

## 宁夏黄土区平茬对退化沙棘林土壤水分的影响

李振明<sup>1</sup>,董立国<sup>1,2</sup>,安钰<sup>1</sup>,万海霞<sup>1</sup>,韩新生<sup>1</sup>,何钰<sup>1</sup>,王月玲<sup>1</sup>,  
郭永忠<sup>1</sup>,韩懂懂<sup>1</sup>,许浩<sup>1</sup>,郑纪勇<sup>3</sup>,蔡进军<sup>4</sup>

(1.宁夏农林科学院林业与草地生态研究所,银川 750002; 2.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100;  
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100; 4.宁夏农林科学院农作物研究所,银川 750002)

**摘要:** [目的]为解决退化沙棘林平茬与土壤水分关系不清的问题,系统研究平茬对退化沙棘林土壤水分的影响,以期对宁夏黄土区沙棘林平茬复壮提供理论和技术上的支撑。[方法]设置平茬(高度 $\leq 30$  cm)、不平茬2个处理,每个处理4个重复,采用随机区组设计进行排列。[结果]1)平茬处理表层(0~20 cm)土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加4.10%~70.01%;平茬处理浅层(20~80 cm)土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加8.99%~11.12%;平茬处理中层(80~180 cm)土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加14.36%~28.97%;平茬处理深层(180~280 cm)土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加5.48%~29.21%。2)平茬处理0~280 cm土层土壤储水量较未平茬处理显著增加7.11%~22.90%,土壤水分亏缺指数较未平茬处理显著增加98.16%~300.00%。3)平茬处理表层(0~20 cm)土壤总孔隙度较未平茬处理显著减少1.90%,非毛管孔隙度较未平茬处理显著减少44.84%,毛管孔隙度较未平茬处理显著增加1.18%。[结论]退化沙棘林平茬显著增加土壤水分体积分数、储水量及毛管孔隙度,减少土壤水分亏缺。

**关键词:**宁夏黄土区;沙棘;平茬;土壤水分;持水特性

中图分类号:S157.8

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)04-0208-07

## Effect of Stumping on Soil Moisture in Degraded Seabuckthorn Forests in Ningxia Loess Area

LI Zhenming<sup>1</sup>, DONG Ligu<sup>1,2</sup>, AN Yu<sup>1</sup>, WAN Haixia<sup>1</sup>, HAN Xinsheng<sup>1</sup>, HE Yu<sup>1</sup>, WANG Yueling<sup>1</sup>,  
GUO Yongzhong<sup>1</sup>, HAN Dongdong<sup>1</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, ZHENG Jiyong<sup>3</sup>, CAI Jinjun<sup>4</sup>

(1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;

2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and

Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Crop Research Institute,

Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** [Objective] To clarify the relationship between stumping and soil moisture in degraded seabuckthorn forests, a systematic study is conducted to evaluate the effects of stumping on soil moisture dynamics, aiming to provide theoretical and technical support for the restoration of seabuckthorn forests through stumping in the Ningxia Loess area. [Methods] Two treatments were established: stumping (height $\leq 30$  cm) and no stumping, each with four replicates, arranged in a randomized block design. [Results] 1) The volumetric soil moisture content in the surface layer (0—20 cm) under the stumping treatment increased significantly by 4.10%—70.01%, compared to the no stumping treatment. In the shallow layer (20—80 cm), it increased significantly by 8.99%—11.12%. In the middle layer (80—180 cm), it increased significantly by 14.36%—28.97%. In the deep

收稿日期:2025-01-23

修回日期:2025-04-16

录用日期:2025-04-29

网络首发日期(www.cnki.net):2025-05-29

资助项目:宁夏重点研发计划项目(2023 BEG02050,2023 BEG02042);宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题项目(NGSB-2021-14-01,NGSB-2021-14-02,NGSB-2021-11-06);国家自然科学基金项目(31660375);宁夏青年拔尖人才培养工程项目(RQ0025)

第一作者:李振明(1998—),男,硕士,主要从事水土保持与荒漠化治理研究。E-mail:2198457694@qq.com

通信作者:董立国(1980—),男,博士,副研究员,主要从事森林生态、水土保持与土壤健康研究。E-mail:dlg0303@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

layer (180—280 cm), it increased significantly by 5.48%—29.21%. 2) The soil water storage in the 0—280 cm profile under stumping significantly increased by 7.11%—22.90%, and the soil moisture deficit index significantly increased by 98.16%—300.00% compared to the no stumping treatment. 3) In the surface layer (0—20 cm), total soil porosity under stumping significantly decreased by 1.90%, non-capillary porosity decreased by 44.84%, while capillary porosity increased by 1.18%. [Conclusion] Stumping of degraded seabuckthorn forests significantly enhances soil moisture content, water storage capacity, and capillary porosity, while reducing the soil moisture deficit.

**Keywords:** Ningxia loess area; seabuckthorn; stumping; soil moisture; water holding capacity

Received: 2025-01-23

Revised: 2025-04-16

Accepted: 2025-04-29

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

土壤水分受到降雨、植被、地形等多方面因素影响<sup>[1-2]</sup>,是干旱半干旱区植被系统分布格局和演替过程的驱动力,它不仅直接参与土壤的形成和发育过程,还通过影响土壤的物理、化学和生物性质对植物的生长和发育产生重要影响。同时,土壤水分也是地表水与地下水间联系的重要纽带对维持水文循环和生态平衡具有重要作用。宁夏黄土区地处黄土高原的西北边缘,气候干旱,降水稀少,水土流失与植被退化问题严重,生态环境十分脆弱<sup>[3-4]</sup>。沙棘被广泛用于生态修复工程,据宁夏林业厅有关数据<sup>[5]</sup>显示,六盘山区天然沙棘林约有1万hm<sup>2</sup>,实施退耕还林政策后,人工种植沙棘林约有5万hm<sup>2</sup>。其生长速度快,繁殖能力强,根系发达,能够迅速覆盖大片裸露的土地,在干旱、盐碱和风沙等恶劣条件下生存,有效防止水土流失<sup>[6-8]</sup>。沙棘还具有较高的经济价值,其果实富含多种营养成分,如维生素C、脂肪酸、矿物质和微量元素等,对人体健康具有显著的保健作用<sup>[9-10]</sup>。然而,随着林龄的增长,沙棘林面临土壤水分亏缺、退化及病虫害等问题,严重影响其生态功能,致使后期生长缓慢、退化乃至衰败枯死。平茬是沙棘抚育管理和恢复种群稳定性的重要手段之一,通过平茬不但可以获得燃料和饲料,而且还能够促使根系和伐桩大量萌蘖,从而达到更新复壮。平茬有效提高沙棘林的生态功能和经济价值,在沙棘林的可持续经营中具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。

闵梓骁等<sup>[13]</sup>研究表明,不同立地条件对沙棘林土壤水分及植株的生长具有显著影响;袁思安等<sup>[14]</sup>研究表明,随着土壤质量含水率的降低,林分的密度逐渐变小,离散程度加大,郁闭度逐渐降低,更新速度减缓,土壤水分引起的变异占总变异的50.26%,从而形成多样性的种群结构。然而关于平茬处理对沙棘林土壤水分体积分数和水分亏缺影响的研究较少,因此,针对当前宁夏黄土区沙棘林退化及土壤水分亏缺等问题,以宁夏黄土区退化沙棘林为研究对象,系统开展平茬对沙棘林土壤水分的影响研究,以

期为宁夏黄土区沙棘林平茬复壮及减少土壤水分亏缺提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于彭阳县白阳镇中庄村小流域。地处宁夏南部六盘山东麓(35°41'~36°17'N, 106°32'~106°58'E)。属典型的温带大陆性气候,土壤以黄绵土为主。地貌类型为黄土梁峁丘陵区,海拔为1400~1800 m,气候类型属典型的温带大陆性季风气候(图1)。2021—2024年气温变化一致,年平均气温9.6℃,无霜期140~160 d,2021—2024年平均降水量331~442 mm,主要集中于7—9月。土壤类型以黄绵土为主,pH为7.81,有机质6.3 g/kg,全氮0.63 g/kg,碱解氮7.65 mg/kg,全磷0.53 g/kg,速效磷10.93 mg/kg,全钾3.64 g/kg,速效钾92.92 mg/kg,土壤肥力偏弱,土厚较深>10 m,土质疏松,孔隙度大,透水性、抗冲性较弱。

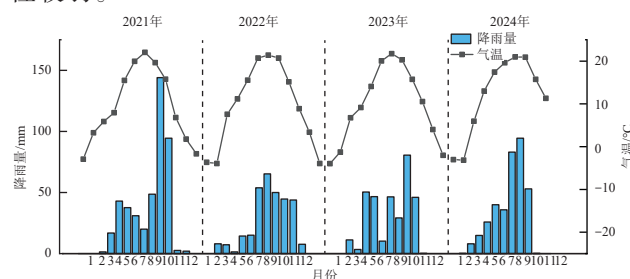


图1 2021—2024年研究区降雨量及气温变化特征

Fig. 1 Characteristics of rainfall and temperature variations in the study area from 2021 to 2024

### 1.2 试验设计

本试验设置平茬(留桩30 cm以内)和未平茬2个处理。试验采用随机区组排列(图2),每个小区均为10 m×10 m=100 m<sup>2</sup>,共8个小区,每个小区间设置2 m隔离带。于2021年4月进行平茬,于2021—2024年每年8月实施调查,其中2022年4月、6月及8月调查。

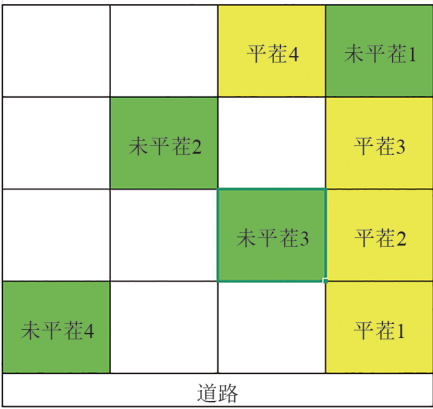


图 2 试验分布

Fig. 2 Experimental layout map

1.3 指标测定与计算

1.3.1 土壤水分体积分数的测定 每个小区布设 1 根 3 m 的 TDR 水分测试管,每次测量时,每 20 cm 设置 1 个监测点,测量 2 次重复。

1.3.2 土壤水分亏缺计算 土壤水分变化,在某一特定时段和一定作物的状况下,对于一定深度的土壤,可用水分平衡方程为<sup>[15]</sup>:

$$P + U = E_c + F + R + \Delta W \tag{1}$$

式中: $P$ 为降水量,mm; $U$ 为地下水补给量,mm; $E_c$ 为蒸散发量,mm; $R$ 为深层渗漏量,mm; $F$ 为地表径流量,mm; $\Delta W$ 为土壤储水变化量,mm。由于试验地坡度一致,为简便计算,忽略地表径流,地下水埋深在 10 m 以下,无渗漏,所以  $U$ 、 $R$ 、 $F$  可忽略不计。所以简化为:

$$E_c = P - \Delta W \tag{2}$$

土壤水分亏缺指数(SMDI)广泛应用描述土壤干旱(表 1),使用土壤质量含水率计算数据 SMDI<sup>[16-17]</sup>的计算公式为:

$$SD_{i,j} = \begin{cases} \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \times 100 & SW_{i,j} \leq MSW_j \\ \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \times 100 & SW_{i,j} > MSW_j \end{cases} \tag{3}$$

$$SMDI_{i,j} = \begin{cases} 0.5SMDI_{i,j-1} + \frac{SD_{i,j}}{50} & j > 1 \\ \frac{SD_{i,j}}{50} & j = 1 \end{cases} \tag{4}$$

式中: $SD_{i,j}$ 为第  $i$  年第  $j$  个月的土壤水分亏缺,%; $SW_{i,j}$ 为土壤剖面中特定时间尺度的平均土壤水分体积分数,mm; $MSW_j$ 为土壤剖面中长期平均土壤水分体积分数,mm; $\max SW_j$ 为土壤剖面中长期最大水分体积分数,mm; $\min SW_j$ 为长期最小土壤水分体积分数土壤剖面中的水分体积分数,mm。本实验计算每年 8 月份土壤亏缺指数。

表 1 SMDI 干旱等级

Table 1 SMDI drought levels

| 干旱严重程度 | SMDI                   |
|--------|------------------------|
| 正常干旱   | $-1 \leq SMDI \leq 1$  |
| 轻度干旱   | —                      |
| 中度干旱   | $-2 \leq SMDI \leq -1$ |
| 重度干旱   | —                      |
| 极度干旱   | $SMDI \leq -2$         |

1.3.3 土壤持水特征测定 将表层(0~20 cm)土壤用环刀法取样,每个小区取 3 个重复,采用参照 LY/T 1 215—1 999《森林土壤水分—物理性质的测定》<sup>[18]</sup>测定土壤储水量、体积质量及土壤孔隙度等。

1.4 数据整理与分析

本试验采用 Excel 软件进行数据整理分析;SPSS 软件进行单因-素方差分析;Origin 2024 b 软件进行绘图处理。

2 结果与分析

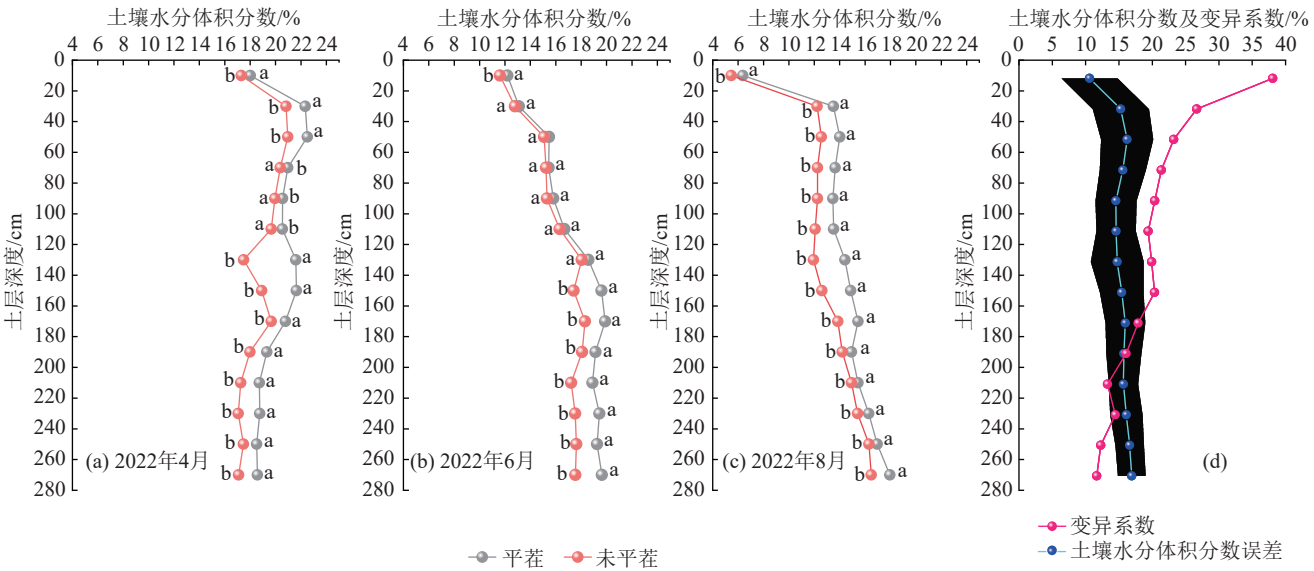
2.1 平茬对土壤水分体积分数的影响

根据土壤水分体积分数的变化结合变异系数<sup>[19-20]</sup>,将 0~280 cm 土层土壤分为表层(0~20 cm)、浅层(20~80 cm)、中层(80~180 cm)和深层(180~280 cm)共 4 层。由图 3 可知,2022 年土壤水分体积分数总体随着土层深度的增加呈先增加然后趋于稳定趋势,随着时间的增加呈减少趋势。2022 年 4 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 4.1%,平茬处理浅层土壤水分体积分数和未平茬处理差异不显著,平茬处理中层土壤水分体积分数和未平茬处理差异不显著,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 6.83%。2022 年 6 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 5%,平茬处理浅层土壤水分体积分数和未平茬处理差异不显著,平茬处理中层土壤水分体积分数和未平茬处理差异不显著,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 9.48%。2022 年 8 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 16.67%,平茬处理浅层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 11.12%,平茬处理中层土壤水分体积分数和未平茬处理显著增加 14.36%,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 5.48%。

由图 4 可知,土壤水分体积分数的随土层深度增加呈先增加然后趋于稳定趋势,2021—2024 年,土壤水分体积分数的随时间的增加呈缓慢增加趋势。2021 年 8 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 17.83%,平茬处理浅层土壤水分体积分数和未平茬处理差异不显著,平茬处理中层土壤水分

体积分数较未平茬处理显著增加 28.97%,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 29.21%。2022 年 8 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 16.67%,平茬处理浅层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 11.12%,平茬处理中层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 14.36%,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 5.48%。2023 年 8 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 70.01%,平茬处理浅层土壤

水分体积分数较未平茬处理显著增加 8.98%,平茬处理中层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 21.81%,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 12.92%。2024 年 8 月,平茬处理表层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 46.92%,平茬处理浅层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 10.97%,平茬处理中层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 19.93%,平茬处理深层土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加 11.43%。



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图 3 2022 年土壤水分体积分数动态变化及变异系数

Fig. 3 Dynamic variations and coefficients of variation of soil moisture content in 2022

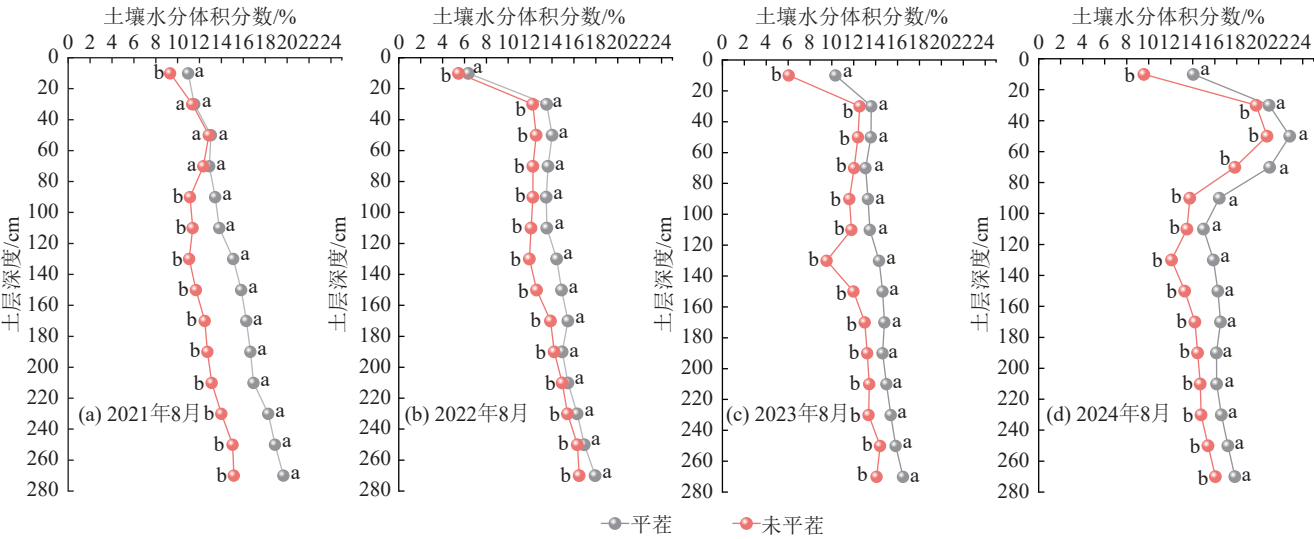


图 4 2021—2024 年 8 月土壤水分体积分数动态变化

Fig. 4 Dynamic variations in soil moisture content in August from 2021 to 2024

2.2 平茬对土壤水分亏缺的影响

由表 2 可知,平茬处理(0~280 cm)的土壤储水量较未平茬处理显著增加 7.11%~22.90%。2022 年平茬处理的土壤蒸发量较未平茬处理显著增加 18.58%,

2023 年和 2024 年平茬处理的土壤蒸发量较未平茬处理显著减少 4.80%~7.20%。随着年份增加,蒸散发量的差距逐渐减小。平茬处理的土壤水分亏缺指数较未平茬处理显著增加 98.16%~300.00%。

表 2 水分平衡变化特征  
Table 2 Characteristics of water balance variations

| 年份   | 处理  | 降雨量/mm | 土壤储水量/mm | 蒸散发量/mm | 土壤水分亏缺指数 |
|------|-----|--------|----------|---------|----------|
| 2021 | 平茬  | 441.40 | 426.66a  |         | 0.06a    |
|      | 未平茬 | 441.40 | 347.14b  |         | -0.59b   |
| 2022 | 平茬  | 311.00 | 399.72a  | 337.94a | 0.04a    |
|      | 未平茬 | 311.00 | 373.16b  | 284.98b | -1.00b   |
| 2023 | 平茬  | 324.21 | 394.92a  | 329.01b | -0.04a   |
|      | 未平茬 | 324.21 | 342.82b  | 354.55a | -2.18b   |
| 2024 | 平茬  | 355.20 | 485.72a  | 264.40b | 1.00a    |
|      | 未平茬 | 355.20 | 420.10b  | 277.92a | 0.25b    |

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。

2.3 平茬对表层土壤持水特征的影响

由表 3 可知,平茬处理后,表层(0~20 cm)土壤体积分数、最大持水量、毛管持水量及田间持水量均无显

著变化( $p>0.05$ )。平茬处理的总孔隙度较未平茬处理显著减少 1.90%,非毛管孔隙度较未平茬处理显著减少 44.84%,毛管孔隙度较未平茬处理显著增加 1.18%。

表 3 表层土壤持水性变化特征

Table 3 Variation characteristics of surface soil water holding capacity

| 处理  | 土壤体积质量/<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 最大持水量/<br>% | 毛管持水量/<br>% | 田间持水量/<br>% | 总孔隙度/<br>% | 非毛管孔隙度/<br>% | 毛管孔隙度/<br>% |
|-----|----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------|
| 平茬  | 1.14                                         | 47.39       | 46.26       | 39.87       | 53.47b     | 1.23b        | 52.24a      |
| 未平茬 | 1.14                                         | 47.88       | 45.29       | 40.11       | 54.52a     | 2.23a        | 51.63b      |

3 讨论

3.1 平茬处理增加土壤水分体积分数

土壤水分影响植物生长发育过程,主要影响植物的生理生化 and 光合作用,进而影响生长和生物量的积累,在干旱区土壤水分对植物生长的影响尤为显著<sup>[21]</sup>。针对林分结构老化及水分流失严重等问题,平茬处理可调节土壤水分的分布和动态变化。张建国等<sup>[22]</sup>研究表明,对老化衰败的沙拐枣林进行重复平茬,能增加其土壤水分体积分数,降低根系分布层土壤含盐量,有效促进其复壮更新;候思腾等<sup>[23]</sup>研究表明,平茬处理土壤水分体积分数显著高于未平茬处理,0~200 cm 土壤水分体积分数随土层深度的增加而升高;于鑫瑞等<sup>[24]</sup>研究表明,对柠条进行平茬后,早期土壤水分体积分数并未迅速恢复,基本保持原有水平,各层变周期性变化强度也基本一致,随着柠条平茬后恢复年限的延续,土壤水分体积分数开始逐年升高;本研究测量每年 8 月土壤水分体积分数,8 月是沙棘生长最旺盛的月份,也是耗水量最大的时期具有代表性。表明表层(0~20 cm)土壤水分体积分数受降雨量影响较大,土层深度越深,受降雨量的影响越小。平茬处理的各层的土壤水分体积分数高于未平茬处理,0~280 cm 的土壤水分体积分数随着土层深度增加呈先增加然后趋于稳定趋势。根据各层土壤水分体积分数的变异系数对平茬处理和未平茬处理土壤分层,表明平茬处理较未平茬处理

影响的土层深度更深,可能与平茬过后刺激沙棘林细根向下生长有关。如果土壤浅层的水分得不到有效地补充且不能满足植被的生长发育,水分消耗将不断从浅层向深层蔓延,从而加剧浅层的水分消耗。随着年限的增长,平茬处理和未平茬处理土壤水分体积分数的差距不断变化,证明平茬处理过后土壤水分体积分数开始逐渐恢复。

3.2 平茬处理减少土壤水分亏缺

土壤水分平衡指某一时期一定土壤体积内所得到的水分和被作物消耗、流失的水分间的平衡关系,一般指在一定时间内,作物根部范围一定深度的土层得到与失去的水分差额<sup>[25-26]</sup>。研究区地下水位深,降雨是唯一的水分来源,水分主要支出是植被蒸腾及土壤蒸发。邓继峰等<sup>[27]</sup>研究表明,平茬后植被蒸腾速率小于未平茬处理,是因为平茬处理过后,植被蒸腾速率增大,但其较小的叶面积指数使植被蒸腾量有所降低,而未平茬处理植被蒸腾量较高主要是由于其叶面积指数较大。本研究表明,平茬处理的土壤储水量及水分亏缺指数均显著高于未平茬处理。由于平茬处理过后,植被覆盖率降低,叶面积指数减小,第 2 年平茬处理的蒸发量显著增加,随着平茬处理后的沙棘生长,植被覆盖率不断增长,平茬处理和未平茬处理的差距越来越小。退化沙棘林长期处于水分亏缺状态,应根据实际情况对退化沙棘林适度平茬,刺激沙棘林复壮更新,提高土壤储水量,减少水分亏缺。

### 3.3 平茬处理增大表层土壤毛管孔隙度

土壤持水特征是土壤吸持水分的能力,主要由土壤孔隙的毛细引力和土壤颗粒的分子引力引起,统称为土壤吸力或基质吸力,土壤持水特征和土壤质地、有机质质量分数、土壤结构及土壤温度相关<sup>[28-29]</sup>。魏亚娟等<sup>[30]</sup>研究表明,平茬导致花棒粗根和细根生物量大幅度增加,根系的穿插作用,导致土壤孔隙度增加;张小菊等<sup>[31]</sup>研究表明,平茬过后土壤持水量增高,毛管孔隙度增大,非毛管孔隙度减小,持水能力和蓄水性能增强,粉粒增多,体积质量减小。本研究表明,平茬处理过后,表层土壤体积质量、最大持水量、毛管持水量及田间持水量无显著变化,总孔隙度及非毛管孔隙度变小,毛管孔隙度变大。可能是因为平茬处理过后刺激沙棘细根的生长,使土壤毛管孔隙度增大,利于降雨的有效下渗,使植被根系更好地利用,进而能够更好地固持土壤,防止水分流失,逐步提高水源涵养能力。

## 4 结论

1)平茬处理表层(0~20 cm)土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加4.10%~70.01%;平茬处理浅层(20~80 cm)土壤水分体积分数较未平茬处理显著增加8.99%~11.12%;中层(80~180 cm)土壤水分体积分数显著增加14.36%~28.97%;深层(180~280 cm)土壤水分体积分数显著增加5.48%~29.21%。

2)平茬处理(0~280 cm)的土壤储水量较未平茬处理显著增加7.11%~22.90%,土壤水分亏缺指数显著增加98.16%~300.00%。

3)平茬处理表层(0~20 cm)的总孔隙度较未平茬处理显著减少1.90%,非毛管孔隙度显著减少44.84%,毛管孔隙度显著增加1.18%。

综上所述,平茬处理可显著增加退化沙棘林土壤水分体积分数、土壤储水量,减少水分亏缺,有效防止水土流失。

#### 参考文献:

- [1] TANG Y K, WU X, CHEN Y M, et al. Water use strategies for two dominant tree species in pure and mixed plantations of the semiarid Chinese Loess Plateau [J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(4): e1943.
- [2] ZHOU T R, HAN C, QIAO L J, et al. Seasonal dynamics of soil water content in the typical vegetation and its response to precipitation in a semi-arid area of Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(10): 1015-1025.
- [3] 董立国, 李生宝, 蒋齐, 等. 宁夏半干旱黄土丘陵区不同土地利用类型土壤贮水量变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(10): 184-189.

- DONG L G, LI S B, JIANG Q, et al. Soil moisture storage of different land use types in Ningxia semi-arid loess hilly area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 184-189.
- [4] 安钰, 韩新生, 郭永忠, 等. 宁南山区不同植被类型土壤水分变化特征[J]. *北方园艺*, 2024(8): 59-65.  
AN Y, HAN X S, GUO Y Z, et al. Variation characteristics of soil water under different vegetation types in mountain area of southern Ningxia [J]. *Northern Horticulture*, 2024(8): 59-65.
- [5] 李江波. 发展沙棘产业对宁夏生态、经济、社会影响研究[J]. *宁夏农林科技*, 2016, 57(1): 15-18.  
LI J B. Influence of development of seabuckthorn industry on ecology, economy and society of Ningxia [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2016, 57(1): 15-18.
- [6] 党军, 王艳莉, 田青, 等. 甘肃省不同居群中国沙棘表型多样性分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(1): 252-263.  
DANG J, WANG Y L, TIAN Q, et al. Analysis of phenotypic diversity of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by different populations in Gansu Province [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(1): 252-263.
- [7] 赵嘉莹, 陈娇, 郝玉东. 黄土高原沟壑区良种沙棘物候观测[J]. *农业与技术*, 2024, 44(10): 31-34.  
ZHAO J Y, CHEN J, HAO Y D. Phenological observation of improved seabuckthorn in gully region of Loess Plateau [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(10): 31-34.
- [8] 董彦丽, 裴佐海, 马涛, 等. 祁连山山前生态系统综合治理模式及效益分析[J]. *水土保持应用技术*, 2024(6): 37-39.  
DONG Y L, PEI Z H, MA T, et al. Comprehensive management model and benefit analysis of piedmont ecosystem in Qilian Mountain [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2024(6): 37-39.
- [9] 张慧琴. 沙棘的营养价值及综合开发利用技术[J]. *果农之友*, 2023(7): 49-51.  
ZHANG H Q. Nutritional value and comprehensive development and utilization technology of seabuckthorn [J]. *Fruit Growers' Friend*, 2023(7): 49-51.
- [10] 邓世荣, 马春梅, 郑兴国. 新疆大果沙棘果实营养成分分析研究[J]. *现代农业科技*, 2019(22): 177.  
DENG S R, MA C M, ZHENG X G. Analysis and study on nutritional components of *Hippophae rhamnoides* fruit in Xinjiang [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(22): e177.
- [11] 张晓娟, 任余艳. 不同平茬方式对沙棘营养生长、产果量及健康状况的影响[J]. *绿色科技*, 2022, 24(5): 132-134.  
ZHANG X J, REN Y Y. Effects of different stubble leveling methods on nutritional growth, fruit yield and health status of *Hippophae rhamnoides* L. [J]. *Journal of*

- Green Science and Technology, 2022, 24(5): 132-134.
- [12] 郭亚君. 平茬高度对沙棘更新复壮的影响[J]. 内蒙古林业调查设计, 2016, 39(5): 35-36.
- GUO Y J. Effects of the stumping height on regeneration and invigoration of seabuckthorn [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2016, 39(5): 35-36.
- [13] 闵梓骁, 张建新, 范文波, 等. 不同立地条件下沙棘土壤水分分布特征及动态生长研究[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 204-210.
- MIN Z X, ZHANG J X, FAN W B, et al. Soil moisture distribution and dynamic growth of *Hippophae rhamnoides* under different site conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 204-210.
- [14] 袁思安, 刘丹一, 高辉, 等. 土壤水分对中国沙棘人工林结构多样性的影响[J]. 西部林业科学, 2014, 43(1): 69-74.
- YUAN S A, LIU D Y, GAO H, et al. Effect of moisture on the structural diversity of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* plantations [J]. Journal of West China Forestry Science, 2014, 43(1): 69-74.
- [15] 许卓民, 祁占魁, 苗元礼, 等. 黄土高原草肥覆盖农业耕作法的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1986, 4(2): 1-16.
- XU Z M, QI Z K, MIAO Y L, et al. A study of the mulching cultivation method employed on the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1986, 4(2): 1-16.
- [16] HOU M L, YAO N, LI Y, et al. Better drought index between SPEI and SMDI and the key parameters in denoting drought impacts on spring wheat yields in Qinghai, China[J]. Agronomy, 2022, 12(7): e1552.
- [17] CHEN X G, LI Y, YAO N, et al. Impacts of multi-timescale SPEI and SMDI variations on winter wheat yields[J]. Agricultural Systems, 2020, 185: e102955.
- [18] 江胜国. 国内土壤容重测定方法综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(增刊2): 82-86.
- JIANG S G. A Review of Domestic Methods for Determining Soil Bulk Density [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(S2): 82-86.
- [19] 李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1180-1187.
- LI C J, TANG J Y, GAO P, et al. Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along the Taklimakan desert highway [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(5): 1180-1187.
- [20] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J]. 林业科学, 1996, 32(4): 289-297.
- YU X X, ZHANG J J, ZHU J Z. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest ecosystem in loess area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996, 32(4): 289-297.
- [21] 曹倩, 习群杰, 王来君, 等. 干旱地区人工林营造技术及应用前景[J]. 中国林业产业, 2024(8): 22-24.
- CAO Q, XI Q J, WANG L J, et al. Artificial forest construction technology and its application prospect in arid area [J]. China Forestry Industry, 2024(8): 22-24.
- [22] 张建国, 李应罡, 徐新文, 等. 间伐对塔里木沙漠公路防护林乔木状沙拐枣生长与土壤水盐分布的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2377-2382.
- ZHANG J G, LI Y G, XU X W, et al. Effects of thinning on *Calligonum arborescens* growth and soil water-salt distribution in Tarim Desert highway shelterbelt, Xinjiang of northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2377-2382.
- [23] 候腾思, 沈艳, 马红彬, 等. 柠条平茬对荒漠草原土壤水分特征及水量平衡的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(8): 15-24.
- HOU T S, SHEN Y, MA H B, et al. Effects of *Caragana intermedia* stubble on soil water characteristics and water balance on the desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(8): 15-24.
- [24] 于瑞鑫, 王磊, 杨新国, 等. 平茬柠条的土壤水分动态及生理特征[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7249-7257.
- YU R X, WANG L, YANG X G, et al. Soil moisture dynamics and physiological characteristics of moving of *Caragana intermedia* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7249-7257.
- [25] 盖浩琪, 石培君, 李志. 黄土区长武塬土地利用变化对土壤水平衡的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 154-159.
- GAI H Q, SHI P J, LI Z. Influence of land use change on soil water balance in Wuyuan of Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 154-159.
- [26] 刘娜娜, 陈惠娟, 孔德杰. 宁夏盐池不同草地类型的土壤水分平衡研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 23-28.
- LIU N N, CHEN H J, KONG D J. Soil moisture budget in different types of grasslands in Yanchi County of Ningxia arid zone [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 23-28.
- [27] 邓继峰, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 盐池地区三种典型树种蒸腾速率的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 161-165.
- DENG J F, DING G D, ZHAO Y Y, et al. The transpiration rates of three typical trees in Yanchi district [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(7): 161-165.
- [28] 李青林, 杨静, 王琨, 等. 不同植被类型人工绿地土壤饱和和导水能力、持水特征的比较[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 828-835.
- LI Q L, YANG J, WANG K, et al. Comparison of saturated water carrying capacity and water holding capacity of artificial green land with different vegetation types [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 828-835.

(下转第 224 页)

- tion degrees in the three-river source region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 189-195.
- [22] 青海省质量技术监督局. 高寒小嵩草甸退化状态评估: DB63/T 1413—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. Qinghai Bureau of Quality and Technical Supervision. Assessment of the degradation status of alpine small tarra- gon meadows: DB63/T 1413—2015 [S]. Beijing: Stan- dards Press of China, 2015.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [24] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soil: GB/ T 50145—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [25] 陈诚, 郭伟, 任宇晓. 冻融循环条件下木质素纤维改良土 性质研究及微观分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 135-140. CHEN C, GUO W, REN Y X. Properties and micro- scopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 135-140.
- [26] 杨震, 冀鸿兰, 李超, 等. 冻融作用对岸坡土体宏观特性及 岸坡稳定性影响研究[J]. 水利学报, 2023, 54(6): 706-716. YANG Z, JI H L, LI C, et al. Effects of freezing-thaw- ing action on the macro-micro properties of bank slope soil and bank stability [J]. Journal of Hydraulic Engineer- ing, 2023, 54(6): 706-716.
- [27] TANG C S, CHENG Q, GONG X P, et al. Investigation on microstructure evolution of clayey soils: A review focus- ing on wetting/drying process [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 269-284.
- [28] 穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融作用对压实黄土结构影响的 微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925. MU Y H, MA W, LI G Y, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919-1925.
- [29] ZHU H X, ZHANG Y, LI Z H, et al. Study on crack development and micro-pore mechanism of expansive soil improved by coal gangue under drying-wetting cycles [J]. Materials, 2021, 14(21): e6546.
- [30] JIANG R, WANG J D, XIAO T, et al. Effect of sisal fibers on the disintegration characteristics of sisal fiber- amended loess [J]. Construction and Building Materials, 2024, 453: e139032.
- (上接第 214 页)
- [29] 张缓, 穆兴民, 高鹏. 黄土高原不同立地条件下枯落物蓄 积量及持水特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 45-52. ZHANG H, MU X M, GAO P. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 45-52.
- [30] 魏亚娟, 刘美英, 左小锋, 等. 平茬对吉兰泰盐湖花棒防 护林植被特征和土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学 报, 2023, 37(4): 250-257. WEI Y J, LIU M Y, ZUO X F, et al. Effects of prune measure on vegetation characteristics and soil physical and chemical properties of *Hedysarum scoparium* protection forest in Jilantai salt lake [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 250-257.
- [31] 张小菊, 每杭, 沈艳. 平茬方式对宁夏荒漠草原人工柠条 林土壤物理性质及持水能力的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(4): 73-79. ZHANG X J, MEI H, SHEN Y. Effects of stubble on soil physical properties and water holding capacity of artificial *Caragana* in Ningxia desert steppe [J]. Grassland and Turf, 2020, 40(4): 73-79.