# 中国沙棘在祁连山东段北麓的生长特性及其对水土保持因子的影响

刘光武[1,2], 段晓峰[1,2], 马新兵[1,2], 罗 园[1,2], 王理德[1], 宋 峰[3]
(1.甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省民勤治沙综合试验站,
甘肃 民勤 733009; 3.甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心上房寺自然保护站, 甘肃 武威 733000)

**摘 要:** [目的] 明确中国沙棘在祁连山东段北麓的生长特性、适应规律、水土保持功能及工程应用潜力,为该区域生态脆弱区植被恢复、水土流失防治与放牧管理提供科学依据。[方法] 采用样方调查与试验分析相结合的方法,系统研究不同树龄沙棘的根蘖繁殖特性、抗动物干扰能力,及其对土壤含水量、养分含量、水稳性团聚体含量及根长密度的影响。并首次针对祁连山东段北麓这一水力侵蚀主导的生态脆弱区,量化揭示了中国沙棘根蘖繁殖与抗动物干扰性的耦合关系,明确其对20—80 cm深层土壤含水率的提升效应(最高达66.68%)和固土防蚀效应,建立了"沙棘生物围栏-乔木林带"复合防护体系配置参数。[结果] ①沙棘根蘖性随树龄递增,1~3 a以自身生长为主,5 a后大量繁殖,7 a生根蘖苗密度达0.23株/m$^2$,株高108.6 cm,与母株最远距离4.2 m; ②抗动物干扰性与树龄、群落密度呈正相关,1~7 a为关键发育积累期,9年生群落密度2.83株/m$^2$,盖度82%,可形成物理屏障阻断动物干扰; ③沙棘生长显著改善土壤水土保持性能:20—80 cm土层含水率相对提高30.90%~66.68%,0—20 cm土层水稳性团聚体含量(>0.25 mm)达68.3%(对照区42.5%),根长密度(0—40 cm)达12.6 cm/cm$^3$(对照区2.1 cm/cm$^3$);18年生沙棘根际土壤有机质8.69%,全氮0.54%,速效磷3.15 mg/100 g。[结论] 中国沙棘在该区域具有强根蘖繁殖力、显著阶段性抗干扰能力及突出固土防蚀效应,可作为水土保持植被恢复优选物种。

**关键词:** 中国沙棘; 根蘖性; 抗动物干扰性; 土壤抗蚀性; 根长密度; 水土保持; 祁连山东段北麓
**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0011-10 **中图分类号:** S714.7, S793.9, S157.2

**文献参数:** 刘光武, 段晓峰, 马新兵, 等.中国沙棘在祁连山东段北麓的生长特性及其对水土保持因子的影响[J].水土保持通报, 2026, 46(3): 11-20. Liu Guangwu, Duan Xiaofeng, Ma Xinbing, et al. Growth characteristics of *Hippophae rhamnoides* and its impact on soil and water conservation factors at northern foothills of eastern section of Qilian Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(3): 11-20.
**DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.041** **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.041**

# Growth characteristics of *Hippophae rhamnoides* and its impact on soil and water conservation factors at northern foothills of eastern section of Qilian Mountains

Liu Guangwu[1,2], Duan Xiaofeng[1,2], Ma Xinbing[1,2], Luo Yuan[1,2], Wang Lide[1], Song Feng[3]
(1.*Gansu Desert Control Institute*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*; 2.*Minqin Comprehensive Experimental Station of Desert Control in Gansu Province*, *Minqin*, *Gansu* 733009, *China*; 3.*Shangfangsi Nature Reserve Station*, *Management and Protection Center of Gansu Qilian Mountains National Nature Reserve*, *Wuwei*, *Gansu* 733000, *China*)

**Abstract:** [Objective] The growth characteristics, adaptation patterns, soil and water conservation functions, and engineering application potential of *Hippophae rhamnoides* at the northern foothills of the eastern section of the Qilian Mountains were clarified in order to provide a scientific basis for vegetation restoration, soil erosion control, and grazing management in the ecologically fragile areas. [Methods] Using a combination of quadrat survey and experimental analysis, this study systematically investigated the root suckering propagation characteristics and resistance to animal disturbance of *H. rhamnoides* at different ages, as well as their impact on soil water content, nutrient content, water-stable aggregate content, and root length density. For the first time, focusing on the

**收稿日期:** 2025-10-18 **修回日期:** 2026-01-22 **采用日期:** 2026-01-30
**资助项目:** 甘肃省2023年草原生态修复治理科技支撑项目"祁连山东段北麓退化草地修复技术研究与示范"(甘林草函(2023)255-3-2); 甘肃省级人才重点项目"基于'两山'理念的祁连山及石羊河流域生态修复关键技术研究及团队建设"(GZTZ20240415)
**第一作者:** 刘光武(1971—),男(汉族),甘肃省武威市人,硕士,正高级工程师,主要从事草、畜产业和沙产业研究。Email:1415334501@qq.com。

ecologically fragile area dominated by hydraulic erosion at the northern foothills of the eastern section of the Qilian Mountains, this study quantitatively revealed the coupling relationship between root suckering propagation and resistance to animal disturbance of *H. rhamnoides*, clarified its enhancing effect on deep soil (20—80 cm) water content (up to 66.68%) and soil-fixing and erosion-preventing effects, and established the configuration parameters of the '*H. rhamnoides* biological fence-arbor forest belt' composite protection system. [Results] ① The root suckering capacity of *H. rhamnoides* increased with tree age. 1—3-year-old plants mainly focused on self-growth, large-scale propagation began after 5 years. At 7 years, the density of root sucker seedlings reached 0.23 plants/$m^2$, with a plant height of 108.6 cm, and the maximum distance from the parent plant was 4.2 m. ② Resistance to animal disturbance was positively correlated with tree age and community density. The 1—7-year period was the key developmental accumulation stage. In 9th year, the community density was 2.83 plants/$m^2$ with 82% coverage, forming a physical barrier to block animal disturbance. ③ *H. rhamnoides* growth significantly improved soil and water conservation performance. Soil water content in 20—80 cm layer increased by 30.90%—66.68%, water-stable aggregate content (>0.25 mm) in 0—20 cm layer reached 68.3% (42.5% in the control area), and root length density (0—40 cm) reached 12.6 cm/$cm^3$ (2.1 cm/$cm^3$ in the control area). The rhizosphere soil of 18-year-old *H. rhamnoides* contained 8.69% organic matter, 0.54% total nitrogen, and 3.15 mg/100 g available phosphorus. [Conclusion] *H. rhamnoides* in the study area has strong root suckering propagation capacity, significant stage-specific resistance to animal disturbance, and remarkable soil-fixing and erosion-preventing effects, and can be used as a preferred species for vegetation restoration in soil and water conservation.

**Keywords**: ***Hippophae rhamnoides***; **root suckering capacity**; **resistance to animal disturbance**; **soil anti-erodibility**; **root length density**; **soil and water conservation**; **northern foothills of eastern section of Qilian Mountains**

中国沙棘(*Hippophae* rhamnoides)是胡颓子科沙棘属多年生灌木,广泛分布于中国北方西部干旱、半干旱及高寒地带,具有极强生态适应性,耐寒、耐旱、耐瘠薄[1]。其根系发达,萌蘖性强,能快速形成密集灌丛,通过根系固土,枯枝落叶截流减沙,在水力与风力侵蚀区发挥关键水土保持作用[2],是黄土高原、祁连山等生态脆弱区水土流失防治的先锋物种[3]。沙棘还具较高经济价值,果实富含多种维生素、矿物质及生物活性成分,可用于食品、医药、化妆品等领域[4-6],叶片可作为饲料或饲料添加剂。

祁连山东段北麓是黄土高原向青藏高原过渡的关键生态纽带,也是河西走廊东部水土流失重点防控区,区域以水力侵蚀为主(局部伴生重力侵蚀),年均土壤侵蚀模数1 500~3 000 t/($km^2$·a),该区域坡地裸地土壤流失量是灌丛覆盖区的8~12倍[7],在维持区域生态平衡、涵养水源及水土流失防治中至关重要。中国沙棘是该区域常见灌丛植被,对部分乔木群落的形成、更新与演替有促进作用[8],其灌丛结构可使地表径流速度降低40%~60%,减少土壤侵蚀[9],是森林植被修复与水土保持的理想先锋树种,其根系活动可显著改善根际土壤环境[10]。以往研究虽对沙棘生态特性有一定探讨,但针对祁连山东段北麓这一特定水土流失区域,其固土防蚀机理及水土保持功能研究仍较薄弱。本研究通过调查分析沙棘根蘖性、群落抗动物干扰性,及其对土壤含水量、养分及水土保持关键指标(水稳性团聚体、根长密度)的影响,首次量化解析"树龄-根蘖扩展-土壤抗蚀性"联动规律,明确沙棘对深层土壤水分的调控效应及生物围栏防护阈值,为当地植被恢复提供以物种特性为基础、生态与水土保持功能提升为核心、近自然修复为方法的策略,为祁连山生态脆弱区植被恢复与水土流失防治提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究聚焦祁连山东段北麓水土流失典型区,地理位置界定:东南端至天祝县东大滩乡探窑沟(37°14′51.68″N,103°18′31.14″E,海拔2 709 m);西南端至凉州区张义镇康庄夹台(37°32′05.8282″N,102°35′50.6751″E,海拔2 933 m);东北端至古浪县横梁乡中圈村(37°18′59.23″N,103°20′33.25″E,海拔2 360 m);西北端至凉州区张义镇石头坝旱山台(37°29′53.05″N,102°39′14.33″E,海拔2 424 m)(图1)。区域地势东南高、西北低,海拔2 360~2 900 m,相对高差显著,地形复杂,涵盖高山、丘陵、河谷等,坡度多为15°~60°,部分地段超70°。气候属温带大陆性向高寒气候过渡带,年平均降水量220~350 mm(7—9月所占比例75%),蒸发量大,昼夜温差8~10 ℃(极端超

12 ℃），气候干旱；土壤以栗钙土为主，颗粒组成中砂粒 45%～55%，粉粒 30%～35%，黏粒 10%～15%，裸地水稳性团聚体含量（>0.25 mm）不足 45%，抗蚀性差；土壤容重 1.3～1.5 g/cm³，孔隙度 40%～45%，有机质 1.5%～3.0%，全氮 0.08%～0.15%，速效磷 0.005～0.012 mg/，肥力整体较低。

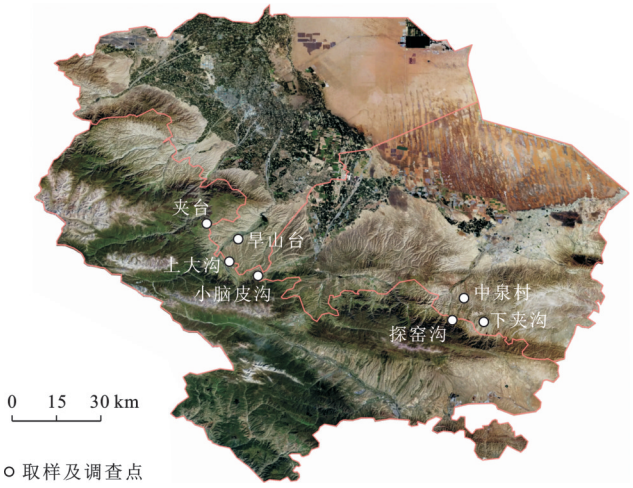



**图 1　研究区域景观和样点分布**

**Fig.1　Landscape of study area and distribution of sampling points**

### 1.2　试验设计与方法

2023 年 7 月，对中国沙棘的根蘖性、群落的抗动物干扰性、根际土壤含水量、养分和水土保持等因子进行调查、取样。

#### 1.2.1　中国沙棘的根蘖性调查设计

（1）树龄选择。基于当地林业局、林业站及祁连山保护局下属林场的长期监测数据，结合母株年轮实测判定树龄，确保树龄准确性；母株和根蘖苗的区分主要靠母株栽植鱼鳞坑来区分，在调查中发现>7 a 的沙棘群落部分鱼鳞坑已寻不到痕迹，母株与根蘖苗不好区分，所以沙棘的根蘖性调查，选取 1，3，5，7 年生群落为调查对象。

（2）样方选择与布设。在古浪县干城乡下夹沟村、凉州区张义镇康庄村夹台及沙金台村上大沟等地确定样地（图 1），同一坡向（半阴坡）、坡度（22°）、海拔（2 622～2 709 m），土壤类型均为栗钙土，水土流失风险一致，无明显人为破坏（如开垦、砍伐）。每个树龄设置 3 个重复样地，每个样地内采用对角线 5 点法布设 10 m×10 m 观测样方（样本量：每个树龄 15 个样方，总计 60 个样方），样方间距≥50 m，避免样方间相互干扰。测定密度、母株地径、母株高度、根蘖苗数、根蘖苗高度及根蘖苗与母株最远距离，同步记录样方内枯枝落叶层厚度（采用直尺测定，精度 0.1 cm），综合分析其根蘖特性及截流潜力。

#### 1.2.2　中国沙棘群落的抗动物干扰性调查设计

（1）树龄选择。沙棘群落的抗动物干扰性，因不涉及母株和根蘖苗的详细区分，为更好地揭示沙棘群落干扰抗性的完整演变过程，故在 1，3，5，7 a 树龄基础上增加 9 年生沙棘群落，即选择 1，3，5，7，9 a 的沙棘群落。

（2）样方选择与布设。样地选择在古浪县干城乡下夹沟村、凉州区张义镇康庄村夹台、沙金台村上大沟及天祝县东大滩乡探窑沟，海拔 2 622～2 709 m，调查在适度放牧环境下进行。每个树龄设置 3 个重复样地，每个样地内采用对角线 5 点法布设 10 m×10 m 样方（样本量：每个树龄 15 个样方，总计 75 个样方），样方间距≥50 m。观测母株树龄、群落相对盖度、生长密度、根蘖苗株数及动物粪便数量（分大、中、小 3 级：大动物含牛、驴、马等，中动物含羊、獾、猪等，小动物含兔子、旱獭、鼠类等），同步测定样方内地表径流痕迹（采用拍照＋样线法，记录径流沟数量及深度），综合评判抗动物干扰性及对水土流失的间接防控作用。

（3）动物粪便迁移影响说明。调查时段为 7 月，该区域此阶段降水集中于午后短时阵雨，且样方内林下草本植物和枯枝落叶层及根蘖苗丛覆盖可减缓地表径流速度，加之林下土壤比较蓬松，水分渗透力强，动物粪便（尤其是大、中型动物粪便）基本不迁移或迁移距离有限（≤1 m），故通过样方内粪便实测值可反映区域动物干扰强度；同时，结合样方周边 5 m 范围内粪便分布对比验证，差异不显著可忽略不计，以实测为准。

抗动物干扰性表示方式明确为以“群落相对盖度＋林下草本植物完整度＋动物粪便密度（粒/m²）＋地表径流沟数量（条/100 m²）”多指标综合表征，其中动物粪便密度直观反映干扰强度，草本完整度和群落盖度反映沙棘群落对干扰的抵御能力，径流沟数量体现干扰引发的水土流失响应。

#### 1.2.3　中国沙棘生长对根际土壤含水量和养分及水土保持指标的影响

采样点设于海拔 2 639 m 的天祝县哈溪镇小脑皮沟（阳坡，坡度 23°）和海拔 2 709 m 的天祝县东大滩探窑沟（半阴坡，坡度 28°），两处采样点沙棘均生长 18 a，密度 3.6 株/m²，盖度 0.825，生长稳定且具代表性。采用对角线 5 点法取样，每个样点采集 0—5，5—10，10—20，20—40，40—60，60—80 cm 共 6 个层次的

根际土壤混合样(样本量:每个采样点30个土壤样本,总计60个土壤样本),同坡度无沙棘生长的草地土壤为对照(CK)。对比分析沙棘生长区与对照区土壤的含水率、有机质(Wu)、全氮(N)、速效磷(P)、土壤水稳性团聚体含量、根长密度、土壤抗冲性等指标。

1.2.4 测定方法

土壤含水率采用烘干称重法,取10 g新鲜土样,105 ℃烘干至恒重,计算含水率[11]。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法,称取0.5 g风干土样,加入重铬酸钾溶液和浓硫酸,油浴加热后滴定,计算有机质含量[12]。全氮采用凯氏定氮法,土样经浓硫酸消煮后,采用凯氏定氮仪(Kjeltec 8400,FOSS,丹麦)测定[13]。速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,采用分光光度计(UV-2600,岛津,日本)在700 nm波长下测定吸光度[14]。土壤水稳性团聚体采用湿筛法,称取100 g风干土样,经2 mm筛预处理后,放入团聚体分析仪(YTS-100,浙江托普,中国),依次过2 mm,0.25 mm筛,收集筛上土样烘干称重[15]。根长密度采用WinRHIZO Pro2022根系图像分析系统,将土壤样本经清水冲洗后,扫描获取根系图像,软件自动分析根长,计算单位体积土壤根长[16]。土壤抗冲性采用自制微型土槽(槽长50 cm,宽10 cm,深15 cm),坡度设为25°,水流强度5 L/min,连续冲刷10 min后收集冲刷物烘干称重,计算冲刷量[17];不同树龄抗冲性试验:选取1,3,5,7,9年生沙棘群落,每个树龄3个重复样地,每个样地采集0—20 cm土层土壤进行抗冲性测定(样本量:每个树龄9个土样,总计45个土样)。

1.2.5 计算公式

土壤含水率计算公式为

$$W=\frac{(m_w-m_d)}{2}\times 100\% \tag{1}$$

式中:$W$土壤含水率(%);$m_w$土壤湿重(g);$m_d$土壤干重(g)。

灌木盖度计算公式为

$$C=\frac{c_e\cdot c_n}{s}\times 100\% \tag{2}$$

式中:$C$灌木盖度(%);$c_e$东西冠幅长度(m);$c_n$南北冠幅长度(m);$S$样地面积(m²)。

为土壤抗冲性指数计算公式为

$$\mathrm{SI}=\frac{E_c}{E_n} \tag{3}$$

式中:SI土壤抗冲性指数;$E_c$对照区土壤冲刷量(g);$E_n$沙棘区土壤冲刷量(g)。

根长密度计算公式为

$$\mathrm{RLD}=\frac{L}{V} \tag{4}$$

式中:RLD根长密度(cm/cm³);$L$根系总长度(cm);$V$土壤样本体积(cm³)。

水稳性团聚体含量(>0.25 mm)计算公式采用:

$$\mathrm{WSA}=\frac{M>0.25\,\mathrm{mm}}{M_{\mathrm{total}}}\times 100\% \tag{5}$$

式中:WSA水稳性团聚体含量(%);$M$>0.25粒径>0.25 mm团聚体干重(g);$M_{\mathrm{total}}$土壤样本总干重(g)。

### 1.3 数据处理与分析

采用SPSS 26.0软件进行分析:首先对所有数据进行正态性检验(Shapiro-Wilk检验)和方差齐性检验(Levene检验),结果显示数据均符合正态分布($p>0.05$)且方差齐性($p>0.05$),满足参数检验条件;随后采用单因素方差分析(ANOVA)比较不同树龄、不同土层指标差异,同步进行Duncan多重比较(明确水土保持指标组间差异显著性),显著性水平设为$p<0.05$,极显著性水平设为$p<0.01$;水土保持指标相关性分析采用Pearson相关系数法。采用Origin 2023软件绘制图表,图表中误差棒表示标准误(SE)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同年份的中国沙棘根蘖性

如表1所示,随着树龄的增加,中国沙棘的根蘖特性呈现出极显著($p<0.01$)的变化规律。在1年生的沙棘群落中,根蘖苗数为0,3年生的沙棘群落开始零星出现根蘖苗,根蘖苗数为0.004株/m²,根蘖苗高度为6.1 cm,根蘖苗与母株最远距离为0.8 m。5年生的沙棘群落根蘖苗数增加到0.20株/m²,根蘖苗高度达到86.40 cm,根蘖苗与母株最远距离为3.34 m,差异极显著($p<0.01$)。7年生的沙棘群落根蘖苗数进一步增加到0.233株/m²,根蘖苗高度为108.6 cm,根蘖苗与母株最远距离为4.2 m,差异极显著($p<0.01$)。枯枝落叶层厚度随树龄显著增加($p<0.01$):7年生群落枯枝落叶层厚度达3.8 cm,是1年生的12.7倍。该层可有效截留降雨,减少雨滴击溅侵蚀,同时延缓地表径流产生时间,体现沙棘群落的初期水土保持效应。

### 2.2 中国沙棘群落的抗动物干扰性

如表2所示,沙棘群落抗动物干扰性与树龄、密度、盖度呈显著正相关,树龄1~9 a,群落密度从0.167株/m²增至2.83株/m²($p<0.01$),大、中型动物粪便密度从0.016粒/m²降至0($p<0.01$),林下草本

完整度从23%提升至97.5%($p<0.01$);根蘖苗3年生零星发育,5~7 a显著增长($p<0.01$),9 a生母株与根蘖苗难以区分,形成稳定克隆群体,抗干扰韧性更强。动物干扰对沙棘群落的负效应随树龄变化,1~5 a根蘖性不强,呈显著负效应;6~9 a根蘖性增强,抗动物干扰能力提升,负效应趋向平衡。地表径流沟数量随树龄显著减少($p<0.01$),9年生群落仅0.3条/100 m$^2$,较1年生减少97.6%。径流沟调查采用"样线法+拍照记录+深度测量":每个10 m×10 m样方内沿对角线设3条5 m长样线,记录径流沟数量并测量深度(精度0.1 cm)。径流沟减少的原因可能为:①群落盖度提升(9年生达82%),枝叶与枯枝落叶层拦截降雨,减少雨滴击溅,降低径流冲刷力;②密集根系(0—40 cm根长密度12.6 cm/cm$^3$)改善土壤结构、增加孔隙度、促进降水入渗,同时缠绕固持土壤颗粒,增强抗崩解能力,抑制径流沟形成。

**表1　不同树龄的中国沙棘根蘖性及枯枝落叶层厚度**

**Table 1　Root suckering ability and litter layer thickness of *Hippophae rhamnoides* at different ages**

| 沙棘群落树龄/a | 样地海拔/m | 密度/(株·m$^{-2}$) | 母株高度$\bar{x}$/m | 根蘖苗数$\bar{x}$/(株·m$^{-2}$) | 根蘖苗高度$\bar{x}$/cm | 根蘖苗与母株最远距离/m | 枯枝落叶层厚度$\bar{x}$/cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 622 | 0.17±0.00$^{a}$ | 0.43±0.05$^{a}$ | 0$^{a}$ | 0$^{a}$ | 0$^{a}$ | 0.3±0.1$^{a}$ |
| 3 | 2 692 | 0.17±0.22$^{a}$ | 0.58±0.01$^{ab}$ | 0.004±0.02$^{a}$ | 6.10±1.10$^{b}$ | 0.8±0.08$^{b}$ | 1.2±0.3$^{b}$ |
| 5 | 2 709 | 0.29±6.30$^{ab}$ | 2.22±0.24$^{c}$ | 0.20±0.08$^{ab}$ | 86.40±21.50$^{c}$ | 3.34±0.23$^{c}$ | 2.5±0.4$^{c}$ |
| 7 | 2 700 | 0.39±0.43$^{b}$ | 2.51±0.32$^{c}$ | 0.23±0.07$^{b}$ | 108.60±18.30$^{cd}$ | 4.2±0.37$^{d}$ | 3.8±0.5$^{d}$ |

注:①表中$\bar{x}$表示平均值(均值±标准误);②不同字母组合中,无交集字母表示差异极显著($p<0.01$),有交集字母表示差异显著($p<0.05$),相同字母表示为差异不显著($p>0.05$);③根蘖苗相关指标中,"0 a"表示该树龄阶段无根系苗萌发。下同。

**表2　不同树龄的中国沙棘群落的抗动物干扰性及地表径流特征**

**Table 2　Resistance to animal disturbance and surface runoff characteristics of *H. rhamnoides* communities at different ages**

| 沙棘树龄/a | 沙棘密度/(株·m$^{-2}$) | 根蘖苗株数/(株·m$^{-2}$) | 动物粪便/(粒·m$^{-2}$) | | | 林下草本植物的完整度/% | 群落相对盖度/% | 径流沟数/(10$^{-2}$条·m$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 大动物 | 中动物 | 小动物 | | | |
| 1 | 0.17±0.02$^{a}$ | 0$^{a}$ | 0.016±0.002$^{a}$ | 6.721±0.13$^{a}$ | 0$^{a}$ | 23$^{a}$ | 0.004$^{a}$ | 12.5±2.3$^{a}$ |
| 3 | 0.17±0.22$^{a}$ | 0.01±0.19$^{a}$ | 0.015±0.004$^{a}$ | 6.613±0.21$^{a}$ | 0$^{a}$ | 28$^{a}$ | 0.018$^{a}$ | 9.8±1.8$^{b}$ |
| 5 | 0.29±6.3$^{ab}$ | 0.12±0.42$^{ab}$ | 0.012 6±0.005$^{a}$ | 5.75±0.18$^{ab}$ | 0$^{a}$ | 42$^{ab}$ | 0.42$^{ab}$ | 5.3±1.2$^{c}$ |
| 7 | 0.39±0.43$^{ab}$ | 0.22±1.19$^{b}$ | 0.010±0.003$^{ab}$ | 3.12±1.47$^{b}$ | 0$^{a}$ | 60$^{c}$ | 0.68$^{bc}$ | 2.1±0.8$^{d}$ |
| 9 | 2.83±0.36$^{b}$ | — | 0$^{c}$ | 0$^{c}$ | 0.05±0.02$^{ab}$ | 97.5$^{c}$ | 0.82$^{c}$ | 0.3±0.2$^{e}$ |

注:①大动物粪便指牛、驴、马、鹿等大型草食动物粪便;中动物指羊、獾、猪等中型草食动物粪便;小动物指兔子、旱獭、鼠类等小型啮齿类动物粪便。②"—"表示该树龄阶段母株与根蘖苗形态差异小,难以准确区分计数。

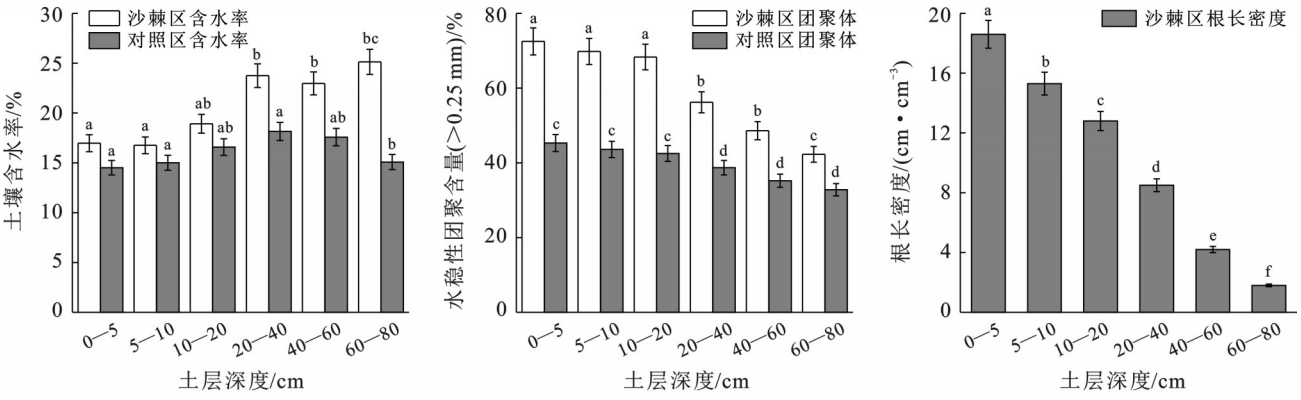
### 2.3　中国沙棘生长对根际土壤环境及水土保持性能的影响

#### 2.3.1　对土壤含水率及抗蚀性的影响

如图2a所示,沙棘对土壤含水率的影响具显著土层差异,0—5 cm土层沙棘区含水率16.97%,较对照区(14.51%)提高17.00%($p<0.05$);5—10 cm,10—20 cm土层分别提高11.68%,14.13%($p>0.05$);20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm土层显著提升($p<0.01$),相对提高率在30.90%~66.68%。沙棘对土壤含水量的影响并非单纯正效应,0—20 cm土层因根系吸水和枯枝落叶层导致水分蒸发较快,提升效应较弱;而20—80 cm土层得益于沙棘根系改善土壤孔隙结构,促进降水入渗和储存,呈现显著正效应,总体而言沙棘对深层土壤水分的调控作用为正向,有利于区域水资源涵养。

如图2b所示,沙棘区0—20 cm土层水稳性团聚体含量达68.3%~72.5%,较对照区(42.5%~45.3%)提升51.3%~64.8%($p<0.01$),显著增强土壤抗崩解能力;如图2c所示,0—20 cm土层根长密度达12.8~18.6 cm/cm$^3$,是40—60 cm土层的3.0~3.9倍,体现表层根系固土优势。

由表3可以看出,土壤抗冲性指数(SI)随树龄增加显著提升($p<0.01$):1,3,5,7和9年生群落SI值分别为1.8,2.5,3.7,4.9和5.6;0—5 cm土层SI达5.8,表明沙棘区土壤冲刷量仅为对照区的17.2%,抗冲蚀能力显著提升。综合来看,0—20 cm土层含水率较对照区最高提高17%,0—80 cm土层随深度增加水分相对提高率显著上升(最高66.68%);水土保持效应以0—20 cm土层最显著,与根系分布及枯枝落叶层协同作用密切相关。




a 沙棘对土壤含水率的影响　b 水稳性团聚体的影响　c 沙棘生长区根长密度

注：①a为土壤含水率，b为水稳性团聚体含量（>0.25 mm），c为根长密度；②误差棒表示标准误（SE）；③不同字母表示差异显著（$p<0.05$），无交集字母表示差异极显著（$p<0.01$）；④每个土层30个土壤样本。

**图2 不同土层土壤水土保持指标对比**

**Fig.2 Comparison of soil, soil and water conservation indicators in different layers**

2.3.2 沙棘生长对根际土壤养分的影响及与水土保持指标的相关性

由表4可知，沙棘生长对土壤养分影响显著：有机质含量：0—5 cm土层沙棘区（8.69%）略低于对照区（8.82%），5—80 cm土层均高于对照区，60—80 cm土层沙棘区（5.02%）是对照区（1.97%）的2.5倍；全氮含量：各土层沙棘区均高于对照区，5—10 cm土层最高达0.47%，随土层深度增加与对照区的相对提高率上升；速效磷含量：各土层沙棘区普遍高于对照区，0—5 cm土层达0.031 5 mg/g，60—80 cm土层达2.15 mg/100 g（对照区0.005 4 mg/g）。土壤有机质含量与水稳性团聚体含量呈极显著正相关（$r=0.62\sim0.87$，$p<0.01$或$p<0.05$），表明沙棘通过提升土壤有机质促进团聚体形成，进而增强土壤抗蚀性。

**表3 不同树龄沙棘群落土壤抗冲性指数对比**

**Table 3 Comparison of soil anti-scourability indices of *H. rhamnoides* communities at different ages**

| 沙棘树龄/a | 土壤抗冲性指数(SI) | 标准误(SE) | 差异显著性标记 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.8 | ±0.12 | a |
| 3 | 2.5 | ±0.15 | b |
| 5 | 3.7 | ±0.18 | c |
| 7 | 4.9 | ±0.21 | d |
| 9 | 5.6 | ±0.23 | e |

注：①差异显著性标记中，不同字母表示差异显著（$p<0.05$），无交集字母表示差异极显著（$p<0.01$）；②每个树龄9个土样；③SI值越大，沙棘对土壤抗冲性的提升效果越显著。

**表4 中国沙棘生长对土壤养分的影响及与水稳性团聚体的相关性**

**Table 4 Impact of *H. rhamnoides* growth on soil nutrients and its correlation with water-stable aggregates**

| 土层深度/cm | 有机质/% | | 全氮/% | | 速效磷($10^{-2}$ mg/g) | | 有机质－水稳性团聚体相关系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 沙棘区 | 对照区(CK) | 沙棘区 | 对照区(CK) | 沙棘区 | 对照区(CK) | |
| 0—5 | 8.69±2.262$^{ab}$ | 8.82±1.043$^{ab}$ | 0.54±0.108$^{a}$ | 0.46±0.096$^{ab}$ | 3.15±0.046$^{a}$ | 2.61±0.239$^{ab}$ | 0.87$^{a}$ |
| 5—10 | 7.10±1.519$^{a}$ | 6.22±1.675$^{ab}$ | 0.47±0.085$^{ab}$ | 0.39±0.081$^{b}$ | 2.44±0.244$^{ab}$ | 2.12±0.487$^{b}$ | 0.82$^{b}$ |
| 10—20 | 7.87±0.982$^{a}$ | 5.26±1.671$^{b}$ | 0.45±0.075$^{ab}$ | 0.34±0.100$^{bc}$ | 2.55±0.344$^{ab}$ | 1.90±0.463$^{bc}$ | 0.79$^{c}$ |
| 20—40 | 6.75±0.787$^{b}$ | 4.50±1.555$^{bc}$ | 0.35±0.035$^{bc}$ | 0.31±0.106$^{c}$ | 2.37±0.52$^{ab}$ | 1.66±0.602$^{c}$ | 0.73$^{d}$ |
| 40—60 | 5.89±0.307$^{bc}$ | 3.59±1.497$^{c}$ | 0.38±0.011$^{bc}$ | 0.25±0.097$^{cd}$ | 1.64±0.160$^{bc}$ | 1.17±0.530$^{cd}$ | 0.68$^{de}$ |
| 60—80 | 5.02±1.292$^{c}$ | 1.97±0.525$^{d}$ | 0.38±0.054$^{bc}$ | 0.15±0.037$^{d}$ | 2.15±0.504$^{ab}$ | 0.54±0.147$^{e}$ | 0.62$^{de}$ |

注：①相关系数$r$值越大，表明有机质与水稳性团聚体的正相关关系越强；②不同字母组合中，无交集字母表示差异极显著（$p<0.01$），有交集字母表示差异显著（$p<0.05$），相同字母表示差异不显著（$p>0.05$）。

## 3 讨 论

### 3.1 中国沙棘的根蘖性与水土保持潜力

1～3年生沙棘群落以自身生长与根系发育为主，为根蘖繁殖奠定基础；3年生零星根蘖，5 a后大量繁殖，7年生根蘖苗密度0.23株/m$^2$，高度108.6 cm，与母株最远距离4.2 m，群落密度0.39株/m$^2$，形成稳定环境。该特性与韦宇[18]在干旱退化区观测到的“沙棘根蘖苗密度随树龄呈指数增长”一致，但本研究中根蘖苗与母株最远距离（4.2 m）略低于该研究

(5.3 m),主要因祁连山区海拔高、气候寒冷、生长季短,限制根系横向扩展速率,体现高海拔水力侵蚀区沙棘根蘖繁殖特异性。树龄对根蘖能力的调控作用显著,随树龄增长,根系与地上部分生长积累增强,为根蘖苗萌发提供充足物质能量保障[19-20]。根蘖苗快速扩展使7年生群落盖度达68%,雨滴击溅侵蚀降幅70%;3.8 cm厚枯枝落叶层可截留15%～20%次降雨,地表径流系数从0.52降至0.21,与吴钦孝[21]研究结论一致。根蘖苗下坡向分布比例为68%,形成"横向拦截带",减缓坡面径流速度,契合"植被-土壤-侵蚀协同调控理论",通过克隆生长快速构建防护结构,实现水土流失早期防控[22-23]。该根蘖特性对区域植被恢复具重要应用价值,散型、多点种植母株,可依托根蘖繁殖快速扩展种群、覆盖裸地、构建稳定灌丛群落;根蘖苗与母株存在养分关联,成活率高、适应性强,能为山杨、云杉等乔木生长创造遮阴、保水微环境,促进生物多样性形成与森林植被正向演替。结合水土保持需求,建议坡度15°～30°水土流失区采用"2 m×3 m株行距+沿等高线种植"模式,使根蘖形成的横向灌丛带间距控制在4～5 m,实现径流拦截效率最大化(>65%)。

### 3.2　中国沙棘群落的抗动物干扰性与水土流失间接防控

沙棘群落抗动物干扰性与树龄、密度、盖度呈显著正相关:随树龄增长,群落密度提升,动物粪便密度下降,林下草本完整度提高。适度放牧下,9年生群落形成密集丛生结构,构建物理屏障限制大、中型动物活动,母株与根蘖苗难以区分,形成稳定克隆群体,抗干扰韧性更强。1～7 a为发育积累期,7年生群落相对盖度68%、草本完整度60%,9年生形成近封闭群落(盖度82%),动物干扰近乎消失,生态趋于稳定。这一特征为区域植被恢复提供关键时间阈值:放牧环境中沙棘群落需围栏保护5 a以上,方可形成强抗动物干扰能力,为当地植被恢复与放牧管理提供重要参考。

动物干扰(尤其过度放牧)会破坏地表植被覆盖,使土壤裸露度增加30%～50%,土壤侵蚀模数提升2～3倍。沙棘群落抗动物干扰性可间接防控水土流失,9年生群落通过"物理屏障+草本保护",使林下土壤侵蚀模数从1 800 t/(km²·a)降至500 t/(km²·a)以下[24],达到水土保持二级标准(GB/T 15772—2020)。张金有等[8]研究表明,沙棘寿命较短,树龄20 a后群落中心植株开始退化,土壤改良后耐阴性乔木侵入形成混交林并逐步取代沙棘;沙棘根蘖性使其群落呈"外幼内老、外密内疏"格局,强抗动物干扰性使其形成高效生物围栏,保护群落内植物生长。在祁连山东段北麓山区造林中,建植沙棘生物围栏可有效阻挡动物进入封育区,减少林木幼苗破坏,提高封山育林成效;将其作为水土保持工程前置措施,围栏宽度设15～25 m(沿等高线),与乔木林带间距10～15 m,形成"灌-乔"复合防护体系,可提升禁牧效果与水土流失防控效率。

### 3.3　中国沙棘生长对根际土壤水分及抗蚀性的影响机制

沙棘对不同土层含水率影响显著,0—20 cm土层含水率较对照区最高提高17%,因根系密集吸水和枯枝落叶层导致水分蒸发较快,提升效应较弱;20—80 cm土层含水率显著高于对照区,相对提高率最高达66.68%,得益于根系扰动改良土壤结构,增大颗粒空隙,促进降水入渗与储存[25];对照区因草结皮、放牧等因素,土壤容重增加、孔隙度减小,降水地表径流增加、入渗量减少,深层土壤蓄水力下降[26]。

沙棘通过3方面协同作用提升土壤抗蚀性:①根系固土。0—20 cm土层根长密度12.8～18.6 cm/cm³,包裹土壤颗粒使抗剪强度提升35%～50%[21,27];②团聚体形成。有机质促进微生物活动产生胶结物质,水稳性团聚体(>0.25 mm)含量提升51.3%,减少土壤崩解;③枯枝落叶截流。3.8 cm厚枯落层分散雨滴动能60%,避免表土结皮,土壤入渗率达15 mm/h(裸地的2.5倍)。该机制与《水土保持通报》重点报道的"干旱区灌木固土防蚀模式"一致,通过"地上-地下"双重防护实现水土流失综合防控[28-29]。

### 3.4　中国沙棘生长对土壤养分含量的影响及与水土保持的关联

沙棘生长对根际土壤养分影响显著,不同土层有机质、全氮、速效磷含量差异明显:有机质含量0—80 cm土层均高于对照区,源于枯枝落叶积累分解、根系分泌及残体转化,为微生物提供碳源能源;全氮含量各土层均高于对照区,5—10 cm土层最高达0.47%,得益于与根瘤菌的共生固氮作用[28],多余氮素释放积累于土壤,且深层土壤固氮效应更显著;速效磷含量普遍高于对照区,因根系分泌酸性物质溶解难溶性磷,根际微生物活动也促进磷转化[30]。

土壤有机质与水稳性团聚体呈极显著正相关($r$=0.62～0.87),有机质每增加1%,水稳性团聚体含量提升8%～12%,抗冲性指数提升0.5～0.8[31],形成"养分-抗蚀性"协同提升技术路径,通过沙棘种植实现土壤肥力与水土保持功能同步改善。

本研究与既有研究的共性与特异性:①土壤养分方面,18年生沙棘根际土壤有机质最高8.69%,与

Guo等在黄土高原报道的7.5%～9.0%一致，但60—80 cm土层全氮含量（0.38%）显著高于黄土高原（0.25%～0.30%），源于祁连山区沙棘共生固氮体系在深层土壤活性更强；②土壤水分调控方面，20—80 cm深层土壤含水率提升最高66.68%，显著高于唐梅[32]在砒砂岩区报道的45%，因祁连山东段北麓土壤砂粒占比高，根系改良土壤孔隙结构效果更显著；③根蘖繁殖方面，5 a后进入大量繁殖期，7年生根蘖苗密度0.23株/m$^2$，与李倩等[19]在黄土高原观测到的规律一致，但根蘖苗与母株最远距离（4.2 m）略低，与高海拔、低温度、短生长周期相关；④抗蚀性提升方面，0—20 cm土层水稳性团聚体含量68.3%，与Vijay K等[33]在印度喜马拉雅山区报道的50%～65%相近，土壤抗冲性指数（9年生5.6）高于黄土高原同类研究（4.8）[24]，体现该区域沙棘强固土防蚀优势；⑤时间序列互补方面，本研究聚焦1～18年生沙棘快速发育与功能上升阶段，与已有研究中20 a后退化阶段形成完整响应链条，推断沙棘在该区域的生态效应呈“快速提升（1～9 a）—稳定维持（10～20 a）—逐渐衰退（20 a以上）”特征。

本研究也存在一定局限，采用“空间代替时间”方法推断沙棘生态效应，虽控制立地条件一致性，但无法完全排除微环境差异（如局部土壤肥力、水分异质性）影响，也难以捕捉短期环境波动（如极端降水、干旱）的累积效应，未来需建立长期定位观测样地验证结论；以根际土壤、土壤抗冲性等为核心指标，未直接测定水土流失量，指标相对单一，后续可结合径流小区观测，同步测定地表径流量和土壤流失量，更全面量化沙棘水土保持功能。

## 4 结 论

（1）中国沙棘在祁连山东段北麓具强根蘖性：1～3 a龄林以自身生长为主，3年生零星根蘖，5年生大量繁殖，7年生根蘖苗密度0.23株/m$^2$、高度108.6 cm、与母株最远距离4.2 m，7年生群落枯枝落叶层厚度达3.8 cm，沿等高线种植可构建高效径流拦截带，拦截率达65%以上。

（2）沙棘群落抗动物干扰性强，与树龄、密度、盖度呈显著正相关：9年生群落密度2.83株/m$^2$，盖度82%，形成物理屏障阻断动物干扰；1～7 a龄林为发育积累期，围栏保护5 a以上可形成强抗干扰能力；9年生群落可使林下土壤侵蚀模数降至500 t/(km$^2$·a)以下，5～8 m宽的沙棘生物围栏与乔木林带搭配，可使整体水土流失防控效率提升至80%以上。

（3）沙棘能显著提高根际土壤含水率及抗蚀性：0—20 cm土层含水率提升17%，20—80 cm土层提升30.90%～66.68%；0—20 cm土层水稳性团聚体含量（>0.25 mm）达68.3%，根长密度达12.6 cm/cm$^3$，9年生群落抗冲性指数达5.6，土壤冲刷量仅为对照区的17.2%～21.3%。

（4）沙棘生长显著提升0—80 cm根际土壤养分：18年生沙棘根际土壤有机质最高达8.69%，全氮0.54%，速效磷0.032 mg/g；土壤有机质与水稳性团聚体呈极显著正相关（$r$=0.62～0.87），实现养分与抗蚀性协同提升。

综上所述，中国沙棘可作为祁连山东段北麓植被恢复和水土保持导向型优选物种，其根蘖扩繁，抗动物干扰及“土壤改良-水土保持”协同效应，可为当地生态治理，放牧调控及水土保持工程配置提供关键理论支撑与技术参考。

**参考文献（References）**

[1] 张晓玮，蒋玉梅，毕阳，等.基于MaxEnt模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J].生态学报，2022，42(4)：1420-1428.
Zhang Xiaowei, Jiang Yumei, Bi Yang, et al. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1420-1428.

[2] 李代琼，梁一民，侯喜禄，等.沙棘改善环境的生态功能及效益试验研究[J].国际沙棘研究与开发，2004(2)：6-11.
Li Daiqiong, Liang Yimin, Hou Xilu, et al. A Study on the functions and benefits of seabuckthorn for improving eco-environment of the Loess Plateau[J]. International Seabuckthorn Research and Development, 2004(2): 6-11.

[3] 胡建忠，范小玲，王愿昌，等.黄土高原沙棘人工林地土壤抗蚀性指标探讨[J].水土保持通报，1998(02)：28-33+96.
Hu Jianzhong, Fan Xiaoling, Wang Yuanchang, et al. Soil anti-erodibility indexes of *Hippophae rhamnoides* forest in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1998(2):28-33+96.

[4] 王晶，刘桂艳，杨玉延，等.沙棘果中维生素C含量的测定与探究[J].当代化工研究，2023(18)：37-39.
Wang Jing, Liu Guiyan, Yang Yuyan, et al. Determination and exploration of vitamin C content in seabuckthorn fruit[J]. Contemporary Chemical Research, 2023(18): 37-39.

[5] 彭艺超，冯欣滢，王冰.沙棘及沙棘油活性成分、药理学作用及在疾病治疗中的应用与机制研究进展[J].上海中医药杂志，2026，60(1)：92-100.
Peng Yichao, Feng Xinying, Wang Bing. Research prog-

ress on active components, pharmacological effects as well as application and mechanism in disease treatment of *Hippophae fructus* and *Hippophae fructus* oil [J]. Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine, 2026, 60(1):92-100.

[6] 牛真真, 王沙沙, 金宏,等.沙棘维生素P粉系列美白化妆品的制备[J].首都师范大学学报(自然科学版), 2017,38(5):41-47.
Niu Zhenzhen, Wang Shasha, Jin Hong, et al. Preparation of seabuckthorn vitamin P powder series whitening cosmetics [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2017,38(5):41-47.

[7] 张峰, 李珍存.河西走廊管道工程水土流失特点及防护措施体系[J].中国水土保持,2015(2):33-35.
Zhang Feng, Li Zhencun. Characteristics of soil erosion and protection measures system for pipeline engineering in Hexi Corridor [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(2):33-35.

[8] 张金有, 赵玉春.沙棘自然演替规律初探[J].陕西林业科技,2010(6):24-26.
Zhang Jinyou, Zhao Yuchun. Natural succession of *Hippophae rhamnoides* Linn [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2010(6):24-26.

[9] 刘章文,陈仁升,宋耀选.祁连山典型高山灌丛树干茎流特征[J].应用生态学报,2011,22(8):1975-1981.
Liu Zhangwen, Chen Rensheng, Song Yaoxuan. Characteristics of stemflow for typical alpine shrubs in Qilian Mountain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(8):1975-1981.

[10] 相里佳菲,路培.沙棘不同恢复年限对土壤质量的影响[J].南方农业,2023,17(18):18-20,58.
Xiang lijiafei, Lu Pei. Effects of different restoration years of seabuckthorn on soil quality [J]. South China Agriculture, 2023,17(18):18-20,58.

[11] 刘可意, 杨佳, 姜淑娜,等.基于最小数据集的典型黑土区不同林龄小黑杨土壤质量差异[J].生态学报, 2024,44(9):3623-3635.
Liu Keyi, Yang Jia, Jiang Shuna, et al. Evaluation of differences in soil quality of *Populus simonii* ×*P. nigra* (*P. xiaohei*) of different stand ages in typical black soil areas based on a minimum data set [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(9):3623-3635.

[12] 国家林业局.LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S].北京:中国标准出版社,1999.
State Forestry Administration. LY/T 1237—1999 Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio [S]. Beijing: Standard Press of China, 1999.

[13] 张忱, 李广, 鲁文德,等.陇中黄土高原不同土地利用方式下土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].草原与草坪,2025,45(2):131-140.
Zhang Chen, Li Guang, Lu Wende, et al. The soil carbon, nitrogen, and phosphorus content, and their ecological stoichiometric characteristics under different land use patterns in the Loess Plateau of Longzhong [J]. Grassland and Turf, 2025,45(2):131-140.

[14] 刘振花.阜新地区沙棘林地土壤理化性质研究[J].防护林科技,2016(5):25-26,71.
Liu Zhenhua. Soil physicochemical properties of *Hippophae rhamnoides* in Fuxin region [J]. Protection Forest Science and Technology, 2016(5):25-26,71.

[15] 魏霞, 贺燕, 魏宁,等.祁连山区主要植被类型下土壤团聚体变化特征[J].农业工程学报,2020,36(2):148-155.
Wei Xia, He Yan, Wei Ning, et al. Variation characteristics of soil aggregates under main vegetation types in Qilian mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(2):148-155.

[16] 王月玲,王思成,许浩,等.宁南黄土区典型林分林下草本植被根系分布特征[J].北方园艺,2023(5):69-76.
Wang Yueling, Wang Sicheng, Xu Hao, et al. Distribution characteristics of understory vegetation root in the typical forests in loess region of southern Ningxia [J]. Northern Horticulture, 2023(5):69-76.

[17] 资如毅,赵龙山,钱晓鹤,等.喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系[J].水土保持学报,2022,36(3):23-29.
Zi Ruyi, Zhao Longshan, Qian Xiaohe, et al.Relationship between soil anti-scourability and soil physical properties in Karst mountain areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):23-29.

[18] 韦宇.黄土高原中国沙棘克隆生长的时间动态研究[D].云南 昆明:西南林学院,2006
Wei Yu. Study on the time dynamics of clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis* in the Loess Plateau [D]. Kunming, Yunnan: Southwest Forestry College, 2006

[19] 李倩, 张文辉, 何景峰,等.沙棘人工种群在不同生境条件下的繁殖特征[J].西北林学院学报,2010,25(1):71-76,94.
Li Qian, Zhang Wenhui, He Jingfeng, et al. Reproductive characteristics of *Hippophae rhamnoides* artificial population in different habitats [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010,25(1):71-76,94.

[20] 贺斌, 李根前, 徐德兵,等.沙棘克隆生长及其生态学意义[J].西北林学院学报,2006(3):54-59.
He Bin, Li Genqian, Xu Debing, et al. The clonal growth and its ecological significance of *Hippophae* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006(3):54-59.

[21] 吴钦孝，赵鸿雁，刘向东，等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].土壤侵蚀与水土保持学报，1998(2)：24-29.
Wu Qinxiao, Zhao Hongyan, Liu XiangDong, et al. Evaluation on role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation [J]. Journal of Soil Erosion and Water Conservation, 1998(2):24-29.

[22] 李倩.黄土丘陵区沙棘繁殖特性研究[D].陕西 杨凌：西北农林科技大学，2009.
Li Qian. Study on *Hippophae rhamnoides* reproductive characteristics in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009.

[23] 肖智勇，李根前，代光辉，等.黄土高原不同坡向中国沙棘种群生物量投资与分配[J].东北林业大学学报，2011，39(5)：44-46，57.
Xiao Zhiyong, Li Genqian, Dai GuangHui, et al. Biomass allocation and investment of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* populations under different aspects of slope in the Loess Plateau [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011,39(5):44-46,57.

[24] 陈云明，刘国彬，徐炳成.黄土丘陵区人工沙棘林水土保持作用机理及效益[J].应用生态学报，2005，16(4)：595-599.
Chen Yunming, Liu Guobin, Xu Bingcheng. Effects of artificial seabuckthorn forest on soil and water conservation in loess hilly region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005,16(4):595-599.

[25] 杨振奇，郭建英，秦富仓，等.裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报，2021，41(3)：8-14.
Yang Zhenqi, Guo Jianying, Qin Fucang, et al. Soil aggregate stability and erodibility in different vegetation types of exposed feldspathic sandstone region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):8-14.

[26] 严积有，徐凯然，申新山.放牧干扰对人工林土壤物理性状的影响[J].水土保持通报，2008，28(6)：138-141.
Yan Jiyou, Xu Kairan, Shen Xinshan. Influences of grazing disturbance on soil physical properties in planted forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008,28(6):138-141.

[27] 刘宏，段爱国，何彩云，等.中国沙棘和蒙古沙棘不同区室细菌微生物组特征与溯源分析[J].林业科学研究，2025，38(2)：34-47.
Liu Hong, Duan Aiguo, He Caiyun, et al. Bacterial microbiome characteristics and traceability analysis of different compartments in *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* and *H. rhamnoides* subsp. mongonica [J]. Forest Research, 2025,38(2):34-47.

[28] 李元旦，丁鉴.沙棘-弗氏放线菌共生固氮体系研究：Ⅰ环境因子影响沙棘结瘤和生长[J].微生物学杂志，1989(03)：22-28.
Li Yuandan, Ding Jian. Nitrogen-fixing symbioses with Frankia-*Hippophae rhamnoides* L: I effects of the environmental factors on nodulation and growth of *Hippophae-rhamnoides* L. [J]. Journal of Microbiology, 1989(3):22-28.

[29] 董哲，魏天兴，石鑫，等.两种不同生长状况沙棘根系分泌物差异分析[J].四川农业大学学报，2012，30(2)：195-200.
Dong Zhe, Wei Tianxing, Shi Xin, et al. Main compounds variations of root exudates in *Hippophae rhamnoides* with different growth states [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012,30(2):195-200.

[30] 孙美美，田丽，乔紫薇，等.内蒙古砒砂岩地区沙棘根际和非根际土壤理化性质及真菌群落特征[J].微生物学报，2024，64(6)：1747-1765.
Sun Meimei, Tian Li, Qiao Ziwei, et al. Physicochemical properties and fungal community characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Hippophae rhamnoides* in Pisha sandstone area of Inner Mongolia [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(6): 1747-1765.

[31] 卢亚慧，格日乐，志辉，等.沙棘根土复合体抗剪特性对平茬复壮的响应[J].水土保持通报，2025，45(5)：63-71，244.
Lu Yahui, Ge Rile, Zhi Hui, et al. Response of shear resistance of *Hippophae rhamnoides* root-soil complex to stubble rejuvenation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(5):63-71,244.

[32] 唐梅.砒砂岩区沙棘对土壤有机碳提升效果评价[D].西北农林科技大学，2024
Tang Mei. Evaluation of the effect of *Hippophae rhamnoides* on soil organic carbon in Pisha sandstone area[D]. Northwest Agriculture and Forestry University,2024

[33] Kumar V, Sharma K R, Arga V M, et al. Effect of land use patterns on size distributions and aggregates stability in the mountainous areas of north-western Himalayas, India [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,19(4): 356-363.