东北黑土区侵蚀沟不同治理模式碳汇作用

张继真[1]，张 月[2]，成 辉[3,4]，李智广[3]，
王岩松[1]，姜艳艳[1]，徐金忠[5]，李志飞[5]

（1.松辽水利委员会 松辽流域水土保持监测中心站，吉林 长春 130021；
2.吉林农业大学 资源与环境学院，吉林 长春 130118；3.水利部 水土保持监测中心，北京 100053；
4.中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；5.黑龙江省水利科学研究院，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘 要：［目的］探究东北黑土区侵蚀沟治理的碳汇效应，为区域生态治理模式优选及碳汇方法学构建提供科学依据。［方法］在东北黑土区典型治理县，选取耕地上4条配置代表性治理模式的沟道作为项目情景，另外选1条与治理沟特征相似的未治理沟作为基准线情景（对照）。通过样方法和全株收获法测定植被生物量，试验测定土壤有机碳和容重等指标，量化项目情景（侵蚀沟治理）的保土保碳、减蚀减排、增绿增汇、封秸封碳等能力，评估侵蚀沟不同治理模式所积累的碳汇量。［结果］①乔木林模式和秸秆填埋模式的单位面积年碳汇量较高，分别为11.31和11.82 t/(hm²·a)，乔灌草镶嵌模式的较低，为3.87 t/(hm²·a)；②乔灌草镶嵌、乔木林、乔木林＋石谷坊和秸秆填埋等各种模式的增绿增汇量分别为3.52，10.92，7.77和5.34 t/(hm²·a)，仅秸秆填埋模式具有封秸封碳量，为5.56 t/(hm²·a)；③若对东北黑土区全部侵蚀沟开展治理，预计年碳汇总量为1.91×10^6～3.20×10^6 t/a，均值为2.55×10^6 t/a。［结论］侵蚀沟不同治理模式均兼具保土保碳、减蚀减排和增绿增汇作用，其中秸秆填埋模式还具有封秸封碳作用。以植物为主治理模式的碳汇量主要源于增绿增汇，秸秆填埋模式的则主要源于封秸封碳。由于不同治理模式适用条件各异，侵蚀沟治理应综合考虑侵蚀状况、环境条件等因素，综合配置各种措施以充分提升其碳汇能力。

关键词：水土保持；侵蚀沟治理；碳汇；封秸封碳；东北黑土区

文献标识码：A **文章编号：**1000-288X(2026)05-0223-08 **中图分类号：**S157.1，S153.6

文献参数：张继真，张月，成辉，等.东北黑土区侵蚀沟不同治理模式碳汇作用[J].水土保持通报，2026，46(5)：223-230. Zhang Jizhen, Zhang Yue, Cheng Hui, et al. Carbon sink effects of different gully erosion control models in black soil region of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(5): 223-230.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.003 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.05.003**

Carbon sink effects of different gully erosion control models in black soil region of northeast China

Zhang Jizhen[1], Zhang Yue[2], Cheng Hui[3,4], Li Zhiguang[3],
Wang Yansong[1], Jiang Yanyan[1], Xu Jinzhong[5], Li Zhifei[5]

(1.*Songliao Basin Soil and Water Conservation Monitoring Center Station, Songliao Water Conservancy Commission, Changchun, Jilin* 130118, *China*; 2.*College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin* 130118, *China*; 3.*The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Ministry of Water Resources, Beijing* 100053, *China*; 4.*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 5.*Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin, Heilongjiang* 150080, *China*)

Abstract: [Objective] The carbon sink effects of gully erosion control in the black soil region of northeast China were investigated in order to provide a scientific basis for optimizing regional ecological management models and developing carbon sink accounting methodologies. [Methods] In a typical county of the black soil region, four gullies with representative control models on cultivated land were selected as project scenarios, and one untreated

收稿日期：2025-11-09 **修回日期：**2026-04-28 **采用日期：**2026-04-30

资助项目：吉林省自然科学基金项目“吉林黑土区农田土壤碳储量历史演变过程的高分辨率重建”(20240101041JC)；国家重点研发计划项目“黑土区农田水土流失防治保护性利用模式与应用”(2021YFD1500805)

第一作者：张继真(1974—)，男(汉族)，吉林省德惠市人，硕士，正高级工程师，主要从事水土保持规划、流域水土流失动态监测、侵蚀沟监测与治理技术，水土保持碳汇、生态产品培育与价值转化方面的研究。Email：117371290@qq.com。

通信作者：李智广(1966—)，男(汉族)，陕西省岐山县人，博士，正高级工程师(二级)，主要从事水土保持生态产品价值转化、碳汇、监测、监管、信息化、项目建设等管理和科技方面的研究。Email：lizhiguang@mwr.gov.cn。

gully with similar characteristics was selected as the baseline scenario (control). Vegetation biomass was measured using quadrat sampling and whole plant harvesting methods, while soil organic carbon and bulk density were determined through laboratory analysis. The capacities of soil retention and carbon conservation, erosion reduction and emission mitigation, vegetation restoration and carbon sink, and straw burial and carbon storage under the project scenarios (gully erosion control) were quantified. The carbon sink amounts under different gully control models were further evaluated. [Results] ① The annual carbon sink per unit area was relatively high under the arbor forest model and the straw burial model, reaching 11.31 and 11.82 t/(hm^2·a), respectively, whereas that under the arbor-shrub-grass mosaic model was lower, at 3.87 t/(hm^2·a). ② The carbon sink amounts derived from vegetation restoration under the arbor-shrub-grass mosaic, arbor forest, arbor forest + stone check dam, and straw burial models were 3.52, 10.92, 7.77, and 5.34 t/(hm^2·a), respectively. Only the straw burial model exhibited carbon storage through straw burial, with a value of 5.56 t/(hm^2·a). ③ If all erosion gullies in the black soil region of northeast China were treated, the total annual carbon sequestration would be approximately 1.91×10^6—3.20×10^6 t/a, with an average of 2.55×10^6 t/a. [Conclusion] Different gully erosion control models all have the functions of soil retention and carbon conservation, erosion reduction and emission mitigation, and vegetation restoration and carbon sink. The straw burial model provides carbon storage through straw burial. The carbon sink in vegetation-based models primarily comes from vegetation restoration, while that in the straw burial model mainly comes from straw burial. Given the different applicable conditions of each control model, gully erosion control should comprehensively consider erosion severity and environmental conditions, and integrate multiple measures to fully enhance carbon sink capacity.

Keywords: soil and water conservation; gully erosion control; carbon sink; straw burial and carbon storage; black soil region of northeast China

东北黑土区是中国核心粮食产区和最大的商品粮基地,土地肥沃、有机碳含量高,对碳排放与固持过程具有高度敏感性。然而,由于长期不合理的开发利用,加之沟道侵蚀严重,该区域土壤碳库损失问题日益突出[1]。侵蚀沟是东北黑土区水土流失的典型表现形式,直接导致黑土大量流失和耕地面积减少[2-3],严重影响生态系统的碳循环过程。以往关于侵蚀沟治理的研究,主要集中在侵蚀沟发育特征与规律[4]、空间识别与分布[5]及治理技术与模式等[4,6]方面,专门针对黑土区侵蚀沟治理水土保持措施碳汇作用的综合评估还鲜有报道。为此,本研究基于水土保持碳汇方面的研究成果,梳理碳汇作用特征,明确水土保持措施可通过多种碳汇作用途径巩固和提升生态系统碳汇能力[7]。侵蚀沟治理作为控制水土流失、保护耕地资源的重要举措,经过多年的实践总结,提出了多种治理模式,可归纳为植物治沟、植物为主工程为辅、工程为主植物为辅以及复垦等模式[4,8]。为准确核算不同治理模式产生的碳汇作用,借鉴李智广等[9-11]的研究及相关方法学提出的保土保碳、减蚀减排、增绿增汇的计算方法,以东北黑土区典型治理县拜泉县和海伦市为研究对象,在全面调查2个县侵蚀沟综合治理以来水土流失变化情况的基础上,针对土壤与植被两类碳库,评估东北黑土区侵蚀沟治理水土保持碳汇作用,旨在为实施侵蚀沟治理项目碳汇动态监测与评价提供技术和方法,为实现"碳达峰碳中和"战略提供基础数据与科学手段。

1 研究区概况

拜泉县(125°30′—126°31′E,47°20′—47°55′N)位于黑龙江省西部,土地面积为3 599 km^2,海拔为66~339 m。海伦市(126°14′—127°45′E,46°58′—47°52′N)位于黑龙江省中部,土地面积为4 667 km^2,海拔为147~471 m。研究区属中温带大陆性季风气候,冬季严寒,夏短多雨,四季温差较大,年均气温1~2 ℃,年均降水量500~600 mm。作为东北黑土区的典型治理县,主要的土地利用类型为耕地,土壤类型为黑土,主要种植大豆(*Glycine max*)和玉米(*Zea mays*)等作物。2个县地面坡度较大,土质松散,抗蚀性弱,夏季降雨集中,加之长期高强度农业生产等,导致坡面水土流失加剧,加速侵蚀沟的形成与发展。

针对土壤侵蚀问题,相关部门采用工程措施、植物措施与生态修复措施相结合的方式,进行侵蚀沟治理,如在沟头搭建石笼防护,沿侵蚀沟沟底建立连续柳编跌水、谷坊,在沟道削坡栽植樟子松(*Pinus sylvestris*)、灌木柳(*Salix saposhnikovii*)、杨树(*Populus przewalskii*)等。总结起来,在研究区的侵蚀沟治理模式中,具有明显碳汇作用的主要包括乔灌草镶嵌模式(指乔灌草水平配置,而非立体配置)、乔木林模

式、乔木林+石谷坊模式、秸秆填埋模式等4种。对应这4种模式,选取具有代表性的4条已治理侵蚀沟作为项目情景(G_1,G_2,G_3,G_4),1条未治理侵蚀沟作为基准线情景(G_{bl})作为研究对象。5条侵蚀沟的基本信息详见表1,每条侵蚀沟的无人机遥感影像如图1所示。

表1　侵蚀沟治理模式基本信息

Table 1　Basic information of gully erosion control models

侵蚀沟编号	面积/hm²	治理模式	林草种类	治理时间	样地数量
G_1	6.19	乔灌草镶嵌模式	樟子松、灌木柳、草被	2013年	5
G_2	3.92	乔木林模式	杨树	2012年	3
G_3	8.02	乔木林+石谷坊模式	杨树	2009年	3
G_4	1.48	秸秆填埋模式		2022年	3
G_{bl}	5.68	未治理			3

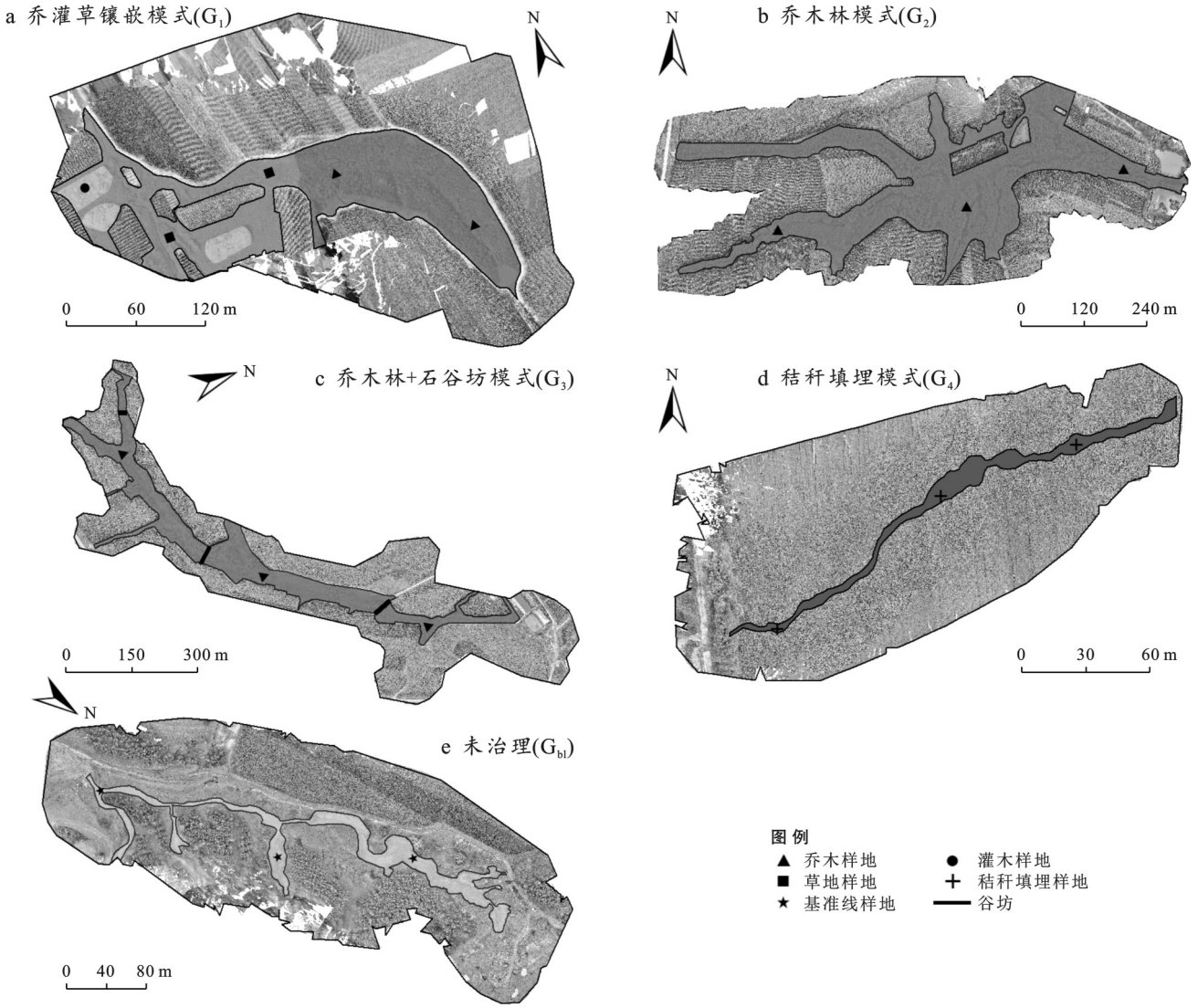


图1　侵蚀沟无人机影像和采样样地分布

Fig.1　Distribution of unmanned aerial vehicle imagery and sample plots in eroded gullies

2　材料与方法

2.1　侵蚀沟治理项目基准线情景确定

项目基准线情景为维持治理活动开始前侵蚀沟的土地利用与管理方式。即在不实施任何治理和人为干预的情况下,侵蚀沟随时间变化到某个时刻(如本次监测时)所形成的情景。基于研究区侵蚀沟治理规划与实施记录,确定以县内1条未作任何治理的沟道为基准线情景。这条侵蚀沟内生长着杂草,没有任何灌木和乔木,沟道经常发生水土流失,沟岸常

坍塌，监测时的面积为5.68 hm^2。

2.2 数据采集与处理

由于每条侵蚀沟的面积较小，且侵蚀沟范围内的措施均一。因此，将单个沟道作为独立的核算单位，无需划分碳层。在每条沟道至少布设3个样地，共设置样地17块，每条沟道的样地分布如图1所示。野外采样于2024年7月进行，乔木林样地规格为20 m×20 m，灌木、草地、农田和未治理侵蚀沟的样地规格为10 m×10 m。

2.2.1 土壤样品

在每个样地内沿一条对角线，确定5个土壤采样点，分0—20 cm和20—40 cm采集，将5个采样点的土壤样品分层混合后，取土样约1 kg装入带有标签的自封袋中，样品共计34份，带回实验室测定土壤有机碳。同时，使用环刀（100 cm^3）在两个土层分别采集原状土样，共采集34个环刀样品，带回实验室测定土壤容重。

将用于测定土壤有机碳的土样，经风干后挑去>2 mm的根系和砾石，利用FW-100粉碎机粉碎，过100目筛，采用岛津总有机碳测定仪（TOC-L-CPH-SSM5000A型）测试土壤有机碳含量。土壤容重依据《土壤检测第4部分：土壤容重的测定（NY/T 1121.6—2006）》标准执行。

2.2.2 植物样品

在每个乔木样地进行每木检尺，测定并记录胸径。对于胸径≥2 cm的乔木（杨树和樟子松），通过查阅《温室气体自愿减排项目方法学：造林碳汇（CCER-14-001-V01）》确定其对应的生物量方程（表2）。在每个灌木样地，使用全株收获法，获取其生物量。不考虑草本和粮食作物（玉米与大豆轮作）的生物量。

表2 植被生物量模型及参数

Table 2 Vegetation biomass models and parameters

树种	平均胸径/cm	平均树高/m	生物量模型	含碳率/%
杨树	10.58±0.34	4.94±0.15	$B=0.027\ 7DBH^{2.751\ 8}$	47.05
樟子松	21.65±0.94	8.43±0.89	$B=0.153\ 3DBH^{2.337\ 7}$	51.65

注：①表中数据为平均值±标准误。②DBH为胸径；B为整株生物量。下同。

2.3 碳汇能力计算

本研究中水土保持碳汇主要是指实施水土保持措施后减少或避免的碳排放，增加的植被和土壤碳储量，主要包括减蚀减排、增绿增汇以及秸秆填埋长期封存秸秆后稳定的封秸封碳。相关计算方法主要参考李智广等的相关研究及《温室气体自愿减排项目方法学：淤地坝碳汇（CCER-14-005-V01）》[9-12]。

2.3.1 基准线情景碳储量

根据基准线情景的侵蚀沟样地分层采集的土壤样品，计算基准线情景下未治理沟道的碳储量。

2.3.2 保土保碳与减蚀减排量

侵蚀沟治理措施实施完成，发挥水土保持效益之后，单个沟道保土保碳量计算公式为

$$CP_{pro}=\sum_{i=1}^{2}\left(V_i\times\rho_i\times SOC_{bsl,i}\times10^{-3}\right) \quad (1)$$

式中：CP_{pro}为项目情景（治理措施）保土保碳量（t，以C计）；V_i为治理措施拦蓄土壤第i层的体积（m^3）；ρ_i为拦蓄土壤第i层土壤容重（g/cm^3）；$SOC_{bsl,i}$为基准线情景0—40 cm土壤有机碳含量（g/kg）；i为土壤分层采样的总层数，i=1，2，无量纲。

在基准线情景下，侵蚀沟发育过程的侵蚀土壤在搬运过程中会发生矿化氧化，向大气排放CO_2。相对基准线情景，项目情景的减蚀减排量计算公式为

$$CR_{pro}=CP_{pro}\cdot P_{bsl} \quad (2)$$

式中：CR_{pro}为项目情景减蚀减排量（t，以C计）；CP_{pro}为按照公式（1）计算的保土保碳量（t，以C计）；P_{bsl}为流失土壤搬运过程中有机碳矿化氧化比例（%），本研究中取值为20%[13-14]。

2.3.3 土壤、植被增汇量和封秸封碳量

（1）土壤增汇。当侵蚀沟治理措施发挥效益后，对应的土壤碳储量将增加。相对于基准线情景，治理后土壤所增加的碳储量按照公式（3）计算：

$$CI_{pro,s}=\sum_{i=1}^{2}\left[\left(V_{pro,i}\times SOC_{pro,i}\times\rho_{pro,i}-V_{pro,i}\times SOC_{bsl,i}\times\rho_{bsl,i}\right)\right] \quad (3)$$

式中：$CI_{Pro,s}$为项目情景土壤碳汇量（t，以C计）；$V_{pro,i}$为项目情景第i层土壤体积（m^3）；$SOC_{pro,i}$为项目情景第i层有机碳含量（g/kg）；$\rho_{pro,i}$为项目情景第i层的容重（g/cm^3）；$\rho_{bsl,i}$为基准线情景下项目土壤第i层的容重（g/cm^3）；$SOC_{bsl,i}$为基准线情景下第i层的有机碳含量（g/kg）。

（2）植被增汇。在侵蚀沟治理措施中，鉴于乔木和灌木的枯落物相当少，且向着被氧化释放返回大气当中和被微生物作用转化为土壤有机碳2个方向变化，草本和作物绝大部分被氧化释放返回大气当中，年际之间累积在生物体中的相当少，从保守性原则和持久性出发，这两部分的增汇可忽略不计[12]，其中进

入土壤的已经纳入土壤增汇计算。因此,当侵蚀沟治理措施发挥效益后,相对于基准线情景侵蚀沟中几乎无树木的情况,将所种植水土保持林(乔木和灌木)的碳储量计为植被增汇量。植被增汇量计算公式为

$$CI_{pro,v}=\sum_{j=1}^{m}B_jC_j \quad (4)$$

式中:$CI_{pro,v}$为项目情景植被增汇量(t,以C计);B_j为第j树种的生物量干重(t);m为树种数量;C_j为第j树种含碳率(%)。本研究中所涉及的乔木树种包括杨树和樟子松,所用生物量模型及参数如表2所示。灌木树种为灌木柳,采用全株收获法获取生物量;灌木柳碳密度为8.42 t/hm^2。

(3)封秸封碳。在治理侵蚀沟时,采用填埋秸秆,覆土压实的方法,既可稳定沟道又可降低秸秆分解。封存秸秆所封存增加的土壤有机碳计算公式为

$$CI_{pro,st}=V_{st}\times\rho_{st}\times OC_{st}\times10^{-3}\times30.3\% \quad (5)$$

式中:$CI_{pro,st}$为项目情景封秸封碳量(t,以C计);V_{st}为治理所使用秸秆包的体积(m^3);ρ_{st}为秸秆包的容重(g/cm^3);OC_{st}为秸秆包有机碳含量(g/kg);30.3%为秸秆深埋20 a后秸秆的剩余比例[15]。

3　结果与分析

3.1　侵蚀沟治理后的减蚀减排量

侵蚀沟治理可通过防止沟头前进、沟壁坍塌、沟底下切等3个维度的发育以及拦蓄坡面侵蚀泥沙,防止沟道继续发育,保持大量土壤,从而产生保土保碳效益。据推算,G_1,G_2,G_3和G_4等4条沟拦截土壤体积分别为3 961.33,78 914.00,19 211.00和1 427.00 m^3,实测拦截土壤的容重分别为1.39,1.25,1.35和1.31 g/cm^3,实测基准线情景的0—40 cm土壤有机碳含量为7.26 g/kg。据公式计算4条治理沟的保土保碳量分别为119.95,188.64,717.86和13.58 t;按单位面积统计,G_1,G_2,G_3,G_4的年均保土保碳量分别为1.76,1.96,12.21和4.59 t/(hm^2·a)。相比而言,单位面积保土保碳量最大的为G_3,其次为G_4,最小的为G_1。若不对侵蚀沟加以治理,则水土流失会造成土壤中有机碳的矿化释放,导致土壤碳库变为碳源,提高大气CO_2浓度。本研究以20%作为SOC在流失过程中的矿化比例,则G_1,G_2,G_3,G_4的减蚀减排量分别为23.99,37.73,143.57和2.72 t;单位面积年均减蚀减排量分别为0.35,0.39,2.44,0.92 t/(hm^2·a)。

3.2　侵蚀沟治理的增汇量

4种侵蚀沟治理模式的增汇量状况详见表3。由表3可知,G_4沟道的土壤有机碳含量高于其他沟道,0—20,20—40 cm的SOC含量分别为23.43和30.39 g/kg,平均值为26.91 g/kg。G_2土壤有机碳含量也相对较高,0—20,20—40 cm的SOC含量分别为22.20和22.89 g/kg,平均值为22.54 g/kg。G_{bl}的有机碳含量最低,0—20,20—40 cm的SOC含量分别为4.70和9.80 g/kg,平均值为7.26 g/kg。

表3　采样沟的土壤有机碳(SOC)含量

Table 3　Soil organic carbon (SOC) content in sampled gullies　　单位:g/kg

沟道编号	土壤有机碳(SOC)含量		
	0—20 cm	20—40 cm	平均值
G_1	13.13±10.90^{ab}	9.50±9.40^{c}	11.30±9.79^{cd}
G_2	22.20±1.43^{a}	22.89±1.84^{ab}	22.54±1.52^{ab}
G_3	20.26±6.97^{a}	14.71±5.79^{bc}	17.50±6.49^{bc}
G_4	23.43±0.66^{a}	30.39±9.84^{a}	26.91±6.97^{a}
G_{bl}	4.70±1.02^{b}	9.80±3.82^{c}	7.26±3.74^{d}

注:不同小写字母表示同一土层深度,不同沟道间数据在5%水平下具有显著性差异($p<0.05$)。

G_1,G_2,G_3,G_4土壤增汇量分别为150.73,313.79,382.48和158.01 t;按单位面积统计,G_1,G_2,G_3,G_4的年土壤增汇量分别为2.21,6.67,3.18和5.34 t/(hm^2·a)。比较而言,G_4单位面积年均土壤增汇量最大,其次为G_2,土壤增汇量较低的为G_1。G_1,G_2,G_3,G_4植被增汇量分别为14.37,50.95,68.88,0 t/hm^2;G_1,G_2,G_3,G_4的年植被增汇量分别为1.31,4.25,4.59,0 t/(hm^2·a)。G_3单位面积植被增汇量最高,其次为G_2,最低的为G_1。只有G_4为采用秸秆填埋方式治理的沟道,产生的封秸封碳量为164.69 t;按单位面积统计,在20 a内该治理方式的年增汇量为5.56 t/(hm^2·a)。

侵蚀沟治理通过减蚀减排、土壤增汇、植被增汇、封秸封碳等作用,提升治理范围的碳汇能力,各种治理模式所产生的总碳汇量详见表4。由表4可见,单位面积年度碳汇量以G_4最高,为11.82 t/(hm^2·a);G_2次之,为11.31 t/(hm^2·a);G_1的最小。

表4　采样沟总碳汇量

Table 4　Total carbon sink amount in sampled gullies　　单位:t/(hm^2·a)

碳汇类型	各沟道总碳汇量			
	G_1	G_2	G_3	G_4
减蚀减排量	0.35	0.39	2.44	0.92
土壤增汇量	2.21	6.67	3.18	5.34
植被增汇量	1.31	4.25	4.59	—
封秸封碳量	—	—	—	5.56
合计	3.87	11.31	10.21	11.82

4　讨论

4.1　侵蚀沟治理碳汇作用

近年来,东北黑土区侵蚀沟治理持续实施,使得

土壤碳汇量与植被碳汇量显著增加。各种治理模式对碳汇量的贡献有所不同,这主要是由于不同侵蚀沟道的侵蚀程度、所处地形和管理方式等因素的影响。不同治理模式因其碳输入途径、对侵蚀环境的控制能力、植被恢复策略及生长特性的不同,导致其土壤增汇和植被增汇效果存在差异[16-17]。本研究表明,各治理模式均具有保土保碳、减蚀减排、增绿增汇等碳汇作用,且碳汇主要来源于植被和土壤碳汇量。这与淤地坝、崩岗治理、梯田等水土保持治理产生的碳汇作用一致[9-11]。实施侵蚀沟治理后,基准线情景土壤有机碳含量相较于治理低了35.75%~73.02%,这与张振烨等[18]在黑土区的研究认为不同发育的侵蚀沟相对未侵蚀地块下降33.84%~66.18%的结果相近。其主要原因是侵蚀沟发育过程中,肥沃的表土被不断侵蚀、流失,导致土壤有机碳含量降低。侵蚀沟治理控制土壤侵蚀、稳定水土资源,为植被生长提供所需的养分,增加植被碳汇量;植物措施也可为土壤提供新的碳源输入,可快速积累土壤有机碳,提升土壤碳汇[19-20]。

不同侵蚀沟治理模式当中,以秸秆填埋和乔木林模式所产生的碳汇量较高。它们分别为11.82,11.31 t/(hm^2·a);乔灌草镶嵌模式产生碳汇最少,为3.87 t/(hm^2·a)。关于乔木林的增汇能力,在学界和行业实践中已形成共识,本文不再赘述。此处主要讨论秸秆填埋的增汇能力,秸秆填埋在侵蚀沟治理中具有双重的生态效应:①秸秆打捆填埋通过厌氧环境抑制微生物活性、冻结状态延缓酶促反应,物理封存降低接触面积,显著降低秸秆的腐解速率,实现秸秆的长期封存和减少CO_2的排放[15];②秸秆分解产物为土壤微生物提供丰富的碳源和能量,刺激土壤微生物活性和数量增长,通过体内周转和体外修饰作用,加速土壤有机碳的积累[4,21],显著提升沟道土壤碳汇能力。秸秆填埋模式的碳汇量也与填埋的秸秆量、治理面积等因素有关,填埋秸秆量大,治理面积小也是秸秆填埋模式碳汇大的原因。在本研究中,填埋秸秆量高于其他治理模式植被的生物量,其治理面积仅是其他治理模式的18%~38%。乔木林+石谷坊模式通过工程保土和生物固碳实现侵蚀控制与碳汇提升的协同增效。在治理初期,谷坊等工程措施通过拦截泥沙,稳定沟道地形,为植物生长和土壤增汇提供基础条件[4];植物措施产生的生物质、根系分泌物及凋落物进一步促进土壤有机碳提升[22]。相比之下,单一植物措施在初期因冠层遮荫不足,根系固土能力有限,在短期内对土壤碳汇的提升作用较弱。

4.2 侵蚀沟治理碳汇潜力

针对不同发育程度的侵蚀沟,应用本研究4条侵蚀沟所采取的治理模式,按照各种采样沟所产生的碳汇量进行黑土区碳汇潜力估算。据2020年水利部调查[23],东北黑土区侵蚀沟面积约为2 778.22 km^2,其中中小型侵蚀沟面积约1 046.08 km^2,大型侵蚀沟约1 732.14 km^2。若采用G_4(秸秆填埋模式)治理中小型侵蚀沟,可产生碳汇量1 236 466.56 t/a。对大型侵蚀沟,若采用G_1(乔灌草镶嵌模式)治理,可产生碳汇量约670 338.18 t/a;若采用G_2(乔木林模式)治理,可产生碳汇量约1 959 050.34 t/a;若采用G_3(乔木林+石谷坊模式)治理,可产生碳汇量约1 768 514.94 t/a。大型沟的治理可产生的碳汇潜力约为670 338.18~1 959 050.34 t/a,中小型沟可产生的碳汇潜力约为1 236 466.56 t/a。若采取本研究中的侵蚀沟治理模式对东北黑土区全部侵蚀沟开展治理,预计总共可产生的碳汇量约1 906 804.74~3 195 516.90 t/a,均值为2 551 160.82 t/a。可见,东北黑土区侵蚀沟治理具有很大的碳汇潜力,有利于提升区域的土壤质量、水土保持措施保碳增汇与减蚀减排能力。

秸秆填埋模式的碳汇量相较于其他模式更为显著(表4)。然而,其碳汇的长期稳定性受到多种因素影响。首先,秸秆填埋属于一次性的有机质投入,随着秸秆的持续分解,土壤微生物对秸秆的分解速率逐渐趋于稳定,对土壤有机碳提升的贡献也相对稳定[24]。其次,秸秆填埋作为一种柔性治理模式,其稳定性受到秸秆填埋工艺、气候环境等多重因素影响,可能导致秸秆填埋模式的碳汇效应出现波动,面临非持久性的风险。其他治理模式产生的碳汇量低于秸秆填埋,但从长远视角审视,它们也具有独特的优势。随着植被恢复,植物和土壤固碳能力持续提升[7,25]。植被恢复后抵御极端降雨等自然灾害的韧性增强,其长期碳汇能力的稳定性表现更为突出[26]。不同的治理模式具有情境适用性。秸秆填埋模式适用于耕地中小型侵蚀沟治理,有利于消除侵蚀沟、恢复耕地。植物措施和工程措施对于大、中、小型侵蚀沟治理均有成效,但实际应用过程中,立地条件、措施配置等因素对治理效果有着不可忽视的影响[27]。因此,在开展东北黑土区耕地侵蚀沟治理时,只有综合考虑各种治理措施的区域适宜性,科学配置相关措施,才能有效巩固和提升区域的整体碳汇能力。

5 结 论

(1) 侵蚀沟治理兼具保土保碳,减蚀减排与增绿

增汇等碳汇作用。在各种治理模式中,乔木林模式和秸秆填埋模式的单位面积年均碳汇效率较高,分别为 11.31 和 11.82 t/(hm²·a),乔灌草镶嵌模式的较低,为 3.87 t/(hm²·a)。

(2) 不同治理模式的碳积累途径存在差异。以植物为主的治理模式的碳积累途径主要为增绿增汇,乔灌草镶嵌模式、乔木林模式、乔木林+石谷坊模式和秸秆填埋模式的增绿增汇量分别为 3.52,10.92,7.77,5.34 t/(hm²·a);秸秆填埋模式的途径主要为封秸封碳,且仅秸秆填埋模式具有封秸封碳量,为 5.56 t/(hm²·a)。

(3) 基于本研究设定的治理模式,黑土区侵蚀沟治理具有一定的碳汇潜力,合理推广和科学配置治理措施可为区域带来可观的碳汇增益。采用秸秆填埋模式和乔木林模式估算年碳汇量可达 3.20×10^6 t;采用秸秆填埋模式和乔灌草镶嵌模式估算年碳汇量为 1.91×10^6 t。

本研究通过实地监测与模型估算,明确不同治理模式的碳汇特征与潜力,为水土保持碳汇项目提供了方法参考与科学依据。然而,本研究仅选取 4 条典型沟道,治理年份和样本数量相对有限,难以探究侵蚀沟治理的年均变化情况。鉴于侵蚀沟治理具有较强的针对性,用年均碳汇速率推算黑土区侵蚀沟治理的碳汇量仍具有不确定性。未来需扩大监测范围,延长观测周期,并深化碳汇动态机制研究,以支持碳汇导向的侵蚀沟治理模式优化与相关方法学制定。

参考文献(References)

[1] 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.
Zhang Xingyi, Hu Wei, Li Jianye, 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.

[2] 王伟,王春梅,明哲,等.东北黑土区典型小流域浅沟损毁耕地特征分析[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(2):35-45.
Wang Wei, Wang Chunmei, Ming Zhe, et al. Analysis of the characteristics of farmland damaged by ephemeral gully in typical small watersheds of the black soil area in northeast China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(2):35-45.

[3] 邢慧淼,张岩,郭海燕,等.东北典型黑土区不同级别沟道形态特征分析[J].水土保持学报,2025,39(3):27-33.
Xing Huimiao, Zhang Yan, Guo Haiyan, et al. Analysis of the morphological characteristics of channels at different levels in a typical black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):27-33.

[4] 郭明明,王迪晨,徐金忠,等.东北黑土区沟蚀研究进展与展望[J/OL].(2025-10-15).中国水土保持科学(中英文), 1-28. https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20251014.1625.002.
Guo Mingming, Wang Dichen, Xu Jinzhong, et al. Research progress and prospects of gully erosion in the black soil region of northeast China [J/OL]. (2025-10-15). Science of Soil and Water Conservation, 1-28. https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20251014.1625.002.

[5] 朱庆贺,秦伟,吕刚,等.侵蚀沟治理保护耕地面积识别与区域差异分析:以黑龙江省为例[J/OL].(2026-01-22).中国水土保持科学(中英文),1-14. https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20260121.1849.005.
Zhu Qinghe, Qin Wei, Lü Gang, et al. Identification of the farmland area protected by gully remediation and regional variation analysis: A case study in the Heilongjiang Province [J/OL]. (2026-01-22). Science of Soil and Water Conservation, 1-14. https://link.cnki.net/urlid/10.1449.S.20260121.1849.005.

[6] 彭大庆,王雪珊,张强,等.草本植物在东北地区侵蚀沟生态修复利用研究进展[J/OL].(2025-11-24).中国科学(生命科学),1-8. https://link.cnki.net/urlid/11.5840.Q.20251121.1100.004.
Peng Daqing, Wang Xueshan, Zhang Qiang, et al. Research progress in the utilization of herbaceous plants in ecological restoration of gully erossion in northeast China [J/OL]. (2025-11-24). Scientia Sinica (Vitae), 1-8. https://link.cnki.net/urlid/11.5840.Q.20251121.1100.004.

[7] 李智广,王海燕,王隽雄.碳达峰与碳中和目标下水土保持碳汇的机理、途径及特征[J].水土保持通报,2022,42(3):312-317.
Li Zhiguang, Wang Haiyan, WangJunxiong. Mechanisms, pathways and characteristics of carbon sinks related to soil and water conservation from perspective of carbon peak and carbon neutralization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):312-317.

[8] 张晟旻,李浩.东北黑土区的侵蚀沟治理措施与模式[J].水土保持通报,2020,40(3):221-227.
Zhang Shengmin, Li Hao. Gully erosion control practices and models in mollisol areas of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 221-227.

[9] 李智广,成辉,方怒放,等.淤地坝保碳、减排、增汇作用与其能力评估[J].水土保持学报,2023,37(4):1-6.
Li Zhiguang, Cheng Hui, Fang Nufang, et al. The role of Yudiba dams in protecting carbon, reducing carbon

emission and enhancing carbon sequestration and its capability assessment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):1-6.

[10] 成辉,钟小剑,李智广,等.崩岗治理碳汇作用与碳汇能力评估[J].中国水土保持科学,2024,22(2):146-153.
Cheng Hui, Zhong Xiaojian, Li Zhiguang, et al. Assessment on the role and capacity of carbon sink in managed Benggang [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(2):146-153.

[11] 喻恺阳,成辉,李智广,等.黄土丘陵沟壑区梯田的碳汇作用及其变化特征[J].水土保持通报,2024,44(5):287-293.
Yu Kaiyang, Cheng Hui, Li Zhiguang, et al. Functions and characteristics of terrace carbon sinks in loess hilly and gully regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):287-293.

[12] 中华人民共和国生态环境部.关于发布《温室气体自愿减排项目方法学淤地坝碳汇(CCER-14-005-V01)》的通知[EB/OL].(2025-11-25).https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202512/t20251202_1136958.html.
Ministry of Ecology and Environment of China, Ministry of Water Resources of China. Notice on Issuing the "Methodology for Greenhouse Gas Voluntary Emission Reduction Project: Yudiba Dam Carbon Sequestration (CCER-14-005-V01)" [EB/OL]. (2025-11-25). https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202512/t20251202_1136958.html.

[13] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003,29(4):437-450.

[14] Ran Lianhai, Lu Xixi, Xin Zhong. Erosion-induced massive organic carbon burial and carbon emission in the Yellow River basin, China [J]. Biogeosciences, 2014, 11(4):945-959.

[15] 祁志,韩兴,丁超,等.填埋复垦侵蚀沟的导排水功能和秸秆腐解速率[J].农业工程学报,2020,36(23):85-91.
Qi Zhi, Han Xing, Ding Chao, et al. Drainage function and straw decomposition rate of landfill reclamation erosion gully [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(23):85-91.

[16] 杨倩,朱大运,陈静,等.植被恢复模式对土壤团聚体和有机碳储量的影响[J].森林与环境学报,2022,42(6):631-639.
Yang Qian, Zhu Dayun, Chen Jing, et al. Effects of vegetation restoration models on soil aggregate and organic carbon stock [J]. Journal of Forest and Environment, 2022,42(6):631-639.

[17] 许小明,张晓萍,何亮,等.黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征[J].环境科学,2022,43(11):5263-5273.
Xu Xiaoming, Zhang Xiaoping, He Liang, et al. Carbon sequestration characteristics of different restored vegetation types in loess hilly region [J]. Environmental Science, 2022,43(11):5263-5273.

[18] 张振烨.延寿县坡耕地不同发育程度侵蚀沟土壤养分和酶活性特征[D].黑龙江 哈尔滨:黑龙江大学,2022.
Zhang Zhenye. Characteristics of soil nutrients and enzyme activities in eroded gullies with different development degrees on sloping farmland in Yanshou County [D]. Harbin, Heilongjiang: Helongjiang University, 2022.

[19] 曹文洪,张晓明,张永娥,等.水土保持碳汇内涵与测算方法[J].中国水土保持科学,2024,22(1):1-11.
Cao Wenhong, Zhang Xiaoming, Zhang Yong'e, et al. Connotation of carbon sink in soil and water conservation and its calculation method [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(1):1-11.

[20] Zhang Naiwen, Zheng Guangren, Han Xiaozeng, et al. Microbial resource limitation in soil aggregates effects soil organic carbon storage under straw incorporation [J]. Soil and Tillage Research, 2026,256:106874.

[21] 杨世奇,陈丽明,黄万,等.长期秸秆还田替代部分化肥提高双季稻田土壤有机碳、氮组分及微生物群落的活性[J].中国科学(生命科学),2025,55(11):2325-2338.
Yang Shiqi, Chen Liming, Huang Wan, et al. Long-term straw retention with reducing chemical fertilizers application improves soil carbon and nitrogen fractions and microbial community composition in a double rice-cropping system [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2025,55(11):2325-2338.

[22] 王晶,赵文武,刘月,等.植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J].生态学报,2019,39(9):3355-3364.
Wang Jing, Zhao Wenwu, Liu Yue, et al. Effects of plant functional traits on soil conservation: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(9):3355-3364.

[23] 中国水利报社.水利部组织完成东北黑土区侵蚀沟调查[EB/OL].(2023-08-28).http://www.chinawater.com.cn/newscenter/kx/202308/t20230828_800831.html.
China Water Resources News. The ministry of water resources organized and completed the investigation of erosion gullies in the black soil region of northeast China [EB/OL].(2023-08-28).http://www.chinawater.com.cn/newscenter/kx/202308/t20230828_800831.html.

[24] 周斯豪,王美琦,宋瑶,等.长期秸秆还田对下茬还田秸秆的降解及土壤微生物群落的影响[J].环境科学,2025,46(1):532-542.
Zhou Sihao, Wang Meiqi, Song Yao, et al. Legacy effects of long-term straw returning on straw degradation and microbial communities of the aftercrop [J]. Environmental Science, 2025,46(1):532-542.

(下转第322页)