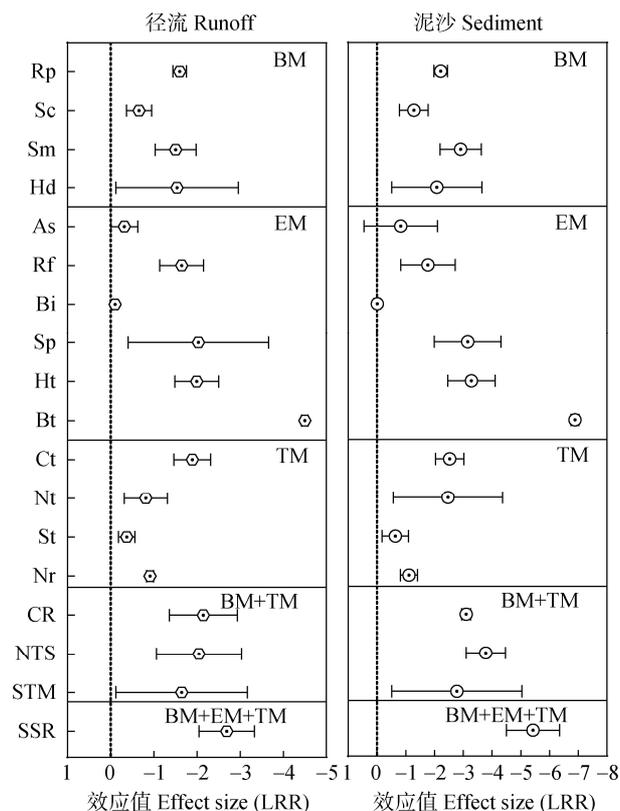


图 2 不同水土保持措施的减流减沙效应
Fig. 2 Runoff and sediment reductions resulting from different soil and water conservation measures

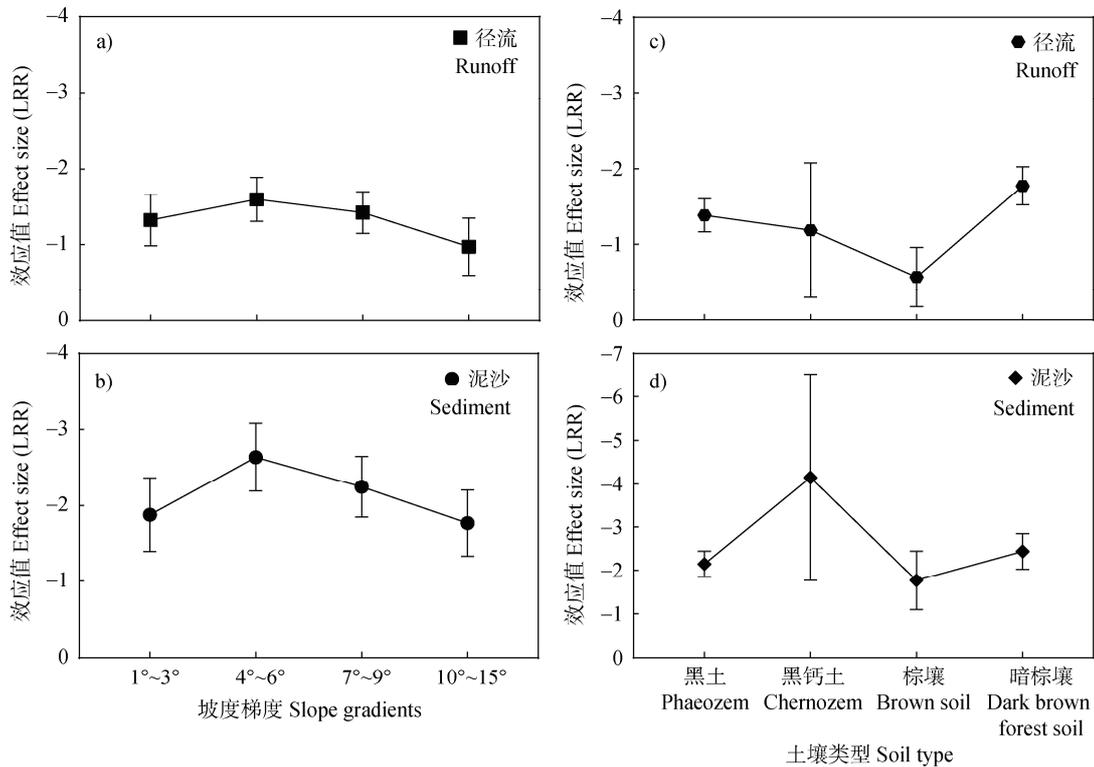


图3 水土保持措施在不同坡度梯度、土壤类型下的减流减沙效应

Fig. 3 Effect size of runoff and sediment reduction under different slope gradients and soil types of soil and water conservation measures

(径流 LRR = -1.19)，棕壤的减流效益最差，径流 LRR 仅为 -0.58，其减流效率为 39.6%。然而，由于黑钙土 LRR 的置信区间范围较广，其减流效率的波动幅度也较大。因此，黑钙土的平均减流效率 (57.6%) 略高于黑土 (56.8%)。泥沙阻控方面，黑钙土的减沙效果最佳(泥沙 LRR = -4.15; 减沙效率: 96.4%)，远高于暗棕壤 (泥沙 LRR = -2.44; 减沙效率: 87.4%)、黑土 (泥沙 LRR = -2.17; 减沙效率: 70.5%) 和棕壤 (泥沙 LRR = -1.77; 减沙效率: 66.4%)。

此外，从措施类型与土壤类型的耦合关系看 (图 4b)，生物措施、工程措施和生物措施 + 耕作措施在暗棕壤上的水土保持效果最佳，耕作措施在黑钙土上的减沙效应最显著。分类比较发现，生物措施和工程措施的减流效果对土壤类型的响应更显著，生物措施和工程措施在暗棕壤上的减流效率 (BM: 75.5%; EM: 93.1%) 显著高于黑土 (BM: 59.8%; EM: 31.9%) 和黑钙土 (BM: 43.1%; EM: 50.4%); 而耕作措施的减沙效果对土壤类型的响应更显著，耕作措施在黑钙土的减沙效率 (96.4%) 显

著高于黑土 (76.9%) 和棕壤 (46.4%)。

基于不同措施的数据分布情况，分析了 7 种主要水土保持措施在不同坡度及土壤类型中的效应分异 (图 5)。坡度 < 6° 时，地埂植物带、垄向区田和横坡垄作 3 种措施的减流效率随坡度增加而增加，而当坡度 > 3° 时，其减沙效率随坡度增加而降低。4°~6° 坡段，横坡垄作、免耕 + 秸秆覆盖和地埂植物带的减沙效果最显著 (减沙率 > 90%)。7°~9° 坡段，横坡垄作 + 地埂植物带组合措施的减流减沙效益较单一措施 (Ct 和 Rp) 显著增加，减流效率提升 3.1%，减沙效率提升 5.4% 和 5.8%。

从不同土壤类型看，黑土免耕 + 秸秆覆盖的减流减沙效果均为最佳，可减少 85.1% 的径流量和 97.7% 的泥沙量；秸秆粉碎深还的减流效果最差，减流效率仅为 40.9%；垄向区田的减沙效果最差，减沙效率为 75.1%。此外，地埂植物带在不同土壤类型上减流减沙效果差异显著，黑土的减流减沙效果最佳 (减流效率: 83.2%; 减沙效率: 90.7%)，优于暗棕壤 (减流效率: 75.8; 减沙效率: 86.3%) 和棕壤 (减沙效率: 83.0%)。

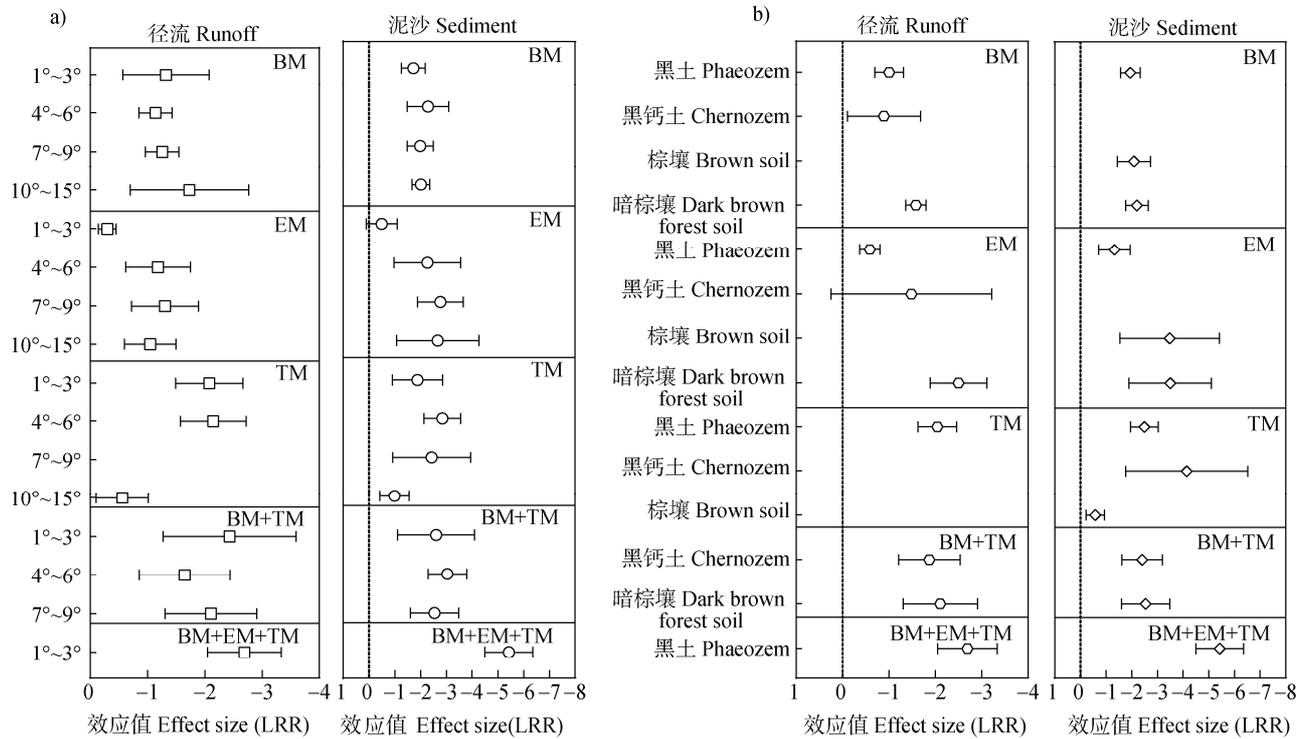


图 4 不同水土保持措施、坡度梯度及土壤类型耦合的减流减沙效应

Fig. 4 The coupled runoff and sediment reduction effects among different soil and water conservation measures, slope gradients, and soil types

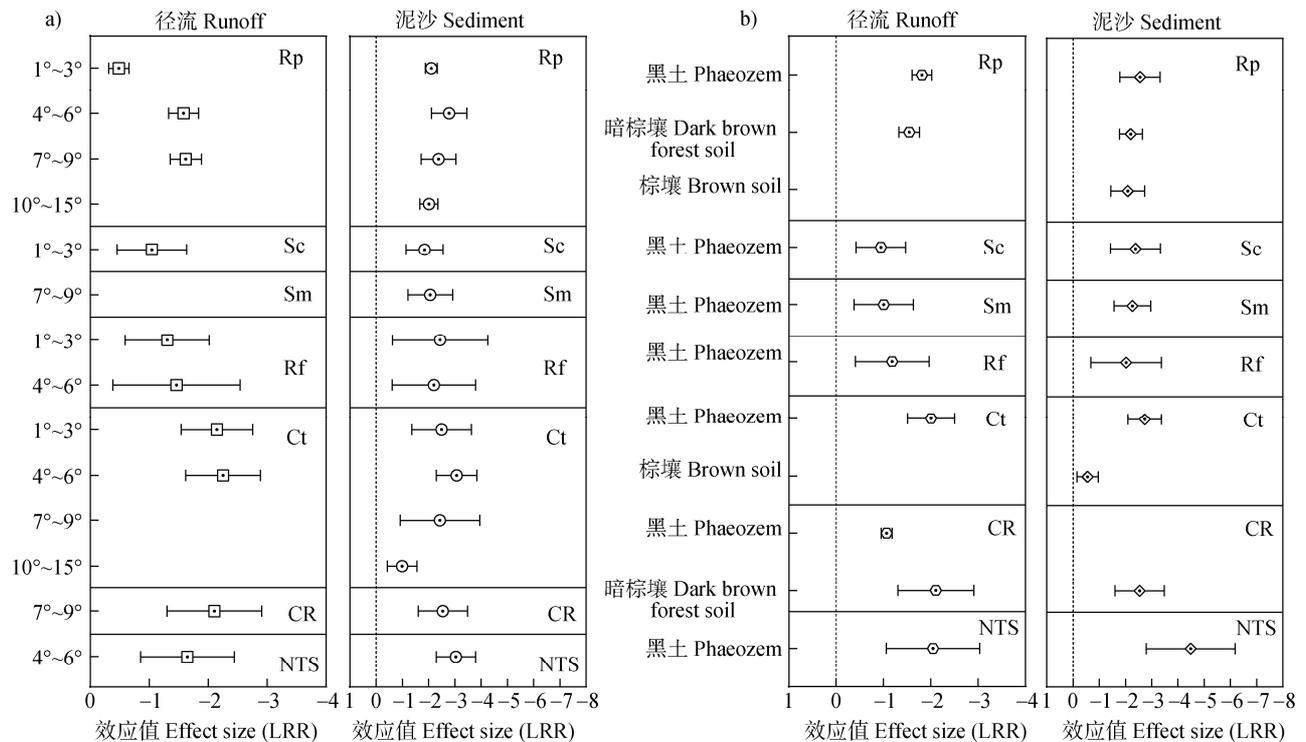


图 5 主要水土保持措施在不同坡度梯度及土壤类型下的减流减沙效应

Fig. 5 Effects of major soil and water conservation measures on runoff and sediment reduction under different slope gradients and soil types

2.3 水土保持措施调节径流与阻控侵蚀的效率关系

不同类型水土保持措施的径流和泥沙减少率均分布在 1 : 1 等分对角线上方 (图 6a), 表明水土保持措施对土壤侵蚀的阻控效益普遍高于径流调控, 未来水土保持措施需要注重提升径流拦截效率, 以提高降水资源的利用率。组合措施 (BM + TM 和 BM + EM + TM) 径流和泥沙减少率显著高于单一措

施 (BM、EM 和 TM) (图 6a), 但不同措施类型的减流减沙效率比有显著差异, 其中 TM 表现出最高的径流泥沙减少协同效率 (RRS = 0.94), 其次是 BM + EM + TM (0.93)、BM + TM (0.90)、EM (0.83) 和 BM (0.78) (图 6b)。

坡度与土壤类型影响水土保持措施效益的协同性。在不同坡度梯度下, 中坡段 7°~9°和 4°~6°不

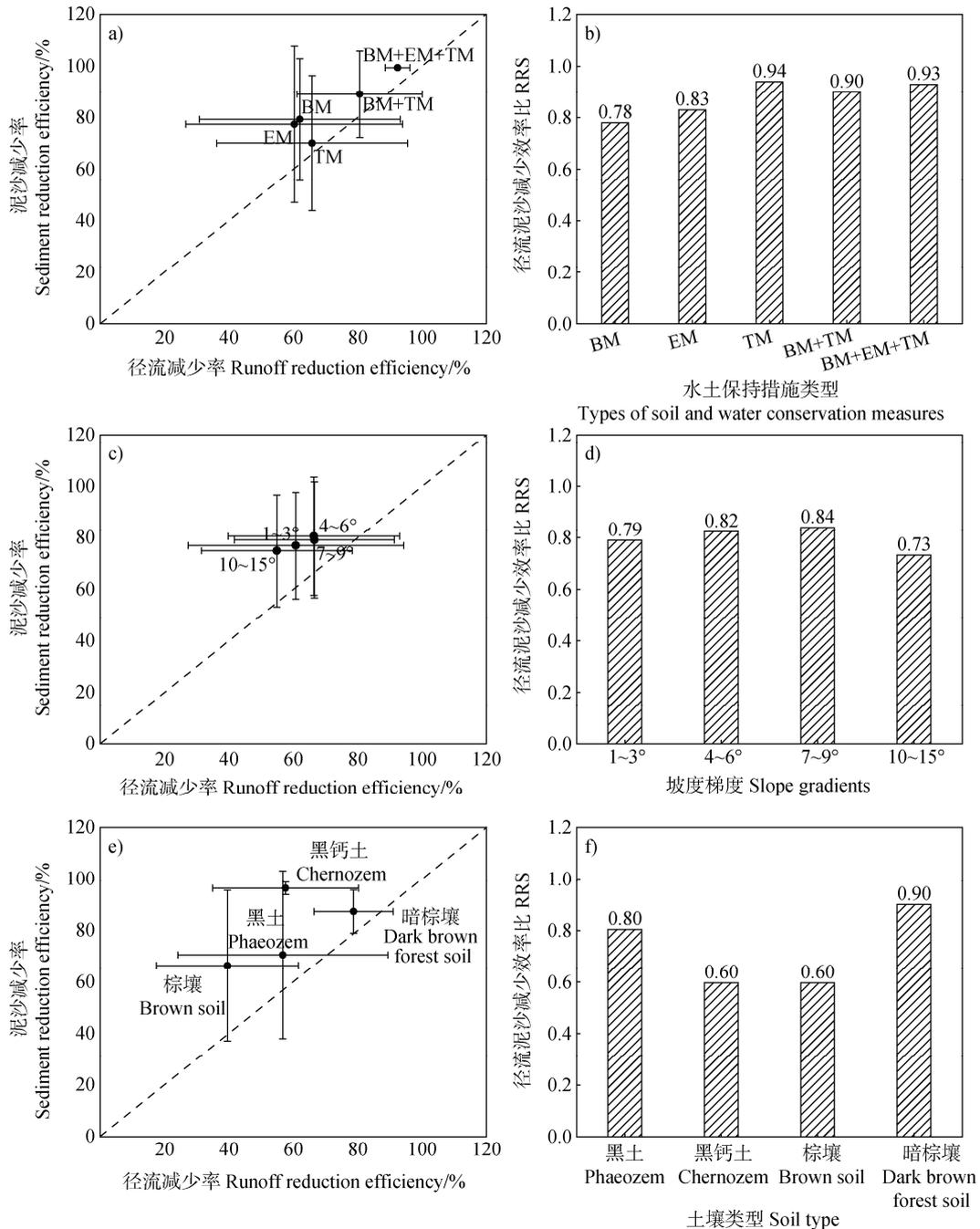


图 6 不同水土保持措施、坡度梯度及土壤类型下的减流减沙效率关系

Fig. 6 The benefit trade offs between runoff and sediment reduction for different soil and water conservation measures, slope gradients, and soil types

仅减流减沙效率较高,且 RRS 也分别达到 0.84 和 0.82,而低坡段 ($1^{\circ}\sim 3^{\circ}$) 和高坡段 ($10^{\circ}\sim 15^{\circ}$) 减流减沙效率相对较低,也降低了水土保持措施减流减沙的协同效率 ($RRS < 0.80$)。不同土壤类型下,暗棕壤具有最高径流减少率 (78.7%),其减流减沙的协同性最高 ($RRS = 0.90$);其次,黑土减流减沙的协同性也较高 ($RRS = 0.80$);相比之下,黑钙土虽然泥沙减少率最高 (96.4%),但其减流减沙的协同性较低 ($RRS = 0.60$);棕壤径流和泥沙的减少率均为最低 (减流效率: 39.8%, 减沙效率: 66.3%),减流减沙的协同性也较低 ($RRS = 0.60$)。说明在低、高坡度地形,以及黑钙土与棕壤类型分布区域,要重点调整水与土的协同保持。

2.4 不同水土保持措施的适用性评价

本研究采用径流泥沙 RREI,综合评价东北黑土坡耕地面蚀水保措施的有效性, $RREI > 1$ 说明该措

施的有效性高于本地区平均水平。当径流量和泥沙量的 RREI 均大于 1 时,则认为该措施可作为本区域较为适用的水土保持措施。

如表 2 所示,所有 18 种水土保持措施中,只有 6 种措施的径流相对减少评价指数 ($RREI_r$) 大于 1,分别为地埂植物带 (1.27 ± 0.16)、水平梯田 (1.36 ± 0.28)、垄间竹节壕 (1.62 ± 0)、横坡垄作 + 地埂植物带 (1.42 ± 0.12)、免耕 + 秸秆覆盖 (1.33 ± 0.21) 和深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田 (1.51 ± 0.06)。此外,有 7 种水土保持措施的泥沙相对减少评价指数 ($RREI_s$) 大于 1,包括地埂植物带 (1.19 ± 0.14)、鼠洞 + 暗管 (1.29 ± 0.07)、水平梯田 (1.29 ± 0.11)、垄间竹节壕 (1.39 ± 0)、横坡垄作 + 地埂植物带 (1.29 ± 0.03)、免耕 + 秸秆覆盖 (1.35 ± 0.01) 和深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田 (1.38 ± 0.01)。

表 2 不同水土保持措施径流和泥沙相对减少评价指数

Table 2 Runoff and sediment relatively reduced evaluation index (RREI) of different soil and water conservation measures

措施类型 Type of measures	措施 Treatment	$RREI_r$	$RREI_s$
生物措施 BM	地埂植物带 Rp	1.27 ± 0.16	1.19 ± 0.14
	秸秆粉碎深还 Sc	0.6 ± 0.49	0.8 ± 0.4
	秸秆覆盖 Sm	1.01 ± 0.5	1.16 ± 0.34
	植物篱 Hd	0.99 ± 0.7	1.17 ± 0.26
	掺沙 As	0.33 ± 0.54	-0.33 ± 1.75
工程措施 EM	垄向区田 Rf	1.15 ± 0.39	1.02 ± 0.33
	生物质炭改良 Bi	0.16 ± 0.1	0.02 ± 0.01
	鼠洞+暗管 Sp	1.16 ± 0.43	1.29 ± 0.07
	水平梯田 Ht	1.36 ± 0.28	1.29 ± 0.11
	垄间竹节壕 Bt	1.62 ± 0	1.39 ± 0
耕作措施 TM	横坡垄作 Ct	1.19 ± 0.47	1.07 ± 0.36
	免耕 Nt	0.86 ± 0.31	1.09 ± 0.36
	深松 St	0.48 ± 0.22	0.61 ± 0.24
	无垄作 Nr	0.98 ± 0.05	0.92 ± 0.11
	横坡垄作 + 地埂植物带 CR	1.42 ± 0.12	1.29 ± 0.03
生物措施+耕作措施 BM + TM	免耕+秸秆覆盖 NTS	1.33 ± 0.21	1.35 ± 0.01
	深松+秸秆覆盖 STM	1.11 ± 0.47	1.09 ± 0.38
生物措施+工程措施+耕作措施 BM + EM + TM	深松+秸秆覆盖 + 垄向区田 SSR	1.51 ± 0.06	1.38 ± 0.01

注:表中数据为平均值 \pm 标准差,下同。Note: The data in the table are means \pm SD. The same below.

综上所述, 径流和泥沙 RREI 均大于 1 的措施共有 6 种, 分别为地埂植物带、水平梯田、垄间竹节壕、横坡垄作 + 地埂植物带、免耕 + 秸秆覆盖和深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田。这些措施在东北黑土坡耕地坡面侵蚀的水土保持中表现出较高的适用性和有效性。因此, 从水土保持效益角度可优选地埂植物带等 6 种高效水保措施。

然而, 在水保措施实际实施过程中发现, 地埂植物带占据了一定的耕地面积, 导致农田可耕面积减少、农用机械有效作业幅宽缩减, 其已逐渐被摒弃; 水平梯田修筑效益较低, 东北黑土地微小高差难以形成有效梯级, 反而因田埂占地降低了连片耕作效率。因此, 从水土保持和社会经济可行性双重维度考虑, 东北黑土坡耕地可优先推广垄间竹节壕、免耕 + 秸秆覆盖和深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田 3 种措施。

3 讨论

3.1 水土保持效益及其差异性特征

本研究结果显示, 东北黑土坡耕地水土保持措施平均减少径流量为 63.1%、泥沙量为 73.2%, 其效益高于全国水平的 52% 和 70%^[19]。不同生态类型之间, 水土保持措施效益存在较大差异, 如黄土高原地区径流和泥沙减少率分别为 16.4% 和 32.4%^[29]; 相比之下, 南方红壤丘陵区水土保持效益更为显著^[23], 径流与泥沙减少率分别为 73% 和 92%, 这可能与各地区气候、地形差异及所采取的耕作措施不同有关^[23, 30]。Xiong 等^[21]指出全球尺度下生物措施的水土保持效益最高(减流效率: 55%, 减沙效率: 88%), 而 Zhao 等^[19]研究结果显示, 在全国尺度下, 工程措施较生物措施和耕作措施更为有效。本研究结果显示, 在东北黑土坡耕地, 与生物措施和耕作措施相比, 工程措施在水土保持效益上并无优势。我国工程措施的优势主要在黄土高原与南方红壤区等地形复杂类型区体现, 这也说明水土保持措施的区域适配性对提升其效益具有重要作用。

本研究结果表明, 坡度小于 6° 时, 水土保持措施的预期效果往往较为显著(图 3a), 但在生物措施和工程措施中结果却并不一致(图 4a)。先前的

一些研究也发现坡度对减少径流量和泥沙量的贡献并不一致, 如赵紫远等^[31]采用 WEPP 模型揭示了径流量在不同坡度、坡形下无明显差异, 产沙量在不同坡度、坡形上差异明显。然而, Maetens 等^[24]发现坡度与水土保持效益之间存在显著负相关关系。本研究发现坡度是影响水土保持措施应用的主要因素之一, 如 3°~5° 坡耕地通常采用地埂植物带、植物篱等措施控制水土流失, 水平梯田措施多被应用于 8° 以上的陡坡耕地, 这与刘卉芳等^[32]、Chen 等^[33]的研究结果一致。因此, 坡度、坡形与阻控侵蚀之间的关系可能还需要考虑水保措施类型的影响。

此外, 本研究结果显示, 东北黑土坡耕地面蚀水保措施在暗棕壤地块的减流效果最好, 而在黑钙土地块的减沙效果最好。这可能与土壤性质有关, 暗棕壤的有机质和腐殖质含量均高于黑钙土^[34-35], 能为作物生长提供更为有利的条件, 使其具有更高的覆盖度和更为密集根系, 从而提高土壤的抗蚀能力^[36], 减少地表径流量^[37]。

3.2 水土保持措施的减流减沙关系

长期以来, 水土保持措施一直被认为是保护土壤资源、维护生态环境的有效手段。Hu 等^[38]认为水力因素驱动的土壤侵蚀过程与地表径流量关系密切。通常情况下, 泥沙量会随着径流量的减少而减少, 但在不同环境条件下, 减少相同泥沙量所需要减少的径流量却并不相同^[19, 21]。本研究结果表明, 水土保持措施控制等量泥沙时, 控制的径流量越大, 其水土保持的减流减沙效率协同性就更佳。在不同坡度条件下, 中坡段 7°~9° 的 RRS 最高, 高坡段 10°~15° 的 RRS 最低, 表明与中坡段 7°~9° 地块相比, 高坡段 10°~15° 控制相同泥沙量所减少的径流量较少, 这与 Chen 等^[23]的研究结果相似。此外, 中坡段 7°~9° 和 4°~6° 地块径流量和泥沙量减少率之间的协同关系更为一致, 这可能是由于降雨对陡坡坡面冲刷强度更大^[39]及缓坡所采用的水土保持措施改变了减少径流与泥沙之间的关系所导致的^[40]。因此, 需要进一步研究水土保持措施调节径流与阻控侵蚀的协同作用关系。

3.3 东北黑土坡耕地治理面蚀适用的水土保持措施

基于径流泥沙相对减少评价指数, 东北黑土坡耕地适用地埂植物带、水平梯田、垄间竹节壕、横坡垄作 + 地埂植物带、免耕 + 秸秆覆盖和深松 +

秸秆覆盖 + 垄向区田措施阻控坡面侵蚀。

本研究中黑土坡耕地多为长缓坡, 地埂植物带和横坡垄作措施具有截断坡面径流^[12, 41]、降低侵蚀冲刷动能^[42]的作用, Liu 等^[43]的研究也表明横坡垄作在缓坡耕地的实施效果更好。水平梯田多在 8°以上的陡坡耕地上采用, 在此坡度条件下, 水平梯田将原斜坡面转化为相对平坦的坡面, 改变了原有的径流路径^[44], 因此, 陡坡地块水平梯田通常较缓坡地块的阻控效果更显著。垄向区田措施在坡度较小的田块阻控侵蚀效果较好, 垄间竹节壕措施的适用坡度则可以达到 8°以上, 这与于景龙等^[45]、牛晓乐等^[46]的研究结果相似。在东北黑土区, 玉米、大豆等粮食的产量占全国产量的 30%以上^[47], 为秸秆还田利用提供了充足的材料来源, 因此, 秸秆覆盖措施可以作为当地一项较好的水土保持措施与其他措施共同使用。值得注意的是, 秸秆覆盖措施在平均气温低于 3℃的北部黑土区(如海伦市), 连续覆盖会造成播种层地温降低, 延迟玉米出苗并影响灌浆成熟^[48], 需考虑地域分布问题, 如北部黑土区采用条耕模式进行改良, 可有效规避减产风险。

3.4 东北黑土坡耕地治理面蚀的水保措施研究展望

当前的水土保持措施, 如水平梯田、地埂植物带及保护性耕作等^[14, 49]已经具备较高的技术成熟度, 并在东北黑土坡耕地得到了广泛应用。与此同时, 随着无人机遥感、物联网传感器等技术的发展和出台的《中华人民共和国水土保持法》等一系列支持政策^[3, 5], 为水土保持措施的实施提供了技术支持和政策保障。尽管水保措施的应用前景广阔, 但在实际推广过程中仍面临诸多挑战。其一, 东北黑土区气候年际差异大, 地形复杂, 增加了措施设计和实施的难度。其二, 部分农户对部分水保措施接受程度较低, 如水平梯田和植物篱等措施尽管已被验证在减少水土流失方面效果显著, 但因其成本较高、养护困难及影响机械连片作业等原因往往不被农户采纳。此外, 诸如地埂植物带等措施占用了一定的耕地面积, 且需要长期维护和管理, 但因部分地区缺乏技术支持和专业培训^[50], 难以维持有效管理, 已逐渐被摒弃。因此, 科技工作者和政府组织不仅需要致力于研发、推广适宜的水保措施, 也应关注农户能否从水保措施实施中获益的问题, 以确保水土保持措施的可持续推广。

4 结 论

水土保持措施对减少径流和泥沙均表现出显著效益, 径流与泥沙的阻控效率分别为 63.1%和 73.2%, 组合措施的平均效益优于单一措施。除生物质炭改良和掺沙措施外, 其他措施对减少径流与泥沙均呈现显著效应, 其中垄间竹节壕的减流减沙效果最佳, 其次为深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田的组合措施。水土保持措施的阻控效益受坡度和土壤类型的影响显著: 4°~6°坡耕地, 水土保持措施的平均阻控效益最高; 生物措施的区域适用范围较广, 耕作措施在低坡度效益上显著; 暗棕壤对减少径流量最显著, 黑钙土在减沙方面表现最佳。耕作措施的减流减沙协同效率比最高, 中坡段 7°~9°和 4°~6°减流减沙效率的协同关系更一致。基于径流泥沙相对减少评价指数, 从水土保持效益角度可优选地埂植物带等 6 种高效水保措施; 但从水土保持和社会经济可行性双重维度考虑, 东北黑土坡耕地可优先推广垄间竹节壕、免耕 + 秸秆覆盖和深松 + 秸秆覆盖 + 垄向区田 3 种措施。本研究为水土保持措施在东北黑土坡耕地的科学实施和推广提供了理论依据和数据支撑, 但未来仍需进一步研究措施的长期效益及其经济成本与社会接受度, 以实现黑土资源的可持续利用。

参考文献 (References)

- [1] Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2010, 56 (2): 87—97.
- [2] Tian Z Y, Liu H Z, Ma R, et al. Spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation in black soil cropland of Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62 (4): 931—945. [田芷源, 卢慧中, 马瑞, 等. 东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62 (4): 931—945.]
- [3] Zhang X Y, Liu X B. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40 (4): 340—344. [张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. *水土保持通报*, 2020, 40 (4): 340—344.]
- [4] Liu D W, Wang Z M, Zhang B, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China[J].

- Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 113 (1/2/3/4): 73—81.
- [5] Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (2): 1—12. [张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (2): 1—12.]
- [6] Zhang X Y, Hu W, Li J Y, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69 (11): 1401—1405. [张兴义, 胡伟, 李建业, 等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69 (11): 1401—1405.]
- [7] Wang J L, Li Z Z. Research progress on water erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35 (5): 389—397. [王计磊, 李子忠. 东北黑土区水力侵蚀研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35 (5): 389—397.]
- [8] Chen J L. Method of soil-repairing terrace on sloping farmland[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 1965 (5): 19—20. [陈景岚. 坡耕地修土梯田的方法[J]. 辽宁农业科学, 1965 (5): 19—20.]
- [9] [Xie J. Soil erosion and its control in the central part of Heilongjiang Province[J]. Soils, 1990, 22 (3): 128—132. [谢军. 黑龙江省中部地区土壤侵蚀状况及其治理[J]. 土壤, 1990, 22 (3): 128—132.]
- [10] Shi S X, Jiang D S. Experimental study on the influence of several soil and water conservation measures on strengthening precipitation infiltration and reducing sediment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1994, 1 (1): 82—88. [石生新, 蒋定生. 几种水土保持措施对强化降水入渗和减沙的影响试验研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1 (1): 82—88.]
- [11] Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (6): 1341—1358. [韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1341—1358.]
- [12] Yan Y, Zhen H C, Zhai X Y, et al. The role of vegetation on earth bunds in mitigating soil erosion in Mollisols region of Northeast China[J]. Catena, 2021, 196: 104927.
- [13] Zhao Y S, Wei Y X. Soil and water conservation effects of protective tillage measures on sloping farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7 (3): 86—90. [赵雨森, 魏永霞. 坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7 (3): 86—90.]
- [14] Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, et al. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42 (8): 1325—1335. [梁爱珍, 张延, 陈学文, 等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42 (8): 1325—1335.]
- [15] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 109—121.
- [16] Wei W, Chen D, Wang L X, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 388—403.
- [17] Liu H Q, Yang J H, Liu C X, et al. Flow velocity on cultivated soil slope with wheat straw incorporation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124667.
- [18] Zhang Y F, Li H W, He J, et al. Effects of maize straw mulching on runoff and sediment process of slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (7): 118—124. [张翼夫, 李洪文, 何进, 等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (7): 118—124.]
- [19] 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.
- [20] Gurevitch J, Curtis P S, Jones M H. Meta-analysis in ecology[M]//Advances in Ecological Research. Amsterdam: Elsevier, 2001: 199—247.
- [21] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global analysis[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 753—760.
- [22] Jia L Z, Zhao W W, Zhai R J, et al. Regional differences in the soil and water conservation efficiency of conservation tillage in China[J]. Catena, 2019, 175: 18—26.
- [23] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data[J]. Science of the Total Environment, 2020, 735: 139517.
- [24] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean?[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 115 (1/2): 21—36.
- [25] Liu Y F, Dunkerley D, López-Vicente M, et al. Trade-off between surface runoff and soil erosion during the implementation of ecological restoration programs in semiarid regions: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 136477.
- [26] Wallace B C, Lajeunesse M J, Dietz G, et al. OpenMEE: Intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8 (8): 941—947.

- [27] Wang H R. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon and soil moisture in the Three Northern regions-based on Meta-analysis[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023. [王海茹. 三北地区植被恢复对土壤有机碳和水分的影响——基于Meta分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.]
- [28] Sun Y N, Zeng Y J, Shi Q H, et al. No-tillage controls on runoff: A meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 1—6.
- [29] Li M M, Xu G Z, Yang K C, et al. Effects of ecological soil and water conservation measures on soil erosion control in China's typical regions: A meta-analysis[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22 (6): 163—175.
- [30] Wang X K, Ouyang Z Y, Xiao H, et al. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (1): 14—19. [王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. *生态学报*, 2001, 21 (1): 14—19.]
- [31] Zhao Z Y, Fang H Y, Wu Y B, et al. Simulating the impact of slope shapes on soil erosion for the black soil region, Northeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (6): 23—29, 40. [赵紫远, 方海燕, 武亚冰, 等. 坡形对黑土区坡耕地土壤侵蚀的模型模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36 (6): 23—29, 40.]
- [32] Liu H F, Shan Z J, Qin W, et al. Review on soil and water loss control techniques and models in the black soil regions in the Northeast[J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45 (4): 74—80. [刘卉芳, 单志杰, 秦伟, 等. 东北黑土区水土流失治理技术与模式研究评述[J]. *泥沙研究*, 2020, 45 (4): 74—80.]
- [33] Chen L D, Wei W, Fu B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, 31 (4): 389—403.
- [34] Tian S Z, Zou Y J. Study on the composition and properties of several main soil humus in Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1987, 18 (1): 23—26. [田淑珍, 邹永久. 吉林省几种主要土壤腐殖质组成性质的研究[J]. *土壤通报*, 1987, 18 (1): 23—26.]
- [35] Wu L L, Liu X Q, Zhang Z X, et al. Forms and availability of phosphorus in typical soil of Jilin Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30 (5): 737—745. [吴璐璐, 柳小琪, 张泽兴, 等. 吉林省典型土壤磷素形态及有效性[J]. *西北农业学报*, 2021, 30 (5): 737—745.]
- [36] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81 (6): 1567—1576.
- [37] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019, 173: 375—383.
- [38] Hu J, Lü Y H, Fu B J, et al. Quantifying the effect of ecological restoration on runoff and sediment yields[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2017, 41 (6): 753—774.
- [39] Zhang Y G, Wu Y Q, Liu H H, et al. Effect of topography on ephemeral gully erosion in Northeast China with black soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (1): 35—38, 49. [张永光, 伍永秋, 刘洪鹤, 等. 东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J]. *水土保持学报*, 2007, 21 (1): 35—38, 49.]
- [40] Tu A G, Xie S H, Yu Z B, et al. Long-term effect of soil and water conservation measures on runoff, sediment and their relationship in an orchard on sloping red soil of Southern China[J]. *PLoS One*, 2018, 13 (9): e0203669.
- [41] Lu S N, Li R R, Yao C, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (5): 1271—1283. [陆淑宁, 李荣融, 姚冲, 等. 横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (5): 1271—1283.]
- [42] Ran L S, Lu X X, Xu J C. Effects of vegetation restoration on soil conservation and sediment loads in China: A critical review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43 (13): 1384—1415.
- [43] Liu X B, Zhang S L, Zhang X Y, et al. Soil erosion control practices in Northeast China: A mini-review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 44—48.
- [44] Bai L L, Shi P, Li Z B, et al. Synergistic effects of terraces and check dams on runoff and sediment yields in a slope-gully system in Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39 (13): 96—104. [白璐璐, 时鹏, 李占斌, 等. 黄土高原梯田和淤地坝坡沟治理措施对产流产沙的协同效应[J]. *农业工程学报*, 2023, 39 (13): 96—104.]
- [45] Yu J L, Wang G X, Yang H L. Application of hillside cultivated alleg directed regional field technique[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2004 (1): 114—115. [于景龙, 王国喜, 杨洪丽. 坡耕地垄向区田技术的应用[J]. *黑龙江水专学报*, 2004 (1): 114—115.]
- [46] Niu X L, Qin F C, Yang Z Q, et al. Efficacy of several tillages in conserving soil and water in slopping areas at the black soil in Northwest China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (5): 67—72. [牛晓乐, 秦富仓, 杨振奇, 等. 黑土区坡耕地几种耕作

- 措施水土保持效益研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38 (5): 67—72.]
- [47] Li H L, Zhang W F, Zhang F S, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16 (5): 1136—1143. [李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1136—1143.]
- [48] Liu S, Zhang X Y. Effect of conservation tillage on soil temperature, water content and yield in arable black soil[J]. Soybean Science, 2011, 30 (1): 56—61. [刘爽, 张兴义. 保护性耕作对黑土农田土壤水热及作物产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30 (1): 56—61.]
- [49] Liu X Y, Xin L J, Lu Y H. National scale assessment of the soil erosion and conservation function of terraces in China[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107940.
- [50] Han X Z, Zou W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 206—212. [韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 206—212.]

(责任编辑：檀满枝)