

张志强,郭月峰,祁伟,等.不同平茬模式对柠条细根构型及土壤养分的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(6):210-218.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.06.020

不同平茬模式对柠条细根构型及土壤养分的影响

张志强¹,郭月峰¹,祁伟²,卜繁靖³,刘科⁴

1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利事业发展中心,呼和浩特 010020;
3. 翁牛特旗水利事业发展中心,赤峰 024500; 4. 准格尔旗水利事业发展中心,鄂尔多斯 017100

摘要 为探讨不同平茬模式下柠条细根构型及土壤养分的变化规律,以内蒙古包头市达茂旗17年生柠条(*Caragana korshinskii*)人工林为研究对象,分析平茬(0、10、20 cm)和未平茬(CK)处理下柠条人工林细根构型和土壤养分等指标变化。结果显示,土壤有机质、速效氮、有效磷及速效钾均在10 cm平茬模式下含量最高;不同平茬模式下细根均为典型的鱼尾形分支结构,且10 cm平茬模式有效改善了根系分支结构,增强了次级分支生长;不同平茬模式下柠条细根总根长、比根长、组织密度、干物质含量均在10 cm平茬模式下最优;隶属函数综合分析结果显示,平茬10 cm(0.58) > 平茬0 cm(0.46) > 平茬20 cm(0.44) > 未平茬(0.42)。以上结果表明,10 cm平茬模式对柠条更新复壮效果最好,有利于促进生态脆弱区水土保持以及生态环境可持续发展。

关键词 柠条;平茬;细根构型;拓扑结构

中图分类号 S728.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)06-0210-09

内蒙古生态脆弱区通常处于北方农牧交错带之间的过渡区,具有水分流失大、扰动多变、内部结构不稳定等特点,对外部扰动较为敏感^[1],正是这些要素之间的交互作用,造成了该区沙漠化、草原退化、生物多样性急剧下降、土壤侵蚀加剧等一系列生态问题^[2]。内蒙古生态脆弱区属沙漠化风蚀地貌,草原类型为典型荒漠草原^[3],总体的地势是北部低、南部高,土壤侵蚀状况比较严重,给当地的植树造林带来了巨大的困难。因此,在国家提倡减时增效的背景下,如何利用有限的生态条件,改善森林植被的水土保持能力,解决修复生态环境的问题,已迫在眉睫。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)是豆科锦鸡儿属的一种落叶灌木,又称柠条。研究发现,柠条可显著改善土壤持水能力,改良土壤结构^[4]。柠条是一种耐寒、耐旱的植物,也是我国干旱、半干旱区重要的生态经济造林树种^[5]。近年来,由于气候、树种搭配等方面的原因,包头市达茂旗(达尔罕茂明安联合旗)生态脆弱区的生态环境不断恶化,群落结构不断退化,生长6 a后,柠条锦鸡儿生长缓慢、衰弱,严重影响了其生态经济效益^[6]。

大量研究表明,平茬对柠条锦鸡儿的恢复和复壮具有显著的促进作用。黄海广等^[7]的研究表明,柠条新生枝数、生物量及碳含量均以50 cm平茬为最高;而0 cm平茬模式中柠条叶N含量最高,具有较好的饲用价值和生态效益。平茬不仅对植物地上部分的生长和发育具有重要作用,而且对植物根系的生长发育也会产生较大影响^[8]。刘晓宇等^[9]通过对砒砂岩区不同平茬高度下沙棘根系分形特性的研究,发现平茬能明显改变沙棘根系分形结构,且平茬高度15 cm为最佳。温健^[10]研究表明,平茬能有效提高根系抗逆性,促进细根快速生长,从而达到更新复壮。

合理平茬高度的选择是提高柠条产量的关键。常春^[11]提出,柠条生长期间平茬高度以2~4 cm为最佳,太低或太高均不利于柠条生长发育。这与王世裕等^[12]对晋西北柠条灌木林的研究相似,认为平茬距离地面0~3 cm最好。Zhang等^[13]对退化衰老的柠条进行研究,西北地区5 cm平茬高度对柠条的更新复壮效果最好。芦娟等^[14]在甘肃定西进行了0、5和10 cm柠条平茬处理,结果显示10 cm平茬高

收稿日期:2024-03-12

基金项目:内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2021GG0085);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR22-15-01)

张志强, E-mail: sui15104950895@163.com

通信作者:郭月峰, E-mail: guoyuefeng0525@126.com

度处理下柠条萌蘖、生长情况最好。王亮等^[15]对柠条平茬后的更新情况进行了研究,结果显示5 cm平茬高度是柠条平茬的最佳高度。而李滨^[16]研究结果显示,大同市周边地区的柠条应保持在3~8 cm的平茬高度。以上结果表明,不同地区柠条的适宜平茬高度存在差异。

当前,对柠条的研究多集中在土壤水分分配上,而对不同平茬方式下柠条根系构型和土壤养分的研究较少。为了改善生态脆弱区的生态环境和提高土壤的保水能力,本研究以内蒙古生态脆弱区达茂旗的柠条林为研究对象,采用不同的平茬模式,深入探讨不同平茬模式对柠条根系拓扑结构、根长、比根长、组织密度、干物质含量及土壤养分的影响,以期内蒙古生态脆弱区植被恢复提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区包头市达茂旗,是内蒙古自治区19个边境旗(市)和23个牧业旗之一。试验地点为内蒙古自治区包头市达茂旗的乌克忽洞镇,该区域位于半干旱农牧交错带,地理坐标为41°21′~42°47′N,109°16′~111°25′E,位于大青山西北内蒙古高原地带,地势南高北低,缓缓向北倾斜,平均海拔1367 m,属于中温带半干旱大陆性气候区^[17]。

1.2 试验方法

本研究选取的是达茂旗乌克忽洞镇内17年生且立地条件与生长状况相似的柠条人工灌木林。2021年3月进行0 cm(H1)、10 cm(H2)和20 cm(H3)不同高度的平茬处理,以未经平茬(CK)的柠条作为对照;2022年8月运用追踪法和全根挖掘法采集不同平茬模式样地内的柠条根系,同时在同一时间点采集对应土样用于后续土壤养分测定,土层深度分别为S1(0~10 cm)、S2(10~20 cm)、S3(20~30 cm)、S4(30~40 cm)、S5(40~50 cm),测定的土壤养分指标包括土壤有机质(soil organic matter, SOM)、速效氮(available nitrogen, AN)、有效磷(available phosphorous, AP)及速效钾(available potassium, AK)。

各试验区中挑选3丛典型柠条植株,将样本柠条的枝叶自基部砍下,清理植株基部周围杂草和枯落物,去除表层大部分土壤,剥离柠条根系周边泥土;沿着柠条主根和分支根的生长方向逐步挖掘,直到抵达根系末端,整个取样过程中力求最大限度保留末端低级根的完整性,以保障根系的整体性。挖掘

过程中按照不同水平方向(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)和垂直方向(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm)对柠条根系在土壤中的分布位置进行标记,并详细记录根系内部的连接数量(number of internal connections, A)和连接长度(connection length, P_e)。待柠条根系完全挖掘后,使用卷尺对其根垂直幅和根水平幅进行精确测量。将采集的根系装入保鲜袋,放入2~3℃冰箱,冷藏后带回实验室,用去离子水洗净根上附着的泥沙,使用EXPRESSION10000XL(爱普生,日本)扫描仪对细根进行扫描并利用WinRHIZO Pro软件测定细根总根长(total root length, RL)、外部连接数(number of external connections, M)、细根体积(root volume, RV)等,测定完成后,将采集的每个样品的细根置于水中,在4℃下遮光存储24 h,水分饱和后取出,用吸水纸吸干细根表面的水分,测定细根的饱和鲜质量;60℃下干燥48 h,测定细根干质量(root dry weight, RDW)。接下来分别计算细根比根长(specific root length, SRL)、细根干物质含量(root dry matter content, RDMC)、细根组织密度(root tissue density, RTD)。SRL为细根总根长与细根干质量的比值;RDMC为细根干质量与其水分饱和质量的比值;RTD为细根干质量与细根体积之比。

拓扑指数(topological index, T_1)采用Fitter^[18]的拓扑指数计算方法,如式(1)所示:

$$T_1 = \lg A / \lg M \quad (1)$$

式(1)中, M 代表根系所拥有的全部外部连接数量,“外部连接”指的是根系末端与其他根或土壤环境之间的连接点; A 表示根系中最长通道内部包含的连接总数,“最长通道”是指从根系的一个端点到另一个端点的最长路径,“连接总数”是指这条路径上所有连接的数量。当 T_1 值等于1时,根系呈现典型的鱼尾形分支结构;随着 T_1 值逐渐接近0.5,根系的形态则趋向于叉状分支类型。

Oppelt等^[19]提出了新的修正拓扑参数计算方法,如式(2)所示:

$$q_a = \frac{a-1-Ibv_0}{v_0-1-Ibv_0}; q_b = \frac{b-1-Ibv_0}{(v_0+1)/2 - 1/v_0 - Ibv_0} \quad (2)$$

式(2)中, a 代表的是植物根系的拓扑长度,即从植物基部到根系终端的连接数量。 b 表示平均拓扑长度,其计算方式为, $Ibv_0 = \ln v_0 / \ln 2$, $b = P_e / v_0$,而 v_0 在此处等同于式(1)中的 M 。 P_e 指从根系基部到根系终端通道的总长度。此外,通过修正得到的拓扑

参数 q_a 和 q_b 的取值范围均在0~1。对于鱼尾形分支结构而言,其特点是 q_a 与 q_b 的值均为1;而对于叉状分支结构, q_a 和 q_b 的值都为0。这2种理想化的分支模式之间存在过渡形式,此时 q_a 和 q_b 的数值会在0~1的范围内变化,以此来表征根系分支形态的复杂程度和多样性(图1)。

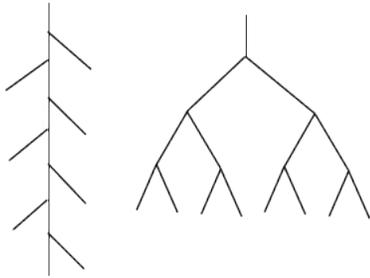


图1 根系拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of root topology

根系分支率根据 Strahler^[20]方法确定根级,从外向内定义根级别(图2),最外层的所有根被定义为一根。当2条一级根交汇时,形成的根为二级根;2条二级根交汇则形成三级根,依此类推。如果不同级别的根相遇,则采用较高的一方的级别作为交汇后根的级别;从外向内统计不同根级(i)的数量 N_i ,以 i 为横坐标, $\lg N_i$ 为纵坐标作图,细根分支率(fine root branching rate, Rb)由回归直线斜率的逆对数表示。

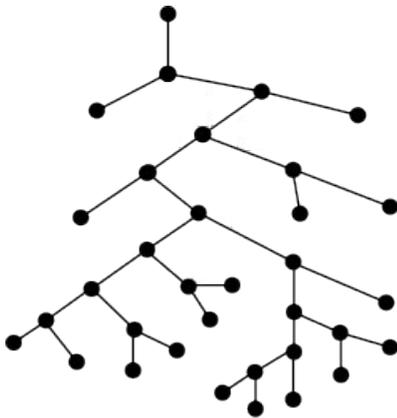


图2 根系分级示意图

Fig. 2 Schematic diagram of root grading

1.3 土壤养分分析

采用碱解扩散法测定速效氮(AN)含量;钼锑抗比色法测定有效磷(AP)含量;醋酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾(AK)含量;重铬酸钾外加热容量法测定土壤有机质(SOM)含量,具体方法参照文献[21]。

1.4 数据处理

采用 Excel2019 进行数据整理, SPSS26 进行差异显著性分析;利用 Origin 2018 绘制箱线图, Surfer

绘制细根总根长空间分布图;采用隶属函数法进行综合评价。

当指标与植物生长呈正相关时,即指标值越大植物生长越好时,使用隶属函数公式,如式(3)所示:

$$X(U) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

当指标与植物生长呈负相关时,即指标值越小植物生长越好时,使用反隶属函数公式,如式(4)所示:

$$X(U) = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, X 为指标的实际测量值; X_{\max} 为指标的最大值; X_{\min} 为指标的最小值。

2 结果与分析

2.1 不同平茬模式对柠条土壤养分的影响

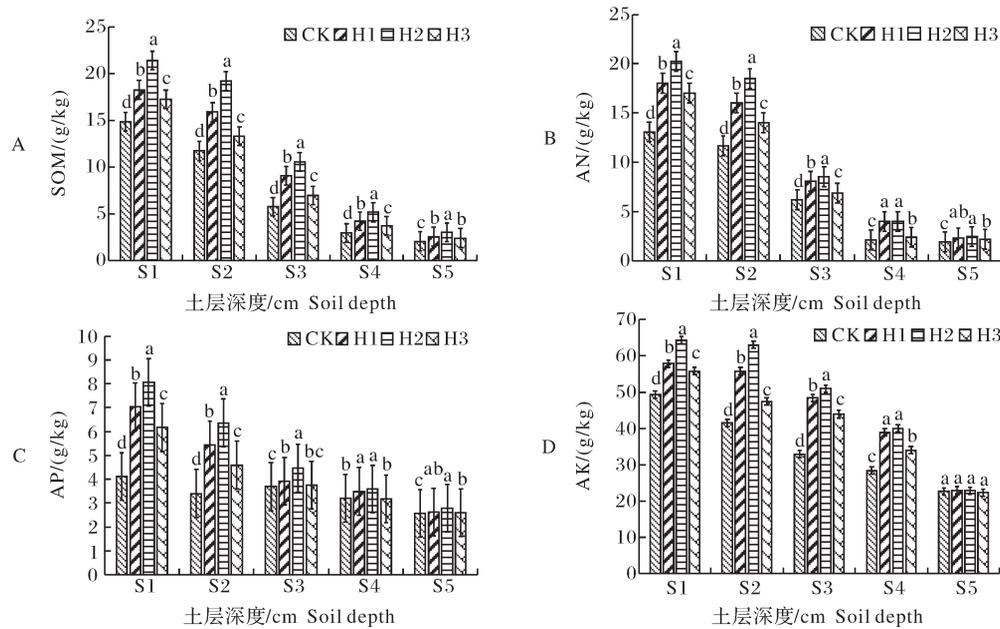
由图3可知,随着土壤深度逐渐增加,不同平茬模式下的土壤有机质(SOM)、速效氮(AN)、有效磷(AP)及速效钾(AK)含量均呈现出递减的趋势,具体表现为S1土层的含量最高,其次是S2、S3、S4、S5土层。在S1~S3土层范围内,与CK相比,不同平茬模式下的SOM、AN、AP和AK含量均有显著提升($P < 0.05$),具体表现为 $H2 > H1 > H3 > CK$;在S4~S5的土层中,与CK相比,不同平茬高度处理下的SOM、AN、AP和AK含量均有所提高。

2.2 柠条细根拓扑结构变化特征

由表1可以看出,不同平茬模式下, T_1 值表现为 $H2 < H1 < H3 < CK$,且均接近1,为典型的鱼尾形分支特征。然而,H2和H1处理组的 T_1 值较低,分别为0.78和0.86,说明10.0 cm平茬高度处理改善了柠条根系分支结构,增强了次级分支生长。H1、H2、H3处理组的细根分支率(Rb)均显著高于CK,其中H2模式下Rb值最高,为1.87。以上结果表明,不同平茬模式对根系拓扑结构的影响程度依次为 $H2 > H1 > H3 > CK$,10 cm平茬高度的影响效果最为显著。

2.3 柠条细根总根长变化特征

由图4可知,不同平茬模式下柠条细根总根长(RL)存在明显差异,表现为 $H2(2179.49 \text{ cm}) > H1(2066.39 \text{ cm}) > H3(1832.16 \text{ cm}) > CK(1556.99 \text{ cm})$,H1、H2和H3模式的RL值分别是CK的1.29、1.35和1.16倍,表明平茬能有效增加柠条的细根总根长,其中10 cm平茬模式对总根长的增益效果最为突出。进一步分析发现,平茬和CK中RL值均随着植株基部中心水平和垂直距离的增加而逐渐减小,CK、H1、



A:土壤有机质含量 Content of SOM;B:速效氮含量 Content of AN;C:有效磷含量 Content of AP;D:速效钾含量 Content of AK。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same as follows.

图3 不同平茬模式及不同土层深度土壤养分含量

Fig. 3 Soil nutrient content under different stumping modes and different soil depths

表1 不同平茬模式处理下柠条细根拓扑指数

Table 1 Topological index of fine roots of *Caragana korshinskii* under different stumping modes

处理 Treatment	T_1	q_a	q_b	细根分支率 Fine root branching rate
H1	0.86±0.01b	0.60±0.01c	0.44±0.01c	1.76±0.03b
H2	0.78±0.03c	0.43±0.04d	0.31±0.04d	1.87±0.02a
H3	0.91±0.02a	0.71±0.02b	0.52±0.03b	1.57±0.03c
CK	0.95±0.01a	0.86±0.01a	0.61±0.02a	1.17±0.01d

注:不同小写字母表示不同处理间显著差异($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$).

H2和H3不同模式的RL值分别从119.94、158.62、126.24 cm增加到1 727.64、2 316.78、2 412.16、1996.54 cm,分别增长1340.42%、1 109.93%、1 420.72%、1 481.54%;各模式下的细根主要集中在0~30 cm土层内,在垂直距离为10~20 cm、水平距离为10 cm的位置,RL值最大;而在垂直距离40~50 cm、水平距离80~100 cm处,RL值降至最低点。

2.4 柠条细根比根长变化特征

由图5可知,不同平茬模式柠条细根比根长(SRL)均显著高于CK($P<0.05$);H1与H3无显著差异($P>0.05$),与H2和CK存在显著差异($P<0.05$);

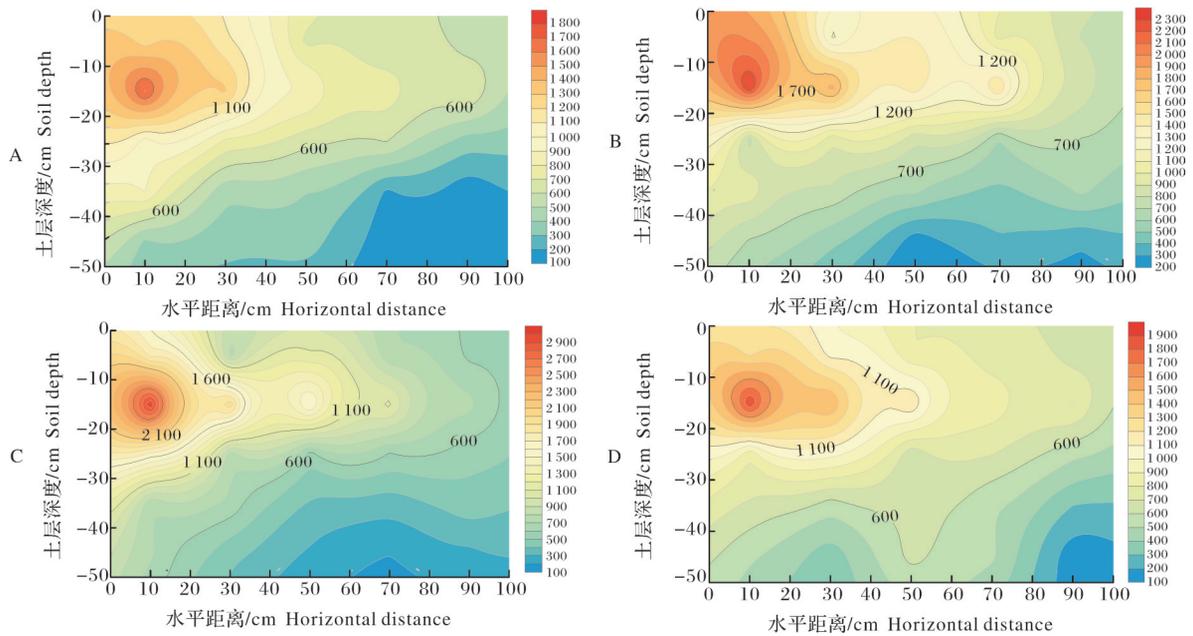
H2与H1、H3和CK存在显著差异($P<0.05$)。不同平茬模式下柠条SRL表现为H2(88.03 cm/g) $>$ H1(79.41 cm/g) $>$ H3(73.57 cm/g) $>$ CK(70.84 cm/g),表明平茬影响了柠条细根生长,10 cm平茬模式下柠条细根比根长最高。

2.5 柠条细根组织密度变化特征

如图6所示,不同平茬模式下柠条细根组织密度(RTD)均低于CK,H2与CK有显著差异($P<0.05$);H1和H3与CK无显著差异($P>0.05$);H1和H3无显著差异($P>0.05$),但都与H2有显著差异($P<0.05$)。不同平茬模式RTD表现为H2(5.20 g/cm³) $<$ H3(5.63 g/cm³) $<$ H1(5.65 g/cm³) $<$ CK(5.67 g/cm³),表明平茬影响了柠条细根组织密度,10 cm平茬高度处理柠条细根组织密度最小。

2.6 柠条细根干物质含量变化特征

如图7所示,不同平茬模式下柠条细根干物质含量(RDMC)均低于CK,H1和H2与CK有显著差异($P<0.05$);H3与CK无显著差异($P>0.05$);H3与H1和H2有显著差异($P<0.05$)。不同平茬模式RDMC表现为H2(0.426 g/g) $<$ H1(0.452 g/g) $<$ H3(0.465 g/g) $<$ CK(0.467 g/g),表明平茬影响了柠条细根干物质含量,10 cm平茬高度处理柠条细根干物质含量最高。



A: 未平茬 Non-stumping; B: 平茬0 cm Stumping with 0 cm; C: 平茬10 cm Stumping with 10 cm; D: 平茬20 cm Stumping with 20 cm.

图4 细根总根长空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of total fine root length

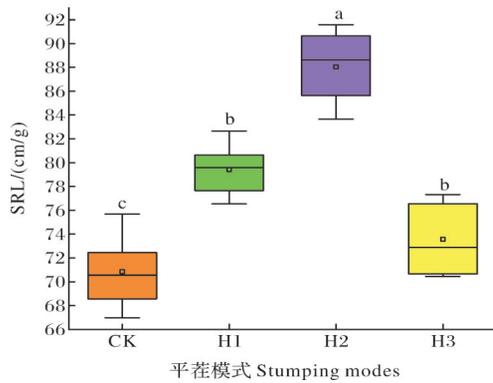


图5 不同平茬模式细根比根长变化

Fig. 5 Changes of specific root length of fine roots under different stumping modes

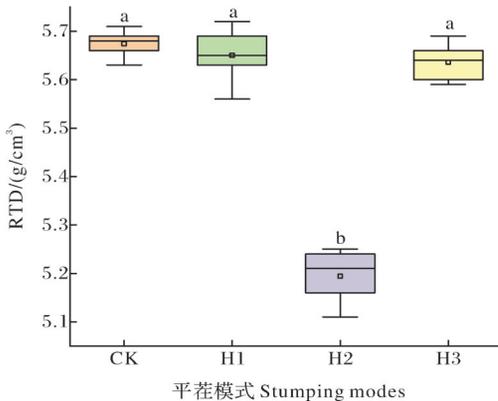


图6 不同平茬模式细根组织密度变化

Fig. 6 Changes of fine root tissue density in different stumping modes

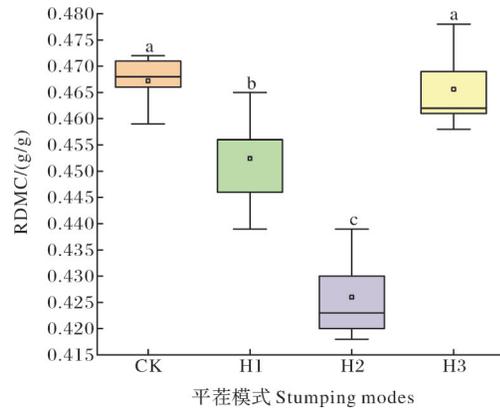


图7 不同平茬模式细根干物质含量变化

Fig. 7 Changes of fine root dry matter content under different stumping modes

2.7 不同平茬模式下柠条各指标隶属函数分析

由表2可知,经过平茬处理的柠条根系构型及其所在土壤特征的隶属函数平均值均高于未平茬处理。各平茬模式下柠条根系构型及土壤特性的变化规律各异,其中H1和H3之间的差异较小,与CK的差异也较小;H2与H1、H3和CK差异较大。根据隶属函数平均值的排序,不同平茬模式下的优劣顺序为: H2(0.58) > H1(0.46) > H3(0.44) > CK(0.42),表明经过平茬的柠条在综合表现上明显优于未平茬的柠条,其中以10 cm平茬模式最为理想。

表2 各指标隶属函数法综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of the membership function method of each index

平茬模式 Stumping modes	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	均值 Means
H1	0.47	0.47	0.43	0.63	0.50	0.55	0.50	0.18	0.29	0.47	0.56	0.50	0.46
H2	0.48	0.47	0.43	0.61	0.73	0.83	0.57	0.56	0.63	0.55	0.50	0.62	0.58
H3	0.43	0.43	0.41	0.55	0.29	0.54	0.40	0.30	0.25	0.42	0.60	0.65	0.44
CK	0.42	0.46	0.54	0.46	0.17	0.45	0.50	0.25	0.50	0.44	0.50	0.38	0.42

注 Note: X₁:SOM;X₂:AN;X₃:AP;X₄:AK;X₅:T₁;X₆:q_a;X₇:q_b;X₈:Rb;X₉:RL;X₁₀:SRL;X₁₁:RTD;X₁₂:RDMC.

3 讨论

柠条是内蒙古生态脆弱地区的主要植物,其根系发达,萌蘖能力强,在不同刈割方式下,其生理功能存在复杂变化。大部分植被在刈割和平茬后均表现出补偿性生长^[22]。经过处理的柠条虽然去除了大量的地上部分,导致了短暂的光合作用下降,但同时也会影响到植物的养分分布,短期内植物会对储存的物质进行重新分配,以保持植物体的生长^[23]。本研究发现不同平茬模式下柠条的生长更新状况比未平茬要好,这与耿文诚等^[24]在夏秋季刈割能促进白三叶及杂草的高度生长研究结果一致。

根系是植物体内的一个重要器官,它可以将水分、养分和营养物质运输到体内,是养分运输的主要通道。不同植物体的根系具有不同的空间分布格局,因此,研究其空间分布规律,首先需要了解其林下根系的水平分布和垂直分布规律。由于柠条根系可分为细根、粗根及骨骼根,其中细根在柠条生长发育过程中发挥重要作用,因此,本研究以柠条细根为研究对象,发现平茬后柠条细根的各项形态指标都较未平茬的高,这与温健^[10]的研究结果相吻合。

拓扑结构特征是根系构型的重要组成部分,决定了根系在土壤中的空间分布^[25]。本研究结果表明不同平茬模式下柠条细根拓扑指数均接近于1,均为典型的鱼尾形分支模式。鱼尾型分支可通过其自身的优点,有效规避内部的竞争,快速占据多余的空间,实现营养的高效吸收,能够根据栖息地的变化,快速适应不同的生态环境^[26]。随着平茬高度的增加,拓扑指数呈现先减小后增大的趋势,平茬10 cm模式的拓扑指数明显小于未平茬,表明平茬后根系分支发生了明显的改变,次生分支明显增加。这主要是由于柠条在平茬后的补偿性恢复生长期间,对资源的利用效率及对营养物质的保留能力持续提高,

进而提高其对土壤营养物质的吸收能力,从而促进了柠条的再生与恢复,并以10 cm的平茬为最佳。根系分支状况能够反映出其固土能力。随着根系的分支增多,其内部的结构也变得更加复杂,与土壤的接触面变得更大,因此固土性能更好^[27]。本研究发现,柠条在不同平茬模式下,其细根分叉比例都很低,表明柠条在逆境条件下减少了根枝数量,降低了碳的消耗和根系的重叠,减少了根系间的竞争,实现了对环境资源的最大化利用。然而,平茬后柠条的分支率明显高于未平茬的柠条,表明平茬可以提高柠条的分支能力,并促进其对营养物质的吸收。不同处理的细根平均直径均小于未平茬,是由于平茬后柠条根系分支能力增强,细根增多,平均直径减小,说明平茬能够提高柠条的水分和养分吸收能力,特别是10 cm平茬对柠条构型的影响最为显著。柠条的根系多分布于地表,呈浅层分布,其水平根相对发达,既能增强其对空间的占有,又能高效地从土壤中吸收水、营养物质;而较发达的水平根则能较好地固着并支持整株植物^[28]。研究发现,平茬对柠条细根总根长有明显的促进作用,其中10 cm平茬模式的效果最好。

细根比根长是决定根系吸收水分和养分能力的重要形态结构^[29]。已有研究发现,在营养缺乏或种间竞争条件下,植株通过增加比根长、根表面积等来增强其吸收营养或竞争能力^[30]。本研究发现,与未平茬模式相比,平茬处理后柠条的细根比根长明显增加,细根组织密度和细根干物质含量下降,与前人的研究结果基本一致。究其原因,是由于平茬后,柠条的资源获得状况发生了变化,导致了柠条的建叶成本下降,进而减少了植被的蒸腾耗散;同时,柠条根系分支能力增强,对土壤营养物质的吸收利用效果提升,使得柠条能够更好地适应环境,并通过调节其对环境的适应性来改善其存活率,为其生长代谢提供水和营养物质^[31],从而形成高比根长、低组织密

度、低干物质含量的生长策略。

不同平茬模式的根系和土壤养分特性都明显优于未平茬柠条,表明平茬能够促进柠条叶片的生长、增加根系的分支能力、对地下空间的占据能力以及对养分的争夺能力,增强了根系对土壤的缠绕与固结,使土壤渗透性增强、土壤水分入渗量增大,降水得到更好的保存。其中,10 cm平茬模式土壤养分最高,通过对各层土壤养分的比较发现,浅层土壤的营养成分明显高于深层,究其原因,是因为林地表层大量的植被凋落物在分解时,会生成各种结构的有机质^[32]。本研究发现,平茬能显著提高根系的生长速度,并能有效地提高土壤营养物质的分配,其中10 cm平茬效果最为显著。

本研究对柠条不同平茬模式下根系的构型及土壤养分情况进行了测定,发现平茬可以有效地促进植物根系的生长发育,并改善土壤养分,其中平茬10 cm模式相对最优,但本研究难以全面揭示随平茬年限增加和更多平茬高度的变化,柠条生长特性和生理特性的变化规律,因此,要全面弄清柠条不同平茬模式下生长情况,还需要持续观测、开展更多更深入的研究工作。

参考文献 References

- [1] 杨航,侯景伟,马彩虹,等.黄河上游生态脆弱区复合生态系统韧性时空分异:以宁夏为例[J].干旱区研究,2023,40(2):303-312.YANG H, HOU J W, MA C H, et al. Spatio-temporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: a case study in Ningxia [J]. Arid zone research, 2023, 40 (2): 303-312 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张鹏,吴春生,朱毕生,等.我国生态脆弱区生态技术分类体系研究进展[J].应用生态学报,2023,34(2):547-554. ZHANG P, WU C S, ZHU B S, et al. Progress on eco-technology classification in ecologically vulnerable regions of China [J]. Chinese journal of applied ecology, 2023, 34 (2): 547-554 (in Chinese with English abstract).
- [3] 樊婷,张存厚,张德广,等.内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的响应[J].水土保持通报,2020,40(1):72-77. FAN T, ZHANG C H, ZHANG D G, et al. Response of soil moisture of desert steppes to precipitation patterns in Damao banner, Inner Mongolia [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2020, 40 (1): 72-77 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王利,包颖,杨爱国,等.柠条锦鸡儿抗旱性研究进展[J].吉林林业科技,2022,51(5):37-38. WANG L, BAO Y, YANG A G, et al. Research progress on drought resistance of *Caragana korshinskii* [J]. Journal of Jilin forestry science and technology, 2022, 51 (5): 37-38 (in Chinese with English abstract).
- [5] 卢国,郭佳祥,栾培贤.东北地区林蛙资源利用现状及养护对策[J].水产学杂志,2022,35(3):93-97. HU G, GUO J X, LUAN P X. Conservation and utilization status for forest frog resources in Northeast China: a review [J]. Chinese journal of fisheries, 2022, 35 (3): 93-97 (in Chinese with English abstract).
- [6] 沈泽昊,张新时,金义兴.地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析[J].植物生态学报,2000,24(4):430-435. SHEN Z H, ZHANG X S, JIN Y X. Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern [J]. Acta phytocologica sinica, 2000, 24 (4): 430-435 (in Chinese with English abstract).
- [7] 黄海广,李雪华,刘思洋,等.平茬高度对人工固沙灌木柠条锦鸡儿群落的影响[J].防护林科技,2022(6):9-13. HUANG H G, LI X H, LIU S Y, et al. Effect of stump height on artificial sand-fixing shrubs *Caragana korshinskii* community [J]. Protection forest science and technology, 2022 (6): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- [8] FAGERNESS M J, YELVERTON F H. Plant growth regulator and mowing height effects on seasonal root growth of penncross creeping bentgrass [J]. Crop science, 2001, 41 (6): 1901-1905.
- [9] 刘晓宇,郭月峰,姚云峰,等.砒砂岩区不同留茬高度及坡向下沙棘根系分形特征[J].生态环境学报,2021,30(1):100-107. LIU X Y, GUO Y F, YAO Y F, et al. Fractal features of *Hippophae rhamnoides* roots under different stubble height and slopes in soft sandstone area [J]. Ecology and environmental sciences, 2021, 30 (1): 100-107 (in Chinese English abstract).
- [10] 温健.平茬措施对柠条锦鸡儿细根生长及生理特征的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018. WEN J. Effects of stubble leveling measures on fine root growth and physiological characteristics of *Caragana korshinskii* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [11] 常春.柠条生长季刈割关键技术研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010. CHANG C. Study on key techniques of cutting *caragana korshinskii* in growing season [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王世裕,王世昌,卢爱英.晋西北地区柠条林更新复壮技术研究[J].现代农业科技,2011(1):223-224. WANG S Y, WANG S C, LU A Y. Study on rejuvenation techniques of *Caragana korshinskii* forest in northwestern Shanxi Area [J]. Modern agricultural science and technology, 2011 (1): 223-224 (in Chinese).
- [13] ZHANG Y, ZHENG S G, JIA L M. Research for stumping technology and utilization for energy of inefficient *Caragana*

- microphylla* Lam forest in northwestern Shanxi Province [J]. Research of soil and water conservation, 2013, 20 (2): 160-164.
- [14] 芦娟, 柴春山, 蔡国军, 等. 不同留茬高度处理对柠条更新能力的影响 [J]. 防护林科技, 2011(4): 45-47. LU J, CHAI C S, CAI G J, et al. Effects of different stubble heights on regeneration of *Caragana korshinskii* [J]. Protection forest science and technology, 2011(4): 45-47 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王亮, 李青丰, 樊如月, 等. 小叶锦鸡儿的再生特性 [J]. 内蒙古科技与经济, 2017(7): 57-60. WANG L, LI Q F, FAN R Y, et al. Regeneration characteristics of *Caragana microphylla* [J]. Inner Mongolia science technology & economy, 2017(7): 57-60 (in Chinese).
- [16] 李滨. 柠条机械平茬技术分析 [J]. 当代农机, 2013(1): 79-80. LI B. Technical analysis of mechanical stubble leveling of *Caragana korshinskii* [J]. Contemporary farm machinery, 2013 (1): 79-80 (in Chinese).
- [17] 霍擎. 包头市达茂旗气候资源研究 [J]. 阴山学刊(自然科学版), 2006, 20(1): 29-31. HUO Q. Research on the climate resource in Damao County, Baotou [J]. Yinshan academic journal (natural science edition), 2006, 20(1): 29-31 (in Chinese with English abstract).
- [18] FITTER A H. The topology and geometry of plant root systems: influence of watering rate on root system topology in *Trifolium pratense* [J]. Annals of botany, 1986, 58 (1): 91-101.
- [19] OPPELT A L, KURTH W, GODBOLD D L. Contrasting rooting patterns of some arid-zone fruit tree species from Botswana - II. Coarse root distribution [J]. Agroforestry systems, 2005, 64(1): 13-24.
- [20] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America bulletin, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [21] 鲍士旦. 土壤农机化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Analysis of soil agricultural mechanization [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [22] BELESKY D P, FEDDERS J M. Defoliation effects on seasonal production and growth rate of cool-season grasses [J]. Agronomy journal, 1994, 86(1): 38-45.
- [23] WALLACE L L, MACKO S A. Nutrient acquisition by clipped plants as a measure of competitive success: the effects of compensation [J]. Functional ecology, 1993, 7(3): 326-331.
- [24] 耿文诚, 张英俊, 邵学芬, 等. 刈割对白三叶种子及草产量的影响 [J]. 草地学报, 2007, 15(3): 248-253. GENG W C, ZHANG Y J, SHAO X F, et al. Effects of different cutting regimes on herbage production and seed yields of white clover [J]. Acta agrestia sinica, 2007, 15(3): 248-253 (in Chinese with English abstract).
- [25] VAN DER BOM F J T, WILLIAMS A, BELL M J. Root architecture for improved resource capture: trade-offs in complex environments [J]. Journal of experimental botany, 2020, 71(19): 5752-5763.
- [26] OPPELT A L, KURTH W, GODBOLD D L. Topology, scaling relations and *Leonardo's* rule in root systems from African tree species [J]. Tree physiology, 2001, 21 (2/3): 117-128.
- [27] FAVERJON L, ESCOBAR-GUTIÉRREZ A, PAGÈS L, et al. Root growth and development do not directly relate to shoot morphogenetic strategies in temperate forage legumes [J]. Plant and soil, 2019, 435(1): 277-294.
- [28] SILVA E N, FERREIRA-SILVA S L, ALMEIDA VIÉGAS R, et al. The role of organic and inorganic solutes in the osmotic adjustment of drought-stressed *Jatropha curcas* plants [J]. Environmental and experimental botany, 2010, 69 (3): 279-285.
- [29] KRAFT N J B, ACKERLY D D. Functional trait and phylogenetic tests of community assembly across spatial scales in an Amazonian forest [J]. Ecological monographs, 2010, 80 (3): 401-422.
- [30] LIU L, GUO Y F, LIU X Y, et al. Stump height after regenerative cutting of sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) affects fine root architecture and rhizosphere soil stoichiometric properties [J/OL]. Rhizosphere, 2022, 24: 100602 [2024-03-12]. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100602>.
- [31] YUAN J H, LI H Y, YANG Y F. The compensatory tillering in the forage grass *Hordeum brevisubulatum* after simulated grazing of different severity [J/OL]. Frontiers in plant science, 2020, 11: 792 [2024-03-12]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00792>.
- [32] 乔福生, 王长庭, 宋小艳, 等. 3种多年生禾本科牧草不同径级根系特征比较 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (5): 1100-1108. QIAO F S, WANG C T, SONG X Y, et al. Comparison of root characteristics of three perennial grasses with different diameter classes [J]. Chinese journal of applied and environmental biology, 2023, 29(5): 1100-1108 (in Chinese with English abstract).

Effects of stumping modes on configuration of fine root and nutrients in soil of *Caragana korshinskii*

ZHANG Zhiqiang¹, GUO Yuefeng¹, QI Wei², BU Fanjing³, LIU Ke⁴

1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Department of Soil and Water Conservation, Inner Mongolia Water Conservancy Development Center, Hohhot 010020, China;

3. Ongniud Banner Water Conservancy Development Center, Chifeng 024500, China;

4. Zhungeer Banner Water Conservancy Development Center, Erdos 017100, China

Abstract The 17-year-old forest of *Caragana korshinskii* in Damao Banner, Baotou City, Inner Mongolia was used to study the rule of changes in the configuration of fine root and the nutrients in soil of *Caragana korshinskii* under different stumping modes. The changes in the configuration of fine root and the nutrients in soil of artificial forests of *Caragana korshinskii* under treatments of stumping with 0 cm, 10 cm, and 20 cm and non-stumping (CK). The results showed that the content of soil organic matter (SOM), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) in soil was the highest in the mode of stumping with 10 cm. The fine roots under different stumping modes had a typical fish-tail-shaped branching structure, and the mode of stumping with 10 cm effectively improved the root branching structure and enhanced the growth of secondary branches. The total root length, specific root length, tissue density, and the content of dry matter in fine roots of *Caragana korshinskii* all were the best under the mode of stumping with 10 cm. The results of comprehensive analysis of membership function showed that the decreasing order was stumping with 10 cm (0.58) > stumping with 0 cm (0.46) > stumping with 20 cm (0.44) > no stubble (0.42). It is indicated that the mode of stumping with 10 cm has the best effect on the regeneration and rejuvenation of *Caragana korshinskii*, which is conducive to promoting the conservation of soil and water and the sustainable development of the ecological environment in ecologically fragile areas.

Keywords *Caragana korshinskii*; stumping; configuration of fine root; topological structure

(责任编辑:葛晓霞)