

吉林省低山丘陵区侵蚀沟治理的碳汇作用

陈月, 张瑜, 崔斌, 岳航宇

(吉林省水土保持科学研究院, 吉林 长春 130033)

摘要: [目的] 科学评估黑土区侵蚀沟治理工程的碳汇作用, 为深入了解黑土区土壤侵蚀对碳汇作用的影响机制提供科学支撑。[方法] 于 2024 年秋季选取吉林省东部低山丘陵区两条不同治理年份(2017 和 2022 年)、不同立地条件(林地和耕地)的侵蚀沟为研究对象, 从保土保碳、减蚀减排、增绿增汇 3 方面定量评估其碳汇效应, 对侵蚀沟内淤积泥沙进行体积测量及有机碳、容重测试, 对乔灌木进行每木检尺。[结果] ①林地侵蚀沟 I 的保土减排增汇量为 1.602 0 t。其中, 保土保碳量为 0.564 1 t, 减蚀减排量为 0.112 8 t, 增绿增汇量为 0.925 1 t。耕地侵蚀沟 II 的保土减排增汇量为 1.474 8 t。其中, 保土保碳量为 1.162 0 t, 减蚀减排量为 0.232 4 t, 增绿增汇量为 0.080 4 t; ②侵蚀沟 I 的表层土壤(0—20 cm)有机碳含量和保土保碳量均显著高于其他土层($p < 0.05$), 呈现明显表聚性, 表层土壤保碳量比例最低达 42.29%; ③两条侵蚀沟的年均保土保碳量、减蚀减排量及增绿增汇量差异较大, 治理年限、土地利用类型及人为因素等是造成两条侵蚀沟各方面碳汇作用差异的主要原因; 林地侵蚀沟通过长期植被恢复实现高效增绿增汇, 而耕地侵蚀沟因耕作扰动增强了保土保碳效应。[结论] 黑土区侵蚀沟具有明显的保土保碳、减蚀减排、增绿增汇等碳汇作用, 通过合理配置工程及植物措施, 充分发挥各项措施功能, 能够显著提升黑土区侵蚀沟的碳汇作用与碳汇能力。

关键词: 侵蚀沟; 水土保持措施; 碳汇作用; 碳汇能力; 吉林省低山丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0029-08

中图分类号: S157.2

文献参数: 陈月, 张瑜, 崔斌, 等. 吉林省低山丘陵区侵蚀沟治理的碳汇作用[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 29-36. Chen Yue, Zhang Yu, Cui Bin, et al. Carbon sink function of erosion gully control in low mountain and hilly areas of Jilin Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 29-36.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.011

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.011

Carbon sink function of erosion gully control in low mountain and hilly areas of Jilin Province

Chen Yue, Zhang Yu, Cui Bin, Yue Hangyu

(Institute of Soil and Water Conservation of Jilin Province, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: [Objective] The carbon sink function of erosion gully control projects in black soil regions were analyzed in order to provide scientific support for understanding the mechanisms by which soil erosion affects carbon sink processes. [Methods] In autumn 2024, two erosion gullies in the low mountain and hilly area of eastern Jilin Province, with different treatment years (2017 and 2022) and site conditions (forest land and cultivated land), were selected as research objects. Their carbon sink effects were quantitatively evaluated from three aspects: soil conservation and carbon conservation, erosion reduction and emission reduction, and greening and carbon sink enhancement. Volume measurement, organic carbon content, and bulk density tests were conducted on the sediment accumulated in the gullies, and a tree-by-tree survey method was performed for trees and shrubs. [Results] ① The total amount of soil conservation, erosion and emission reduction, and greening and sink enhancement for gully I (forest land) was 1.602 0 t, including 0.564 1 t of soil and carbon conservation, 0.112 8 t of erosion and emission reduction, and 0.925 1 t of greening and carbon sink enhancement. For gully II

收稿日期: 2025-05-15

修回日期: 2025-09-17

采用日期: 2025-10-02

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土地沟蚀发展演变及防控体系构建与示范”(2024YFD1501204-5); 吉林省财政厅项目“吉林省侵蚀沟治理效益监测与评价”

第一作者: 陈月(1998—), 女(汉族), 吉林省四平市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土保持碳汇方面的研究。Email: 1160549781@qq.com。

通信作者: 张瑜(1980—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事黑土区水土保持研究。Email: 124058200@qq.com。

(cultivated land), the total amount was 1.474 8 t, with soil conservation and carbon conservation of 1.162 0 t, erosion and emission reduction of 0.232 4 t, and greening and carbon sink enhancement of 0.080 4 t. ② In gully I, the surface soil (0—20 cm) had significantly higher organic carbon content and soil carbon conservation than the other layers ($p < 0.05$), indicating obvious surface accumulation, with the proportion of carbon conservation in the surface soil reaching a minimum of 42.29%. ③ The two gullies exhibited large differences in their annual average amounts of soil and carbon conservation, erosion and emission reduction, and greening and carbon sink enhancement. Treatment duration, land use type, and human activities were the main factors causing the differences in carbon sink effects. The forest erosion gully achieved efficient greening and carbon sequestration through long-term vegetation restoration, whereas the farmland erosion gully enhanced soil and carbon conservation due to cultivation disturbance. [Conclusion] Gullies in the black soil area have obvious carbon sink functions, including soil conservation and carbon conservation, erosion reduction and emission reduction, and greening and carbon sink enhancement. Through rational allocation of engineering and plant measures, the carbon sink function and the carbon sink capacity of these gullies can be significantly enhanced.

Keywords: erosion gully; soil and water conservation measures; carbon sink function; carbon sink capacity; low mountain and hilly area of Jilin Province

东北黑土区是中国重要的农业生产基地和粮食生产区,以土壤有机质含量高而著称,是国内外学者的研究热点^[1]。但由于长期的高强度耕作,东北黑土区土壤侵蚀和退化日益严重^[2],加剧了侵蚀沟的形成,从而导致可耕作面积减少,植被生产力降低和土壤养分流失^[3-5],强烈影响生态系统碳循环过程^[6]。黑土区侵蚀沟的综合治理对于减少水土流失,提高土壤有机碳,巩固和提升生态系统碳汇能力具有重要意义。相关学者通过利用遥感解译数据构建侵蚀沟系统分类方法^[7],探究侵蚀沟与地形因素的关系^[8],评估秸秆覆盖技术对侵蚀沟的防护作用^[9],分析耕地切沟治理效果^[10]等,对黑土区侵蚀沟综合治理开展研究,为黑土区水土保持工作做出了重大贡献,但针对黑土区侵蚀沟治理碳汇作用方面仍缺乏探讨。目前已有研究者^[11]对水土保持碳汇功能与机理进行了系统的阐述,提出了保土保碳,减蚀减排,增绿增汇的概念框架。这一理论框架的核心在于通过水土保持措施降低碳流失,增加碳固定,最终实现区域碳平衡。据此,有学者对崩岗治理^[12]、梯田^[13]、小流域综合治理的碳汇作用^[14-15]以及水土保持措施^[16]展开了探索。

本研究主要利用上述水土保持碳汇的理论框架也能够对黑土区侵蚀沟的碳汇作用进行探讨,从而揭示黑土区特定土壤类型和特定侵蚀类型下的碳汇规律。通过实地调查选取2条吉林省东部低山丘陵区不同年份、不同立地条件的治理侵蚀沟为研究对象,定量分析侵蚀沟保土保碳,减蚀减排,增绿增汇等3个方面的碳汇作用,旨在深入了解黑土区土壤侵蚀对碳汇作用的影响机制,为科学评估黑土区侵蚀沟的碳汇能力提供理论指导。

1 研究区概况

研究区位于吉林省东辽县杏木小流域(125°22'40"—125°26'10"E,42°58'05"—43°01'40"N),地处长白山余脉,为吉林省典型低山丘陵区地貌类型,海拔高度为270~400 m。温带大陆性气候特征,四季分明。无霜期年平均135 d,年平均日照时数2 504.20 h,年平均降水量658.10 mm。主要土壤有暗棕壤、白浆土、冲积土等。水土流失类型为水力侵蚀,为国家级和省级水土流失重点治理区,土地利用类型以耕地和林地为主,耕地坡长而缓,主要种植作物为玉米(*Zea mays*),植被以落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea asperata*)、五角枫(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)为主。吉林省低山丘陵区侵蚀沟数量多,密度大,大部分侵蚀沟长度为100~300 m,宽度主要在5~10 m,其次为0~5 m,且侵蚀沟比降较大。本研究选取的侵蚀沟Ⅰ位于林地,2017年秋季开始治理;侵蚀沟Ⅱ位于耕地,2022年秋季开始治理(表1)。通过定期监测,两条侵蚀沟的沟头溯源、沟底下切以及沟岸扩张基本得到控制,各项治理措施均有效发挥了作用。两条侵蚀沟均位于吉林省低山丘陵区的中心区,且侵蚀沟长度、宽度等均在“中型侵蚀沟”的核心区间内,治理模式均为“工程+植物”协同模式,沟底比降较大,具有典型性和代表性。

2 材料与方法

2.1 样品采集与测定

土壤及植物样品的采集均于2024年秋季进行。

表 1 侵蚀沟基本信息

Table 1 Basic information of erosion gullies

样点编号	长度/m	平均沟宽/m	沟底比降/%	沟缘面积/hm ²	主要植被	治理模式
侵蚀沟 I	226.75	7.33	10.15	0.42	旱柳、火炬树、紫穗槐	沟头石笼防护+沟底石笼谷坊+沟岸柳桩护岸+沟坡、沟底造林
侵蚀沟 II	199.55	5.82	9.26	0.33	旱柳、紫穗槐、榛子	

注:表中植物学名分别为旱柳(*Salix matsudana*),火炬树(*Rhus typhina*),紫穗槐(*Amorpha fruticosa*),榛子(*Corylus heterophylla*)。

2.1.1 土壤样品

对两条侵蚀沟的谷坊所淤积泥沙进行分层采样,每层设置 3 次重复,按照淤积深度,去除地表的植被和杂物后,每隔 20 cm 采集约 500 g 土样装入贴好标签纸的自封袋中,并用体积为 100 cm³ 环刀采集各层原状土样。侵蚀沟 I 共采集 42 个土壤样品和 42 个环刀样品,侵蚀沟 II 共采集 51 个土壤样品和 51 个环刀样品。采用燃烧氧化-非分散红外法^[17]测定土壤样品中有机碳(SOC)含量,环刀法测定土壤容重。在每个谷坊淤积体的上、中、下部位取 3 个断面,分别测定淤积长度、厚度及宽度,计算谷坊淤积量。

2.1.2 植物样品

对侵蚀沟 I,侵蚀沟 II 区域内的乔木、灌木进行每木检尺,测定乔木树高、胸径,测定灌木种类、基径、株高、冠幅。乔木、灌木地上、地下生物量及含碳率等指标通过查阅《温室气体自愿减排项目方法学造林碳汇(CCER-14-001-V01)》^[18]附录获取。

2.2 数据计算与处理

2.2.1 侵蚀沟保土保碳量

侵蚀沟的保土保碳作用是指侵蚀沟中的土壤所保持的碳储量,即谷坊所拦蓄泥沙中储存的碳量所储存的碳量。计算公式为

$$C_p = \sum_{i=1}^n \left(V_{y,i} \cdot \rho_{y,i} \cdot S_{y,i} \times \frac{1}{10^5} \right) \quad (1)$$

式中: C_p 为侵蚀沟保土保碳量,单位(t); $V_{y,i}$ 为沟底第*i*层淤积泥沙的体积(m³); $\rho_{y,i}$ 为沟底第*i*层淤积土壤容重(g/cm³); $S_{y,i}$ 为沟底第*i*层淤积泥沙有机碳含量(g/kg);*i*为淤积泥沙分层采样和沟壁分层采样的总层数, $i=1,2,3,\dots,n$ 。

2.2.2 侵蚀沟减蚀减排量

侵蚀沟的减蚀减排作用是指侵蚀沟治理后所保持的土壤发生流失,流失土壤被矿化产生的排入大气中的碳量。计算公式为

$$C_R = C_p \cdot P \quad (2)$$

式中: C_R 为侵蚀沟减蚀减排量(t); C_p 为侵蚀沟保土保碳量(t); P 为土壤有机碳在搬运过程中矿化氧化的比例(%)。

2.2.3 侵蚀沟增绿增汇量

侵蚀沟的增绿增汇作用是指相比于不治理的侵蚀沟,治理侵蚀沟区域内所增加的碳储量,主要计算植物增汇。计算公式为

$$B_A = \sum_j \left[f(D_j, H_j) \times N_j \right] \times \frac{1}{10^3} \times \omega_j \quad (3)$$

$$B_S = \sum_j \left[f(x) \times N_j \right] \times \frac{1}{10^3} \times \omega_j \quad (4)$$

$$B = B_A + B_S \quad (5)$$

式中: B_A 为侵蚀沟乔木林增汇量(t); $f(D_j, H_j)$ 为乔木全株(或地上)生物量与胸径和树高的相关方程(kg/株); D_j 为乔木林树种*j*的平均胸径(cm); H_j 为乔木林树种*j*的平均树高(m); N_j 为树种*j*的株数(株); ω_j 为树种*j*的含碳率(%); B_S 为侵蚀沟灌木林增汇量(t); $f(x)$ 为灌木生物量与测树因子(基径、灌高、冠幅等)的相关方程,不同树种的 $f(x)$ 方程详见表 2; B 为侵蚀沟植物增汇量(t)。

表 2 树种含碳系数和生物量模型公式

Table 2 Formulas for carbon coefficients and biomass models of tree species

树种	含碳率	生物量计算公式
旱柳	$w_{地上}=0.475 0$	$M_{地上}=119.163 2 \times (D^2 \cdot H)^{0.8542} \times 0.001$
	$w_{地下}=0.468 5$	$M_{地下}=R \cdot M_{地上}$
火炬树	$w_{地上}=0.475 0$	$M_{地上}=119.163 2 \times (D^2 \cdot H)^{0.8542} \times 0.001$
	$w_{地下}=0.468 5$	$M_{地下}=R \cdot M_{地上}$
榛子	$w_{地上}=0.489 7$	$M_{地上}=0.032 3 \times D_H^{0.7954} \times 1.218 7$
	$w_{地下}=0.477 9$	$M_{地下}=-0.002 6+0.022 5 \times D_H$
紫穗槐	$w_{地上}=0.489 7$	$M_{地上}=0.032 3 \times D_H^{0.7954} \times 1.218 7$
	$w_{地下}=0.477 9$	$M_{地下}=-0.002 6+0.022 5 \times D_H$

注: M 为单株生物量(kg); D 为胸径(cm); H 为树高(m); R 为地下生物量与地上生物量的比值; D_H 为基径平方与株高的乘积。

2.2.4 侵蚀沟治理保土减排增汇量

侵蚀沟治理的保土减排增汇量是指侵蚀沟保土保碳量、减蚀减排量、增绿增汇量之和。计算公式为

$$C = C_p + C_R + B \quad (6)$$

式中: C 为侵蚀沟治理保土减排增汇量(t)。

2.2.5 数据处理及分析

利用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行预处理,通过 IBM SPSS 22.0 进行数据分析,并由 Origin 2021 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 侵蚀沟保土保碳量与减蚀减排量

两条侵蚀沟的谷坊均有一定量的泥沙淤积,对每个谷坊所淤积泥沙的体积进行测量,得出侵蚀沟 I 的谷坊淤积体积为 34.50 m^3 ,侵蚀沟 II 的谷坊淤积体积为 68.45 m^3 。由图 1—2 可知,侵蚀沟 I 每个谷

坊不同土层深度的有机碳含量存在显著差异($p < 0.001$),表现为表层(0—20 cm)土壤有机碳含量极显著高于深层土壤有机碳含量,侵蚀沟 II 的各层土壤有机碳含量则无上述规律。根据公式(1)可计算出侵蚀沟谷坊各层土壤保碳量,结果表明侵蚀沟 I 的表层(0—20 cm)土壤保碳量均显著高于深层土壤保碳量($p < 0.05$),表层土壤保碳量比例最低为 42.29% (表 3)。计算各谷坊的保碳量得出侵蚀沟 I 的保土保碳量为 0.564 1 t,年平均保土保碳量为 0.080 6 t;侵蚀沟 II 的保土保碳量为 1.162 0 t,年平均保土保碳量为 0.581 0 t。

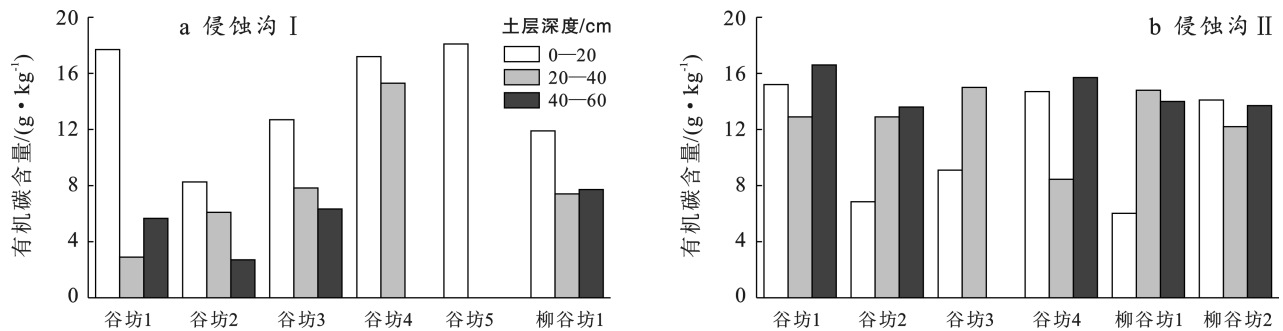


图 1 两条治理侵蚀沟不同土层有机碳含量

Fig.1 Organic carbon content in different soil layers of two controlled erosion gullies

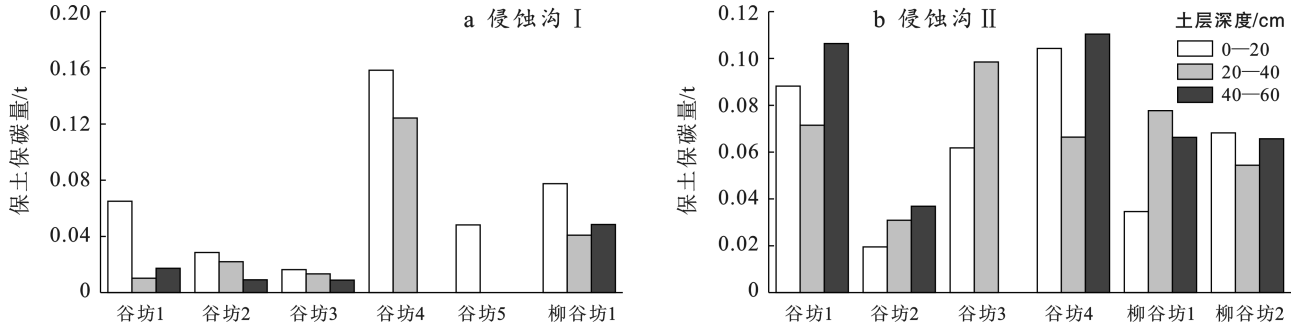


图 2 两条治理侵蚀沟不同土层保碳量

Fig.2 Carbon sequestration amount in different soil layers of two controlled erosion gullies

表 3 两条治理侵蚀沟谷坊保土保碳量统计

Table 3 Statistics on soil and carbon conservation amounts by check dams in two controlled erosion gullies

侵蚀沟编号	项目	谷坊 1	谷坊 2	谷坊 3	谷坊 4	谷坊 5	柳谷坊 1	柳谷坊 2	合计
侵蚀沟 I	保碳量/t	0.092 5	0.059 5	0.038 5	0.158 3	0.048 3	0.167 0		0.564 1
	表层(0—20 cm)保碳量比例/%	72.26	47.92	42.29	58.63	100.00	46.41		
侵蚀沟 II	保碳量/t	0.266 1	0.087 5	0.160 4	0.281 1		0.246 8	0.120 1	1.162 0
	表层(0—20 cm)保碳量比例/%	33.16	22.41	38.56	37.10		13.99	45.27	

根据前人^[19]研究,土壤有机碳在流失过程中被氧化矿化的比例为 20%~40%,本文 p 值取 20%,3.1 中得出侵蚀沟 I,侵蚀沟 II 的保土保碳量分别为 0.564 1 和 1.162 0 t,根据公式(2)可计算出侵蚀沟 I 的减蚀减排量为 0.112 8 t,年平均减蚀减排量为

0.016 1 t;侵蚀沟 II 的减蚀减排量为 0.232 4 t,年平均减蚀减排量为 0.116 2 t。

3.2 侵蚀沟增绿增汇量

实地调查侵蚀沟 I,侵蚀沟 II 内的植物种类及株数,统计侵蚀沟 I 区域内乔木为旱柳 50 株、火炬树

30 株,灌木为紫穗槐 50 株;侵蚀沟 II 乔木为旱柳 100 株,灌木为紫穗槐 80 株,榛子 60 株。每木检尺得出各树种胸径、树高、基径等指标,查阅《温室气体自愿减排项目方法学造林碳汇》中林分生物量碳计量模型与含碳系数(表 2),得出侵蚀沟 I 旱柳地上生物量为 1 362.545 2 kg,地下生物量为 366.524 6 kg;

火炬树地上生物量为 150.967 2 kg,地下生物量为 40.610 2 kg;紫穗槐地上生物量为 16.399 5 kg,地下生物量为 16.041 9 kg。根据公式(3)—(5)计算可得侵蚀沟 I 植物碳储量为 0.925 1 t,年平均值为 0.132 2 t;同理可得侵蚀沟 II 植物碳储量为 0.080 4 t,年平均值为 0.040 2 t。各指标值详见表 4。

表 4 两条侵蚀沟不同植物指标值
Table 4 Plant index values of two erosion gullies

侵蚀沟编号	树种	平均胸径/cm	平均树高/m	平均基径/cm	平均灌高/m	平均冠幅/m	单株地上生物量/kg	单株地下生物量/kg	地上生物量/kg	地下生物量/kg	碳储量/t
侵蚀沟 I	柳树	8.5	8				27.250 9	7.330 5	1 362.545 2	366.524 6	0.818 7
	火炬树	4	5				5.032 2	0.812 2	150.967 2	40.610 2	0.090 7
	紫穗槐			2.5	2.3	1.4	0.328	0.320 8	16.399 5	16.041 9	0.015 7
	合计								1 529.911 9	423.176 7	0.925 1
侵蚀沟 II	柳树	2	3				0.995 4	0.267 7	99.535 7	26.775 1	0.059 8
	紫穗槐			2	2.5	3	0.245 8	0.222 4	19.660 3	17.792	0.018 1
	榛子			1	1.5	1	0.054 3	0.031 1	3.260 7	1.869	0.002 5
	合计								122.456 7	46.436 1	0.080 4

3.3 侵蚀沟治理保土减排增汇量

根据上文的研究结果及图 3,侵蚀沟 II 在土壤保持与碳固定方面的成效显著,单位治理年限的保土保碳量达到 0.581 0 t,同时在减少土壤侵蚀与碳排放方面也实现了 0.116 2 t 的减蚀减排量,二者合计的碳汇贡献比例高达 94.55%。上述指标分别为侵蚀沟 I 对应数值(保土保碳量 0.080 6 t/a,减蚀减排量 0.016 1 t/a,碳汇贡献比例 42.25%)的 7.2, 7.2 和 2.2 倍,其中保土保碳与减蚀减排量的优势尤为显著,倍数均超 7 倍。

相反,在增绿增汇方面,侵蚀沟 I 展现出显著优势,其单位治理年限增绿增汇量达到 0.132 2 t,对应碳汇贡献比例为 57.75%。而侵蚀沟 II 的增绿增汇碳汇贡献比例仅为 5.45%,侵蚀沟 I 的贡献比例是侵蚀沟 II 的 11 倍,且单位治理年限增绿增汇量远高于后者,充分体现长期植被恢复对林地侵蚀沟碳汇的核心支撑作用。利用公式(6)进行计算得出侵蚀沟 I 的保土减排增汇量为 1.602 0 t,年平均值为 0.228 9 t;侵蚀沟 II 的保土减排增汇量为 1.474 8 t,年平均值为 0.210 7 t。

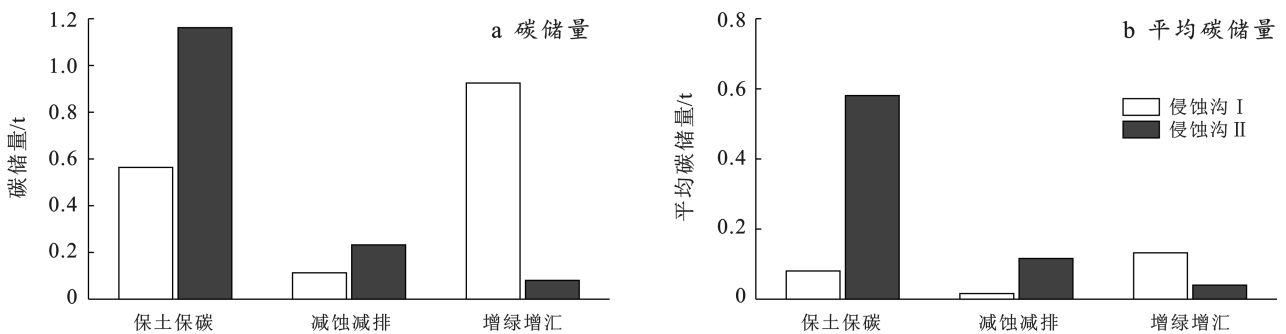


图 3 两条侵蚀沟碳汇作用对比
Fig.3 Comparison of carbon sink functions between two erosion gullies

4 讨论

东北黑土区侵蚀沟主要分布在耕地上,耕地面积虽然仅占东北黑土区总面积的三成但集中近 3/4 的侵蚀沟。本研究中侵蚀沟 II 各层土壤有机碳含量均表现出较高水平,且随土层深度增加无明显规律

性,年均保土保碳量和减蚀减排量均高于侵蚀沟 I,甚至达到 7 倍之多。这是因为侵蚀沟 II 位于耕地中,在播种期和收获期可能受机械或人为扰动影响,土壤结构被破坏,表层高活性有机碳土壤更易被水力搬运至谷坊,使谷坊拦蓄了更多的耕地中有机质丰富的表层土,因此出现上述结果。相反,侵蚀沟 I 位

于林地中,受人为扰动影响相对较小。土壤有机碳含量及保土保碳量均具有明显的层次性,0—20 cm 土层的有机碳含量和保碳量均显著高于其他土层,且随着土层深度增加,二者含量均逐渐降低。有机碳及保碳量变化与许明祥等^[20]、郭艳杰等^[21]研究人工林的土壤养分特征所取得的成果保持一致,即土壤养分及有机碳均呈现出表聚性(0—20 cm),且随土层深度增加逐渐降低最终保持稳定水平。马瑞等^[22]以黄土丘陵沟壑区典型县域为研究对象,探讨耕地、草地、林地 0—80 cm 土层有机碳含量,研究表明,区域差异和土地利用类型对土壤有机碳含量的积累影响显著。本研究中,两条侵蚀沟的年均保土保碳量相差较大,说明不同土地利用类型(林地和耕地)及人为因素对侵蚀沟保土保碳量的积累具有一定影响。根据前人研究,土壤有机碳在流失过程中被氧化矿化的比例为 20%~40%,保守估计,本文中 p 值取下限值 20%,可避免高估碳损失,使研究结果具有稳健性。

植物措施是侵蚀沟治理的重要措施。严重的水土流失直接造成植被退化,且水土流失地区的植被碳储量远低于植被条件好的区域^[23]。东北黑土区侵蚀沟治理植物措施中,一般选择根系萌蘖力强、抗冲蚀且耐贫瘠的树种,多选用水土保持效果好的紫穗槐、柳树、榛子等^[24-25]。植物在生长过程中通过光合作用不断吸收大气中的 CO_2 ,发挥固碳释氧功能,形成地上、地下生物量储存在植物体内,是侵蚀沟治理中主要的碳汇来源。本研究中,两条侵蚀沟均产生了明显的植物增汇量,侵蚀沟 I 中植株数量更少,但年均植被碳储量远高于侵蚀沟 II,这是因为侵蚀沟 I 开始治理的时间较早,随着时间的推移,植物净光合作用产生的有机质会逐渐积累,使得植物生物量逐年增加。同时,侵蚀沟 II 受扰动影响,紫穗槐等灌木根系易被翻耕破坏,导致植被生物量增长缓慢,植被碳汇积累受到抑制。许小明^[26]研究黄土丘陵地貌区不同植被恢复方式的生态系统固碳功能发现,植被长期恢复产生的碳汇效应更加明显。Yao Xiong 等^[27]研究表明,土壤侵蚀水平和造林对土壤有机碳储量有显著影响,土壤有机碳含量随侵蚀的增加而显著下降,但随着造林时间的增加而显著增加。上述相关研究表明,对侵蚀沟治理采取植物措施既能减缓土壤侵蚀、阻挡泥沙流动,又能产生碳积累、增加碳汇,且植被生长时间越长,产生的碳汇量越高,与本研究中侵蚀沟 I 植物增汇量更高的结果保持一致。李智广等^[11]提出的增绿增汇作用包括植物增汇

和土壤增汇两部分,本研究只讨论了侵蚀沟植物增汇作用,因未获取基线情景下的侵蚀沟土壤有机碳含量等指标值,故未对土壤增汇部分进行探讨,未来研究可增加对此部分内容的核算。

经计算,侵蚀沟 I 的年均保土减排增汇量达到 0.228 9 t,略高于侵蚀沟 II 的年均值 0.210 7 t。总体而言,两条侵蚀沟的沟道特征差异并不显著。值得注意的是,与侵蚀沟 II 相比,侵蚀沟 I 的治理年限更长,有机碳积累时间更久,产生的增绿增汇量也更高。然而,由于受到了人为扰动因素的影响,侵蚀沟 II 产生了更高的保土保碳量及减蚀减排量。根据计算结果可知,侵蚀沟 I 植物措施的碳汇贡献比例为 57.75%,工程措施(保土保碳+减蚀减排)的碳汇贡献比例为 42.25%,保土减排增汇量主要来源于增绿增汇作用。侵蚀沟 II 工程措施的碳汇贡献比例为 94.55%,植物措施的碳汇贡献比例为 5.45%,保土减排增汇量主要来源于保土保碳及减蚀减排作用。因此,侵蚀沟 I 在增绿增汇方面展现出更为突出的能力,碳汇作用依赖植物措施的长期积累,侵蚀沟 II 的保土保碳能力更强,碳汇作用以工程措施的短期保土为主。此外,本研究得出的侵蚀沟保土保碳量及增绿增汇量均小于崩岗^[12]、罗地河小流域^[14]的对应指标值,这是因为黑土区沟道长度 100~500 m 的侵蚀沟占 69.49%,中型沟的数量更多,本研究中两条侵蚀沟均属于中型沟,沟缘面积较小,且沟道治理时间短,有机碳积累少,植被均属于幼龄阔叶树种,其碳储量及碳汇能力均低于针叶林和针阔混交林^[28-29],故本研究得出的两项指标值更低。综上所述,治理侵蚀沟应采用“工程措施+植物措施”协同模式,侧重植物长期碳汇、强化工程短期保土,兼顾碳汇量与稳定性,为碳储量的增加及碳汇能力的提升做出贡献。此外,在研究碳汇作用与能力时,应根据具体情况综合考虑治理年限、土地利用类型及人为因素等进行分析。

本研究中考虑春季耕作、施肥及喷洒农药等会对样品采集和测定产生影响,故选择秋季进行野外调查。且现场调查发现,两条侵蚀沟的谷坊仍有淤积空间,植被生长状况较好,可继续积累生物量,因此,两条侵蚀沟的碳汇能力和作用均具有较大提升空间。未来研究中可考虑从不同季节角度持续关注两条侵蚀沟的保土减排增汇量变化,并开展土壤有机碳组分分析,探究碳组分与碳汇量的关联机制,从微观层面量化耕作扰动对碳汇功能的影响路径,弥补本研究中存在的不足,为东北黑土区侵蚀沟碳汇作用的后续研究提供数据支撑。

5 结论

(1) 侵蚀沟治理具有保土保碳,减蚀减排,增绿增汇等方面碳汇作用。两条治理侵蚀沟的保土减排增汇量分别为 1.602 0 和 1.474 8 t。其中,侵蚀沟 I 的保土保碳量为 0.564 1 t,减蚀减排量为 0.112 8 t,增绿增汇量为 0.925 1 t;侵蚀沟 II 的保土保碳量为 1.162 0 t,减蚀减排量为 0.232 4 t,增绿增汇量为 0.080 4 t。

(2) 侵蚀沟 I 的表层土壤(0—20 cm)有机碳含量和保碳量均显著高于其他土层($p < 0.05$),表层土壤保碳量比例最低达 42.29%,各土层均发挥了明显的保碳效益。

(3) 侵蚀沟 I 植物措施的碳汇贡献比例为 57.75%,工程措施的碳汇贡献比例为 42.25%。侵蚀沟 II 工程措施的碳汇贡献比例为 94.55%,植物措施的碳汇贡献比例为 5.45%。两条侵蚀沟的治理年限、土地利用类型及人为因素影响是造成保土保碳、减蚀减排及增绿增汇等碳汇作用及贡献差异的主要原因。

参考文献(References)

- [1] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
Han Xiaozeng, Li Na. Research progress of black soil in northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7):1032-1041.
- [2] 宋阳,刘连友,严平.风水复合侵蚀研究述评[J].地理学报,2006,61(1):77-88.
Song Yang, Liu Lianyou, Yan Ping. A review on complex erosion by wind and water research [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1):77-88.
- [3] 白建宏,回莉君.东北黑土区侵蚀沟发展与危害初步调查[J].中国水土保持,2015(8):68-70.
Bai Jianhong, Hui Lijun. Preliminary investigation on the development and harm of erosion gully in black soil area of northeast China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(8):68-70.
- [4] 阎百兴,杨育红,刘兴土,等.东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J].中国水土保持,2008(12):26-30.
Yan Baixing, Yang Yuhong, Liu Xingtu, et al. Present situation and evolution trend of soil erosion in black soil region of northeast China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12):26-30.
- [5] 张桃林,王兴祥.土壤退化研究的进展与趋向[J].自然资源学报,2000,15(3):280-284.
Zhang Taolin, Wang Xingxiang. Development and orientation of research work on soil degradation [J]. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(3):280-284.
- [6] 余新晓,贾国栋,郑鹏飞.碳中和的水土保持实现途径和对策[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):138-144.
Yu Xinxiao, Jia Guodong, Zheng Pengfei. Ways and countermeasures to achieve carbon-neutral in soil and water conservation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(6):138-144.
- [7] 李全峰,李吉程,于明鹏,等.东北典型黑土区耕地侵蚀沟形态系统分类方法构建[J].农业工程学报,2024,40(14):53-61.
Li Quanfeng, Li Jicheng, Yu Mingpeng, et al. Systematic morphological classification method for cultivated land erosion gullies in the typical black soil regions of Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(14):53-61.
- [8] 刘肃,崔斌,张瑜,等.吉林省低山丘陵区地形因素对坡耕地侵蚀沟分布的影响[J].水土保持通报,2020,40(1):38-42.
Liu Su, Cui Bin, Zhang Yu, et al. Effects of topographical factors on erosion gully distribution of farmland in hilly areas of Jilin Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1):38-42.
- [9] 张瑜,刘肃,徐子棋,等.秸秆覆盖对黑土区侵蚀沟植被恢复和固土的作用[J].水土保持通报,2020,40(1):157-161.
Zhang Yu, Liu Su, Xu Ziqi, et al. Effects of straw mulching on vegetation restoration and soil loss control on eroded gullies in black soil area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(1):157-161.
- [10] 梁彦荣,张岩,李坤衡,等.基于高分遥感调查东北黑土区10年尺度切沟治理效果[J].水土保持研究,2024,31(6):67-73.
Liang Yanrong, Zhang Yan, Li Kunheng, et al. Investigation on the effects of gully control in China's black soil region over a 10-year scale based on high-resolution remote sensing [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6):67-73.
- [11] 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, Wang Junxiong. 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.
- [12] 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(中英文),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.

- ervation, 2024, 22(2):146-153.
- [13] 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.
- [14] 钟小剑, 成辉, 李智广, 等. 小流域综合治理水土保持碳汇能力监测评价: 以福建省长汀县罗地河小流域为例[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5):304-311.
Zhong Xiaojian, Cheng Hui, Li Zhiguang, et al. Monitoring and evaluating carbon sink capacity for comprehensive management of soil and water conservation in small watersheds: A case study at luodihe small watershed of Changting County, Fujian Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43 (5) : 304-311.
- [15] 张西宁, 曹丹, 李超, 等. 南小河河流域水土保持碳汇能力评估研究[J]. 人民黄河, 2025, 47(3):117-122.
Zhang Xining, Cao Dan, Li Chao, et al. Evaluation of carbon sink capacity of soil and water conservation in Nanxiaohegou watershed [J]. Yellow River, 2025, 47 (3):117-122.
- [16] 张国军, 马文涛, 魏小燕, 等. 宁夏水土保持措施碳汇能力现状评估[J]. 人民黄河, 2025, 47(4):120-126.
Zhang Guojun, Ma Wentao, Wei Xiaoyan, et al. Assessment of carbon sink capacity of soil and water conservation measures in Ningxia [J]. Yellow River, 2025, 47(4):120-126.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. 土壤有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外法: HJ 695—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil-Determination of Organic carbon-Combustion Oxidation Nondispersive Infrared Absorption Method: HJ 695—2014 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [18] 生态环境部办公厅. 关于印发《温室气体自愿减排项目方法学造林碳汇(CCER-14-001-V01)》等 4 项方法学的通知[EB/OL]. 北京: 生态环境部办公厅, 2023 [2025-10-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231024_1043877.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the issuance of four methodologies for voluntary emission reduction projects of greenhouse gases, including "methodology for afforestation carbon sink (CCER-14-001-V01)" [EB/OL]. 北京: 生态环境部办公厅, 2023 [2025-10-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231024_1043877.html.
- [19] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003, 29(4):437-450.
- [20] 许明祥, 刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1):40-46.
Xu Mingxiang, Liu Guobin. The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest land in the hilly Loess Plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2004, 10(1) : 40-46.
- [21] 郭艳杰, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 不同密度油松林地土壤水碳分布特征及其耦合关系[J]. 应用生态学报, 2025, 36(1):50-58.
Guo Yanjie, Bi Huaxing, Zhao Danyang, et al. Soil water and carbon distribution characteristics and their coupling relationship in *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1):50-58.
- [22] 马瑞, 李旭强, 帖聪晓, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型下土壤有机碳分布特征及影响因子[J/OL]. 农业资源与环境学报, 2024:1-12.(2024-11-11) [2025-10-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2024.0510>.
Ma Rui, Li Xuqiang, Tie Congxiao, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in different land use types in the loess hilly-gully region [J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024: 1-12.(2024-11-11) [2025-10-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2024.0510>.
- [23] 崔利论, 袁文平, 张海成. 土壤侵蚀对陆地生态系统碳源汇的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6):816-822.
Cui Lilun, Yuan Wenping, Zhang Haicheng. Soil erosion effect on terrestrial ecosystem carbon source and sink [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(6):816-822.
- [24] 陈靖天, 仝如强, 张成龙, 等. 东北黑土区侵蚀沟治理两种常用灌木栽植技术研究[J]. 中国水土保持, 2022(11):18-23.
Chen Jingtian, Tong Ruqiang, Zhang Chenglong, et al. Planting techniques of two common shrubs for controlling erosion gully in northeast black soil region [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(11):18-23.
- [25] 严尔梅, 孙中锋, 欧阳力, 等. 黑龙江省侵蚀沟治理植物措施配置模式探讨[J]. 中国水土保持, 2024(1):34-37.
Yan Ermei, Sun Zhongfeng, Ouyang Li, et al. Arrangement model of plant measures for control of erosion gully in Heilongjiang Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(1):34-37.

- Feng Yu, Wang Yuqing, Li Yuankai, et al. Relationship between functional characters of *Populus euphratica* leaves and soil factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4):1717-1726.
- [22] 何浩,李瑞,王红永,等.河西走廊荒漠绿洲过渡带沙丘不同固定阶段泡泡刺叶性状特征[J].*生态学报*,2025,45(3):1417-1428.
- He Hao, Li Rui, Wang Hongyong, et al. Characteristics of bubble thorn leaves at different fixed stages of sand dunes in desert-oasis transitional zone of Hexi Corridor [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025,45(3):1417-1428.
- [23] Blumenthal D M, Mueller K E, Kray J A, et al. Traits link drought resistance with herbivore defence and plant economics in semi-arid grasslands: The central roles of phenology and leaf dry matter content [J]. *Journal of Ecology*, 2020,108(6):2336-2351.
- [24] 郑莉莉,余林兰,戴萍,等.广西大石围天坑群植物叶片养分特征及其适应性[J].*植物生态学报*,2024,48(7):872-887.
- Zheng Lili, Yu Linlan, Dai Ping, et al. Nutrient characteristics and adaptability of leaves of plants in Dashiwei Tiankeng Group in Guangxi [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024,48(7):872-887.
- [25] 马献发,宋凤斌,张继舟.根系对土壤环境胁迫响应的研究进展[J].*中国农学通报*,2011,27(5):44-48.
- Ma Xianfa, Song Fengbin, Zhang Jizhou. Research progress of root system response to soil environmental stress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5):44-48.
- [26] Carmona C P, Bueno C G, Toussaint A, et al. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function [J]. *Nature*, 2021,597(7878):683-687.
- [27] 李小乐,党晓宏,翟波,等.白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛不定根构型特征及生物量分配模式[J].*中国沙漠*,2022,42(4):172-180.
- Li Xiaole, Dang Xiaohong, Zhai Bo, et al. Configuration characteristics and biomass allocation model of adventitious roots in *Nitraria tangutorum* shrub [J]. *Journal of Desert Research*, 2022,42(4):172-180.
- [28] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems [J]. *New Phytologist*, 1987,106(S1):61-77.
- [29] 陈永乐,张志山,吴攀,等.腾格里沙漠东南缘不同年代固沙区根系分布[J].*中国沙漠*,2013,33(2):515-521.
- Chen Yongle, Zhang Zhishan, Wu Pan, et al. Root distribution of sand binding vegetation in the southeastern Tengger Desert, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013,33(2):515-521.
- [30] 单立山,苏铭,张正中,等.不同生境下荒漠植物红砂-珍珠猪毛菜混生根系的垂直分布规律[J].*植物生态学报*,2018,42(4):475-486.
- Shan Lishan, Su Ming, Zhang Zhengzhong, et al. Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018,42(4):475-486.
- [31] 李小乐,魏亚娟,党晓宏,等.红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J].*干旱区研究*,2022,39(3):933-942.
- Li Xiaole, Wei Yajuan, Dang Xiaohong, et al. Characteristics of soil particle size composition and nutrient accumulation in red sand shrub sand pile [J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(3):933-942.
- [32] Grime J P. Competitive exclusion in herbaceous vegetation [J]. *Nature*, 1973,242(5396):344-347.
- [33] Tilman D. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities* [M]. Princeton, N. J. Princeton University Press, 1988.

(上接第 36 页)

- [26] 许小明.黄土丘陵区不同植被恢复方式的土壤生态水文效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- Xu Xiaoming. Soil eco-hydrological effects of different vegetation restoration patterns in the loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022.
- [27] Yao Xiong, Yu Kunyong, Wang Guangyu, et al. Effects of soil erosion and reforestation on soil respiration, organic carbon and nitrogen stocks in an eroded area of southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,683:98-108.
- [28] 王义贵,徐干君,白明,等.巫山针叶林与阔叶林乔灌草结构特征及碳汇功能对比[J].*中南林业科技大学学报*,2023,43(10):98-106.
- Wang Yigui, Xu Ganjun, Bai Ming, et al. Comparison of structural characteristics and carbon sink functions between trees, shrubs and herbs of coniferous and broad-leaf forests in Wushan [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023,43(10):98-106.
- [29] 王文杰,王凯,王媛媛,等.东北针叶林与阔叶林乔灌草组成特征及碳汇功能对比研究[J].*北京林业大学学报*,2022,44(10):52-67.
- Wang Wenjie, Wang Kai, Wang Yuanyuan, et al. Comparative study on tree, shrub and herb composition and carbon sink function between coniferous and broad-leaved forests in northeast China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022,44(10):52-67.