

宁夏六盘山半干旱区典型植物群落的持水功能及其对土壤有机碳的影响^{*}

涂立辉¹⁾ 熊伟^{2)†} 王彦辉¹⁾ 于澎湃¹⁾ 韩新生³⁾

(1)中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 100091, 北京;

2)中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 100091, 北京; 3)宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室, 宁夏生态修复与多功能林业综合研究中心, 750002, 宁夏银川)

摘要 量化分析和定量评价植物群落的持水功能与固碳功能对于系统认识旱区植物群落的水源涵养及碳汇功能具有重要的价值和意义。本文在宁夏六盘山半干旱区的叠叠沟小流域选择了华北落叶松人工林、白桦人工林、沙棘人工灌丛和天然草地等4种典型植物群落,开展了枯落物层和土壤层的持水功能与固碳功能的野外测定与定量对比,采用熵权法(EWM)对植物群落的枯落物层和土壤层的持水能力进行了综合分析,应用通径分析解析了土壤有机碳质量分数与持水性能的关系。结果表明:4种植物群落的枯落物层最大持水量变化范围为3.03~20.55 t·hm⁻²,有效拦蓄量变化范围为2.13~14.58 t·hm⁻²,其中最大的为白桦人工林,约分别是华北落叶松人工林、沙棘人工灌丛、天然草地的1.4、3.0、6.8倍;在4种植物群落的0~100 cm土壤层,最大持水量变化范围为515.0~563.9 mm,毛管持水量变化范围为377.8~423.1 mm,其中华北落叶松人工林土壤持水性能最优;4种植物群落0~100 cm土层的有机碳质量分数均值变化范围为23.89~26.43 g·kg⁻¹,其中华北落叶松人工林最高,白桦人工林最小,土壤有机碳质量分数与土壤持水性能(总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量)呈显著正相关,表明二者有很好的协同关系;对枯落物层和土壤层持水功能的综合评价结果为华北落叶松人工林最高(0.330),白桦人工林次之(0.303),天然草地(0.218)和沙棘人工灌丛(0.148)相对较差。以上结果表明,华北落叶松人工林枯落物层及土壤层的持水和固碳功能要好于其他植物群落,在立地条件较好时应优先恢复。本研究结论可为六盘山半干旱山区森林植被的恢复与多功能优化管理提供科学依据。

关键词 枯落物;土壤层;持水功能;土壤有机碳

中图分类号 S718.5

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2023045

宁夏六盘山位于半湿润区向半干旱区的过渡区,是我国黄土高原重要的水源地^[1]。由于长期以来对森林植被的破坏,导致该地区生态环境脆弱,水土流失严重^[2]。因此,恢复森林植被对该地区保持水土、涵养水源、改善生态环境等具有重要意义。水源涵养通过森林植被持水功能来实现,主要通过枯落物层和土壤层来实现对降雨的再分配,以达到减少径流、涵养水源、保水固土的目的^[3]。枯落物层是土壤缓冲层,不仅可以减轻雨滴冲击对土壤的侵蚀和压实,减少地表径流,还可以限制土壤水分蒸发,增强土壤保水能力^[4]。枯落物分解后的有机碳可改善土壤结构,提高土壤渗透性能^[5]。土壤系统是土壤-植物-大气连续体(SPAC)中的一个重要子系统,通过对水分的吸持、传导使水分保持在土壤中,减小了地表径流^[6]。目前对于六盘

山地区植物群落枯落物层和土壤层持水功能的研究已有广泛报道,主要集中在通过不同立地条件^[7-8]、不同植被类型^[9-10]、不同密度^[11-12]、不同林龄^[13]的枯落物和土壤层的试验,分别计算枯落物层和土壤层的持水性能,关于森林植被枯落物和土壤层持水能力定量综合评价的研究还需要不断加强。

森林植被是重要的碳库,通过枯落物分解和根系分泌物等形式向土壤中输入有机碳,而有机碳可以改变土壤结构,进而改变土壤层的持水能力^[14]。因此土壤是最主要的持水层,但目前关于土壤持水功能与有机碳之间的关系的研究还较少^[15]。因此,通过研究土壤有机碳与土壤层持水功能间的关系,可以加深对土壤层持水功能的理解,进而为改良土壤层持水功能提供一定的参考。

^{*} 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2021ZW002);国家自然科学基金委员会区域创新发展联合基金资助项目(U20A2085, U21A2005);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流资助项目(42161144008)

[†] 通信作者:熊伟,男,博士,研究员。研究方向:旱区生态水文学。E-mail: xwcaf@163.com

收稿日期: 2023-04-03

综上所述,本研究选择六盘山北侧叠叠沟小流域 4 种典型植物群落为研究对象,对枯落物蓄积量与持水能力、土壤物理性质和土壤有机碳进行测定,采用熵权法对植物群落的枯落物层和土壤层持水能力进行定量综合评价,明确土壤持水能力与土壤有机碳的关系,为该区植被合理恢复和多种功能的精细化管理提供科技支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况 研究区位于黄土高原中西部六盘山北侧叠叠沟小流域(106°04'55"~106°09'15"E,

35°54'12"~35°58'33"N, 见图 1), 海拔 1 975~2 615 m, 属半干旱大陆性季风气候, 多年平均降水量 457.9 mm (1957—2018 年)^[16](主要集中在 6—9 月), 土壤类型以灰褐土为主。植被类型以人工林、灌丛植被、天然草地为主, 其中人工林以华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、白桦(*Betula platyphylla*)等为主, 灌丛以人工沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和天然虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等为主, 草本植物主要有针茅(*Stipa capillata*)、披针叶苔草(*Carex lancifolia*)、穗花马先蒿(*Pedicularis spicata*)和铁杆蒿(*Artemisa vestita*)等^[17]。

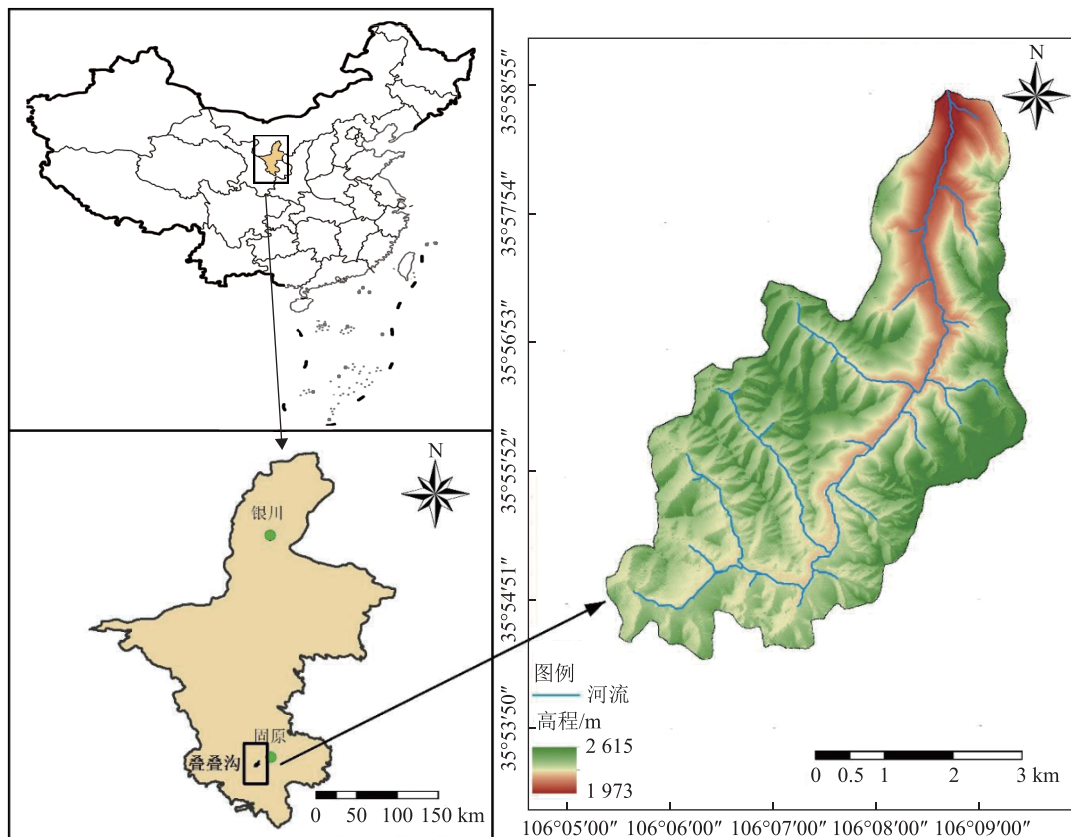


图 1 研究区位置

1.2 样地设置 2019 年 5 月, 在研究区内选择具有代表性的华北落叶松人工林、白桦人工林、沙棘人工灌丛和天然草地等 4 种植被类型为研究对象, 分别在每个植被类型中设置 4 块 20 m×20 m 的样地, 见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 枯落物蓄积量及持水性能测定 根据样地的上、中、下 3 个位置, 沿对角线随机布设面积为 1 m×1 m 的 3 个小样方。在小样方内, 用剪刀去除草本植物, 然后用钢尺测定枯落物厚度, 将枯落物装入收集袋中, 密封带回实验室, 在 85℃ 下烘干至恒质量, 计算各样方枯落物蓄积量。取 3 个样方的算数平均值, 代

表样地枯落物的厚度和蓄积量。

枯落物持水能力采用浸水法测定, 将烘干后的枯落物装入尼龙网袋内, 然后放入水中分别浸泡 0.25、0.5、0.75、1、2、4、6、8、10、12、24 h 称质量。枯落物持水量、有效拦蓄量、吸水速度及吸水过程的计算公式^[18]为

$$W_{\max} = M_{24} - M_d, \quad (1)$$

$$R_{\max} = \frac{(M_{24} - M_d)}{M_d} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R_{sv} = 0.85 \times R_{\max} - R_0, \quad (3)$$

表1 典型植物群落样地基本信息

| 样地编号 | 植被类型 | 海拔/m | 坡向 | 林龄/a | 密度/(株·hm ⁻²) | 平均高度/m | 平均胸径/cm | 郁闭度/盖度 |
|------|----------|-------|----|------|--------------------------|--------|---------|--------|
| 1 | 华北落叶松人工林 | 2 060 | NE | 32 | 975 | 9.71 | 12.16 | 0.63 |
| 2 | 华北落叶松人工林 | 2 056 | NE | 32 | 1 125 | 9.77 | 12.46 | 0.66 |
| 3 | 华北落叶松人工林 | 2 080 | NE | 32 | 1 250 | 7.51 | 10.76 | 0.70 |
| 4 | 华北落叶松人工林 | 2 080 | NE | 32 | 1 900 | 7.90 | 9.59 | 0.82 |
| 5 | 白桦人工林 | 2 030 | N | 24 | 1 250 | 9.32 | 11.32 | 0.89 |
| 6 | 白桦人工林 | 2 050 | N | 24 | 1 625 | 7.44 | 10.81 | 0.85 |
| 7 | 白桦人工林 | 2 010 | N | 24 | 1 150 | 7.71 | 11.04 | 0.76 |
| 8 | 白桦人工林 | 2 047 | N | 24 | 1 850 | 8.10 | 9.90 | 0.85 |
| 9 | 沙棘人工灌丛 | 2 010 | NE | 21 | 4 700 | 3.44 | 6.29 | 0.74 |
| 10 | 沙棘人工灌丛 | 2 021 | NE | 21 | 7 400 | 4.12 | 8.00 | 0.81 |
| 11 | 沙棘人工灌丛 | 2 012 | NE | 21 | 8 400 | 2.80 | 5.59 | 0.67 |
| 12 | 沙棘人工灌丛 | 2 000 | NE | 21 | 5 714 | 3.89 | 7.58 | 0.71 |
| 13 | 天然草地 | 2 060 | SE | — | — | 0.24 | — | 0.94 |
| 14 | 天然草地 | 2 010 | SE | — | — | 0.25 | — | 0.93 |
| 15 | 天然草地 | 2 010 | SE | — | — | 0.27 | — | 0.98 |
| 16 | 天然草地 | 2 050 | SE | — | — | 0.27 | — | 0.98 |

$$W_{sv} = R_{sv} \times M_d, \quad (4)$$

式中: W_{max} 为枯落物最大持水量($t \cdot hm^{-2}$); W_{sv} 为枯落物有效拦蓄量($t \cdot hm^{-2}$); M_{24} 为枯落物浸泡 24 h 时的质量(g); M_d 为枯落物的干质量(g); R_{max} 为枯落物最大持水率(%); R_{sv} 为枯落物有效拦蓄率(%); R_0 为枯落物自然含水率(%)。

1.3.2 土壤物理性质及土壤有机碳测定 在各样地内随机布设 3 个样点, 分别在 0~10、>10~20、>20~40、>40~60、>60~80、>80~100 cm 的土壤剖面, 用环刀和铝盒取原状土。在实验室内采用烘干法测定土壤含水量, 采用浸水法测定土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度等物理性质。在此基础上, 计算土壤的持水能力^[19]。使用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定土壤有机碳质量分数^[19]。

1.3.3 持水功能综合评价方法 采用熵权法(EWM)综合评价植物群落枯落物和土壤层持水功能^[20]。

1) 运用 min-max 标准化方法对数据进行标准化处理。当指标>0(数据越大越优)时, 其标准化公式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}; \quad (5)$$

当指标<0(数据越小越优)时, 其标准化公式为

$$y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}. \quad (6)$$

对标准化处理后的功能指标值进行归一化处理,

公式为

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}. \quad (7)$$

2) 计算各指标的熵值。公式为

$$H_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}), i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n, \quad (8)$$

式中当 P_{ij} 为 0 时, 则定义 $P_{ij} \ln(P_{ij})$ 为 0。

3) 确定各指标熵权重。公式为

$$M_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)}, i = 1, \dots, m. \quad (9)$$

一般而言, 若某个功能指标的 M_i 越大, 表明该功能指标值在综合评价中所起到的作用越大, 反之则越小。

4) 计算植物群落持水功能综合评价值。计算式为

$$E = \sum_{i=1}^m M_i \times P_{ij}, \quad (10)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个功能指标所对应的第 j 种植被类型; y_{ij} 为标准化处理后对应的功能指标值; n 为植被类型; m 为功能指标数; M_i 为第 i 功能指标权重值; P_{ij} 为第 i 功能指标的归一化值; E 为持水功能综合指数, 代表枯落物层和土壤层共同作用的综合持水能力。

2 结果与分析

2.1 枯落物层持水功能分析

2.1.1 枯落物厚度及蓄积量 由表 2 可知, 研究区 4 种典型植物群落的枯落物厚度依次为白桦人工林 (5.28 cm)、华北落叶松人工林 (3.63 cm)、沙棘人工灌丛 (2.25 cm)、天然草地 (1.69 cm)

、天然草地 (1.69 cm); 枯落物总蓄积量的变化范围为 1.06~7.88 t·hm⁻², 大小依次为白桦人工林 (7.88 t·hm⁻²)、华北落叶松人工林 (3.91 t·hm⁻²)、沙棘人工灌丛 (3.01 t·hm⁻²)、天然草地 (1.06 t·hm⁻²)。白桦人工林蓄积量约为华北落叶松人工林的 2.02 倍, 为沙棘人工灌丛的 2.62 倍, 为天然草地的 7.43 倍。

表 2 典型植物群落枯落物持水功能指标统计结果

| 植被类型 | 厚度/cm | 蓄积量/(t·hm ⁻²) | 最大持水率/% | 最大持水量/(t·hm ⁻²) | 有效拦蓄率/% | 有效拦蓄量/(t·hm ⁻²) |
|----------|-------------|---------------------------|----------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| 华北落叶松人工林 | 3.63±0.74b | 3.91±1.09b | 347.50±41.91a | 13.58±2.80a | 271.97±39.26a | 10.63±2.00a |
| 白桦人工林 | 5.28±1.82a | 7.88±5.28a | 260.79±76.65bc | 20.55±12.00a | 185.04±63.65b | 14.58±8.30a |
| 沙棘人工灌丛 | 2.25±0.63bc | 3.01±1.59b | 211.37±27.36c | 6.35±2.61b | 160.70±29.28b | 4.83±2.02b |
| 天然草地 | 1.69±0.27c | 1.06±0.52b | 286.3±56.42b | 3.03±1.07b | 201.38±39.07b | 2.13±0.79b |

注: 相同字母代表差异不显著, 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.2 枯落物持水与拦蓄能力 4 种典型植物群落枯落物的最大持水率变化范围为 211.37%~347.50%, 大小依次为华北落叶松人工林 (347.50%)、天然草地 (286.30%)、白桦人工林 (260.79%)、沙棘人工灌丛 (211.37%)。植物群落枯落物的最大持水量可达到自身枯落物蓄积量的 2~4 倍, 见表 2。有效拦蓄率、拦蓄量体现了枯落物对降雨的实际拦蓄效果, 4 种典型植物群落枯落物的有效拦蓄率变化范围为 160.70%~271.97%, 有效拦蓄率与最大持水率表现出相同的变化规律。有效拦蓄量大小依次为白桦人工林 (14.58 t·hm⁻²)、华北落叶松人工林 (10.63 t·hm⁻²)、沙棘人工灌丛

(4.83 t·hm⁻²)、天然草地 (2.13 t·hm⁻²)。

2.1.3 枯落物持水过程 由图 2 可知, 4 种典型植物群落枯落物的持水量均随浸水过程呈现出相似的变化规律。在浸水 0~2 h, 枯落物持水量急剧增加, 特别在 0~1 h 时最为显著; 随着浸水时间的继续延长, 持水量增加的幅度逐渐减缓; 当浸水 12 h 后, 持水量基本趋于饱和状态。白桦人工林枯落物的持水量在整个浸水过程中明显优于其他 3 种植物群落, 天然草地的持水性表现最差。枯落物吸水速率从试验开始到结束是一个先不断减少, 最后趋于稳定的过程。

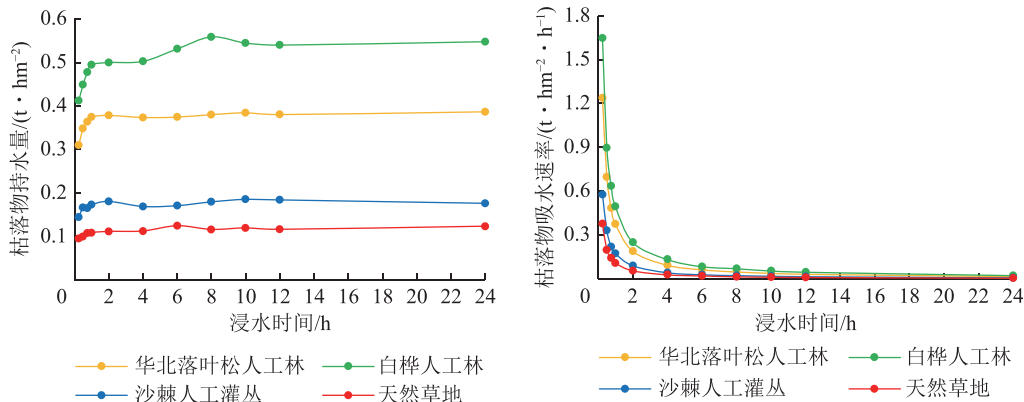


图 2 典型植物群落枯落物持水量、吸水速率随浸水时间的变化

对 4 种典型植物枯落物持水量与浸水时间进行回归拟合, 均符合对数关系 $Q_t = a \ln(t_i) + b$, 其中 Q_t 为持水量, a 和 b 为系数, t_i 为时间; 将枯落物吸水速率与浸水时间进行拟合, 符合幂函数关系, 关系式为 $V_i = m t_i^{-n}$, 其中 V_i 为持水量, m 和 n 为系数, t_i 为时间, 见表 3。

2.2 土壤层持水功能分析

2.2.1 土壤物理性质与持水能力 由表 4 可知: 土壤

密度均值由大到小排序为沙棘人工灌丛 (1.20 g·cm⁻³)、天然草地 (1.12 g·cm⁻³)、白桦人工林 (1.08 g·cm⁻³)、华北落叶松人工林 (1.06 g·cm⁻³), 且随土层深度增加土壤密度呈逐渐增大的趋势; 总孔隙度均值最大的为华北落叶松人工林 (56.39%), 与其他植被类型无显著差异 ($P > 0.05$); 土壤毛管孔隙度均值最大的为天然草地 (42.31%), 土壤非毛管孔隙度最大的为白桦人工林

表 3 典型植物群落枯落物持水量、吸水速率与浸水时间的关系方程

| 植被类型 | 枯落物持水量(Q_i)与浸水时间(t_i)的关系 | | 枯落物吸水速率(V_i)与浸水时间(t_i)的关系 | |
|----------|----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| | 关系式 | R^2 | 关系式 | R^2 |
| 华北落叶松人工林 | $Q_i=0.029\ 2\ln(t_i)+0.474\ 6$ | 0.892\ 7 | $V_i=0.354\ 4t_i^{-0.965}$ | 0.996\ 3 |
| 白桦人工林 | $Q_i=0.012\ 3\ln(t_i)+0.355\ 4$ | 0.667\ 2 | $V_i=0.473\ 4t_i^{-0.94}$ | 0.998\ 6 |
| 沙棘人工灌丛 | $Q_i=0.005\ 9\ln(t_i)+0.165\ 4$ | 0.588\ 9 | $V_i=0.165t_i^{-0.964}$ | 0.995\ 8 |
| 天然草地 | $Q_i=0.005\ 7\ln(t_i)+0.105\ 4$ | 0.851\ 9 | $V_i=0.105\ 1t_i^{-0.947}$ | 0.999\ 3 |

表 4 典型植物群落土壤物理性质与持水能力

| 植被类型 | 土深/cm | 密度/($g \cdot cm^{-3}$) | 总孔隙度/% | 毛管孔隙度/% | 非毛管孔隙度/% | 最大持水量/mm | 毛管持水量/mm |
|----------|---------|--------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| 华北落叶松人工林 | 0~10 | 0.92±0.05Ad | 61.70±3.24Aa | 38.22±2.77Aa | 23.49±3.07Aa | 61.70±3.24Ad | 38.22±2.77Ab |
| | >10~20 | 0.97±0.04Bcd | 60.36±2.49Aa | 40.63±2.00Aa | 19.73±1.51Aa | 60.36±2.49Ad | 40.63±2.00Ab |
| | >20~40 | 0.99±0.02Bc | 59.39±1.12Aab | 39.72±1.18Aa | 19.67±0.99Aa | 118.79±2.24Aa | 79.45±2.37Aa |
| | >40~60 | 1.08±0.04Bb | 55.68±1.65Abc | 43.60±3.06Aa | 12.03±2.62Bb | 111.36±3.30Ab | 87.31±6.12Aa |
| | >60~80 | 1.11±0.02Bb | 54.27±2.33Acd | 42.75±3.26Aa | 11.52±3.89ABb | 108.54±4.65Abc | 85.49±6.52Aa |
| | >80~100 | 1.18±0.02ABa | 51.57±1.03ABd | 40.94±4.25Aa | 10.63±4.27Bb | 103.15±2.06ABc | 81.88±8.50Aa |
| | 平均(合计) | 1.06 | 56.39 | 41.30 | 15.09 | (563.90) | (412.97) |
| 白桦人工林 | 0~10 | 1.01±0.06Abc | 59.51±3.48Aa | 39.13±4.63Aa | 20.38±3.91Aa | 59.51±3.48Ab | 39.13±4.63Ab |
| | >10~20 | 1.00±0.06Bc | 59.36±2.77Aa | 38.85±3.06ABa | 20.51±4.38Aa | 59.36±2.77Ab | 38.85±3.06ABb |
| | >20~40 | 1.05±0.06BBabc | 56.86±3.25ABab | 40.09±3.57Aa | 16.76±4.36ABa | 113.71±6.50ABa | 80.19±7.14Aa |
| | >40~60 | 1.05±0.09Babc | 55.07±4.68Aab | 35.64±1.47Ba | 19.43±4.72Aa | 110.15±9.35Aa | 71.29±2.95Ba |
| | >60~80 | 1.14±0.10ABa | 52.74±4.74Ab | 37.07±4.19Aa | 15.67±2.20Aa | 105.48±9.48Aa | 74.15±8.39Aa |
| | >80~100 | 1.13±0.08Bab | 53.67±3.80Aab | 37.11±3.71Aa | 16.55±2.85Aa | 107.33±7.60Aa | 74.23±7.42Aa |
| | 平均(合计) | 1.08 | 55.55 | 37.78 | 17.77 | (555.54) | (377.83) |
| 沙棘人工灌丛 | 0~10 | 1.03±0.11Ac | 59.74±4.14Aa | 34.47±3.76Aa | 25.26±4.14Aa | 59.74±3.76Ac | 34.47±4.40Ab |
| | >10~20 | 1.15±0.07Ab | 53.17±5.75Bb | 35.01±4.42Ba | 18.16±5.75Ab | 53.17±4.42Bc | 35.01±3.45Bb |
| | >20~40 | 1.20±0.05Aab | 52.77±10.05Bb | 39.42±13.49Aa | 13.36±5.02Bc | 105.54±6.74Ba | 78.83±4.15Aa |
| | >40~60 | 1.18±0.05Aab | 52.47±3.89Abc | 39.79±6.12ABa | 12.68±1.94Bc | 104.94±3.06Aa | 79.58±2.34ABa |
| | >60~80 | 1.21±0.07Aab | 49.35±7.24Abc | 38.72±7.71Aa | 10.64±3.62Bc | 98.71±3.85Aab | 77.43±3.42Aa |
| | >80~100 | 1.30±0.12Aa | 46.46±9.66Bc | 37.54±7.60Aa | 8.92±4.83Bc | 92.93±3.80Bb | 75.09±4.05Aa |
| | 平均(合计) | 1.20 | 51.50 | 38.04 | 13.46 | (515.02) | (380.41) |
| 天然草地 | 0~10 | 0.93±0.11Ab | 60.08±2.01Aa | 38.18±1.02Aa | 21.90±2.15Aa | 60.08±2.01Ac | 38.18±1.02Ab |
| | >10~20 | 1.04±0.14ABab | 58.24±4.08ABab | 40.29±4.06ABa | 17.95±5.35Aa | 58.24±4.08ABc | 40.29±4.06ABb |
| | >20~40 | 1.04±0.05Bab | 57.44±2.04ABab | 40.78±3.48Aa | 16.67±3.48ABab | 114.89±4.07ABa | 81.55±6.95Aa |
| | >40~60 | 1.16±0.05ABa | 51.76±3.04Abc | 45.96±6.45Aa | 5.80±6.02Bbc | 103.53±6.09Aab | 91.92±12.90Aa |
| | >60~80 | 1.17±0.02ABa | 49.43±1.39Ac | 42.83±3.55Aa | 6.61±3.52Bc | 98.87±2.77Ab | 85.66±7.10Aa |
| | >80~100 | 1.23±0.07ABa | 48.20±3.69ABc | 42.76±5.90Aa | 5.44±2.74Bc | 96.39±7.37ABb | 85.52±11.80Aa |
| | 平均(合计) | 1.12 | 53.20 | 42.31 | 10.89 | (532.00) | (423.12) |

注: 不同小写字母代表同一植被类型不同土层深度差异显著, 不同大写字母代表不同植被类型同一土层深度差异显著($P<0.05$)。

(17.77%), 且>40~100 cm 显著大于华北落叶松人工林、沙棘人工灌丛和天然草地($P<0.05$)。整体来看, 土壤总孔隙度和非毛管孔隙度大小均随土层变深呈单一减小趋势。

4 种典型植物群落土壤最大持水量随土层深度增加呈逐渐变小的规律, 整个剖面的累积土壤最大持水量由大到小排序为华北落叶松(563.90 mm)、白桦人工林(555.54 mm)、天然草地(532.00 mm)、沙棘

(515.02 mm)。乔木林的土壤最大持水量整体大于灌丛和草地,且针叶林好于阔叶林。整个剖面的累积土壤毛管持水量由大到小排序为天然草地(423.12 mm)、华北落叶松人工林(412.97 mm)、沙棘人工灌丛(380.41 mm)、白桦人工林(377.83 mm)。

2.2.2 土壤有机碳质量分数及其与土壤层持水功能的关系 由图 3 可知,在 0~100 cm 土层,土壤有机碳质量分数变化范围为 14.14~39.71 g·kg⁻¹。从植被类型来看,土壤有机碳质量分数均值由大到小排序为华北落叶松人工林(26.43 g·kg⁻¹)、沙棘人工灌丛(24.56 g·kg⁻¹)、天然草地(24.02 g·kg⁻¹)、白桦人工林(23.89 g·kg⁻¹)。各植被类型土壤有机碳质量分数均呈现出随土层深度的增加而降低的规律,其中,乔木林在 0~20 cm 土层的土壤有机碳质量分数显著大于>20~100 cm 土层($P<0.05$),灌丛和草地在 0~10 cm 土层的土壤有机碳质量分数显著大于>10~100 cm 土层($P<0.01$)。

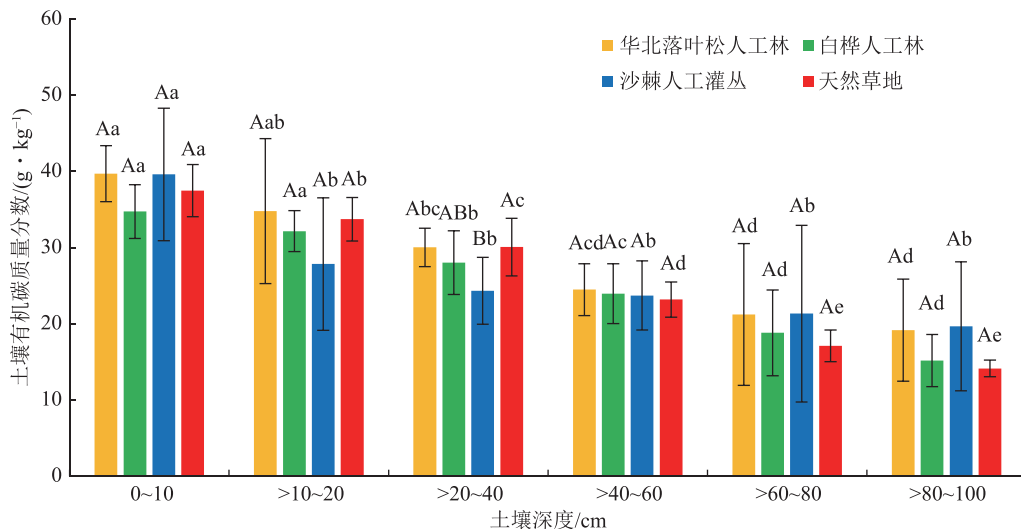


图 3 典型植物群落在 0~100 cm 土层有机碳质量分数的层次分配

表 5 典型植物群落土壤有机碳质量分数与土壤持水能力间的通径分析结果

| 自变量 | 与SOC的相关关系 | 直接通径系数 | 间接通径系数 | | | | |
|-----|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | BD | TP | CP | MC | CC |
| BD | -0.422 | 0.183 | — | -0.13 | 0.07 | -0.16 | -0.09 |
| TP | 0.599 | 0.122 | -0.09 | — | 0.01 | 0.12 | 0.10 |
| CP | 0.127 | 1.016 | 0.39 | 0.07 | — | -0.09 | 0.61 |
| MC | 0.575 | 1.455 | -1.25 | 1.41 | -0.13 | — | 1.06 |
| CC | 0.521 | 1.137 | -0.84 | 0.89 | 0.68 | 0.83 | — |

注: SOC为土壤有机碳质量分数; BD为土壤密度; TP为土壤总孔隙度; CP为毛管孔隙度; MC为土壤最大持水量; CC为毛管持水量。

2.3 典型植物群落持水功能综合评价 植物群落持水功能是枯落物层与土壤层共同作用的结果。不同植物群落持水功能的主导因素也不同,根据科学性、层次性和独立性的原则,选取枯落物蓄积量(F1)、枯

落物最大持水量(F2)等 9 种典型要素作为评价指标,其中各指标均为样地平均值,运用熵权法计算各指标权重。由表 6 可知,权重较大的为土壤平均毛管孔隙度 F6(0.142)和土壤累积毛管持水量 F9(0.142),这是

将土壤有机碳质量分数与代表土壤持水能力的参数进行 Pearson 相关分析,结果表明,土壤有机碳与总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量和毛管持水量呈显著正相关,与土壤密度呈显著负相关($P<0.01$)。通过通径分析对土壤有机碳质量分数与土壤持水能力间的关系进行分析,在影响土壤有机碳质量分数的显著性因子中,土壤最大持水量的直接通径系数最大(1.455),说明其对土壤有机碳质量分数的直接作用最明显,其次为土壤毛管持水量(1.137),土壤总孔隙度对土壤有机碳质量分数的直接作用较小。土壤最大持水量通过总孔隙度对土壤有机碳进行间接影响相对较高,土壤密度、毛管孔隙度、毛管持水量、最大持水量、总孔隙度的直接通径系数均大于其他间接通径系数,表明其对土壤有机碳质量分数的主要贡献均表现为直接影响,见表 5。

因为土壤是涵养水源的主要作用层,土壤非毛管孔隙中的水主要是土壤大孔隙中的水,在重力作用下容易流失,而土壤毛管孔隙中的水不会在重力作用下流失,能使水分在土壤中保持较长时间而被植物吸收利用,提高水源涵养能力.结合权重与各指标的归一化指数,计算各植物群落持水功能的综合评价结果,大小依次为华北落叶松人工林(0.330)、白桦人工林(0.303)、天然草地(0.218)、沙棘人工灌丛(0.148),表现为乔木林最优,草地次之,灌丛较低,且针叶林优于阔叶林,见表7.

表6 基于熵权法计算持水功能各指标权重

| 类别 | 序号 | 评价指标 | 权重 |
|------|----|------------|-------|
| 枯落物层 | F1 | 枯落物蓄积量 | 0.104 |
| | F2 | 枯落物最大持水量 | 0.111 |
| | F3 | 枯落物有效拦蓄量 | 0.105 |
| 土壤层 | F4 | 土壤平均密度 | 0.128 |
| | F5 | 土壤平均总孔隙度 | 0.090 |
| | F6 | 土壤平均毛管孔隙度 | 0.142 |
| | F7 | 土壤平均非毛管孔隙度 | 0.088 |
| | F8 | 土壤累积最大持水量 | 0.090 |
| | F9 | 土壤累积毛管持水量 | 0.142 |

表7 典型植物群落持水功能评价结果

| 植被类型 | 枯落物层 | 土壤层 | 综合评价 |
|----------|-------|-------|-------|
| 华北落叶松人工林 | 0.101 | 0.230 | 0.330 |
| 白桦人工林 | 0.179 | 0.124 | 0.303 |
| 沙棘人工灌丛 | 0.041 | 0.107 | 0.148 |
| 天然草地 | 0.000 | 0.218 | 0.218 |

3 讨论

3.1 典型植物群落枯落物层持水能力 植物群落枯落物蓄积量主要受气候条件、枯落物性质、植被结构组成和微生物分解者群落组成等因素影响而有所差别^[21-22].本研究表明,阔叶林枯落物蓄积量高于针叶林,与时忠杰等^[9]对六盘山香水河小流域主要森林类型的枯落物蓄积量研究结果相反,产生这种结果的主要原因是本研究白桦人工林位于阴坡,温度低、湿度高,且其林分郁闭度较大,导致林内水热条件相对较差,凋落物不易分解.此外,枯落物蓄积量的差异,导致枯落物最大持水量、有效拦蓄量与最大持水率、有效拦蓄率变化规律不同.这与陈继东等^[23]的研究结果一致,说明枯落物持水量除了受持水率的影响以外,还与枯落物蓄积量有关.本研究各植物群落的枯

落物均表现为1h以内持水量增加最为迅速,因此在自然条件下,当降雨时间短、雨量大时,其可以降低它对土壤的冲刷力,防治水土流失^[24].

3.2 典型植物群落土壤层持水能力 植物群落由于植物自身的生物学特性对土壤密度、土壤孔隙度及土壤持水能力的变化有很大影响.各植物群落土壤密度均随土层的加深而逐渐增大,总孔隙度表现出相反的变化规律,与姜淑兰等^[25]的研究结果一致.土壤密度表现为灌丛最大,草地次之,乔木林最小;孔隙度表现为乔木林最大,灌丛次之,草地最小;最大持水量以乔木林最大,灌丛相对较小.乔木林土壤持水能力相对较好是由于其有较大的冠幅和地上生物量,导致有相对较多的枯枝落叶转化为土壤所需的有机质,同时结合根系的活动和分泌更多的胶结物质,促进团聚体形成,改善土壤结构,降低土壤密度,增大土壤空隙,提升土壤透气性,提高土壤有效水分和土壤持水能力^[4].本研究结果为华北落叶松人工林土壤持水能力好于白桦人工林,与任启文等^[26]研究结果一致,主要原因是白桦人工林枯落物较华北落叶松人工林难分解,影响其土壤品质和土壤结构,从而导致其土壤持水能力相对较差.

3.3 土壤孔隙和持水能力与土壤有机碳的关系 土壤有机碳作为陆地碳库的重要组成部分,是维持土壤结构和肥力的重要基础^[27].本研究发现,土壤有机碳与土壤总孔隙度、毛管孔隙度均呈正相关关系,与土壤密度呈负相关关系,与Korkanc^[28]研究结果一致,这是因为土壤密度小而孔隙度大,通气透水性良好,促进土壤微生物将凋落物分解物质和根系分泌物转化为土壤有机碳^[19].土壤持水能力与土壤有机碳质量分数呈显著正相关,与向元彬等^[29]研究结果一致,这是由于土壤水分含量高导致透气性较差,降低土壤微生物活动,不利于土壤内原有机碳矿化,但可以通过土壤入渗,将外源有机物保存到土壤中,提高土壤有机碳质量分数^[19].土壤有机碳同时也通过影响土壤养分,从而影响土壤持水能力.土壤有机碳作为一种胶结物质,促进土壤团聚体的形成,从而改变了孔隙度和密度,进而改变了土壤持水能力^[30].

4 结论

1)4种典型植物群落枯落物的蓄积量变化范围为1.06~7.88 t·hm⁻²,白桦人工林最高,天然草地最低.枯落物最大持水量、有效拦蓄量变化范围分别为3.03~20.55和2.13~14.58 t·hm⁻²,白桦人工林枯落物层的拦蓄持水能力较好.枯落物持水量在浸水1h内迅速增大,持水量与浸水时间为对数关系($R^2>0.69$),

与吸水速率为幂函数关系($R^2>0.99$).

2) 4种典型植物群落土壤密度的变化范围为 $0.92\sim 1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 土壤最大持水量、有效持水量变化范围分别为 $515.02\sim 563.90$ 和 $377.83\sim 423.12\text{ mm}$, 华北落叶松人工林土壤层持水能力最好.

3) 持水功能综合评价从大到小依次为华北落叶松人工林(0.330)、白桦人工林(0.303)、天然草地(0.218)、沙棘人工灌丛(0.148).

4) 4种典型植物群落土壤有机碳质量分数变化范围为 $23.89\sim 26.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤有机碳质量分数均表现为随土层的加深而降低的变化规律. 土壤有机碳与总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量和毛管持水量为显著正相关, 与土壤密度为显著负相关($P<0.01$). 土壤最大持水量和土壤毛管持水量能够更好地指示土壤有机碳的变化.

5 参考文献

- [1] 韩新生, 王彦辉, 李振华, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松人工林林下日蒸散特征及其影响因子[J]. 林业科学, 2019, 55(9): 11
- [2] 王彦辉, 于澎涛, 张淑兰, 等. 黄土高原和六盘山区森林面积增加对产水量的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 15
- [3] JONES J, ELLISON D, FERRAZ S, et al. Forest restoration and hydrology[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 520: 120342
- [4] ZHAO L S, HOU R, FANG Q. Differences in interception storage capacities of undecomposed broad-leaf and needle-leaf litter under simulated rainfall conditions[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 446: 135
- [5] CHRISTIANSEN C T, HAUGWITZ M S, PRIEMÉ A, et al. Enhanced summer warming reduces fungal decomposer diversity and litter mass loss more strongly in dry than in wet tundra[J]. Global Change Biology, 2017, 23(1): 406
- [6] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 357
- [7] 刘建立, 王彦辉, 程丽莉, 等. 六盘山北侧不同立地土壤的蓄水性能和渗透性研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 61
- [8] 王正安. 六盘山叠叠沟小流域不同坡位华北落叶松人工林生态水文功能研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018
- [9] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J]. 北京林业大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 91
- [10] 王正安, 邸利, 王彦辉, 等. 六盘山叠叠沟小流域4种植被土壤层水文调节功能的综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 181
- [11] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. 北京林业大学学报(自然科学版), 2016, 38(8): 36
- [12] 郝佳. 宁夏六盘山华北落叶松人工林密度对多功能的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012
- [13] 高迪, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 26
- [14] 李航, 严方晨, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3889
- [15] FAROOQI T J A, LI X H, YU Z, et al. Reconciliation of research on forest carbon sequestration and water conservation[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32(1): 7
- [16] 郑东生, 郑晓辉, 温锁忠. 固原62年降水量变化情况分析[J]. 农业科技与信息, 2021(4): 5
- [17] WANG Y B, WANG Y H, LI Z H, et al. Interannual variation of transpiration and its modeling of a larch plantation in semiarid northwest China[J]. Forests, 2020, 11(12): 1303
- [18] 刘燕平, 王根绪, 胡兆永, 等. 西南山区典型森林枯落物储量及持水能力[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2113
- [19] 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 等. 小流域梯田土壤有机碳与土壤物理性质的关系研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 748
- [20] 张佳楠, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价[J]. 北京林业大学学报(自然科学版), 2019, 41(8): 105
- [21] 周庭宇, 肖洋, 黄庆阳, 等. 森林凋落物分解的研究进展与展望[J]. 中国农学通报, 2022, 38(33): 44
- [22] 李学斌, 马林, 陈林, 等. 草地枯落物分解研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2260
- [23] 陈继东, 周长亮, 李惠丽. 接坝地区9种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 216
- [24] 许小明, 邹亚东, 孙景梅, 等. 黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5153
- [25] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4844
- [26] 任启文, 毕君, 李联地, 等. 冀北山地3种森林植被恢复类型对土壤质量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1818
- [27] HE X X, HUANG Y Z, ZHANG Q C, et al. Distribution of organic carbon fractions in soil aggregates in Chinese fir plantations with different stand ages[J]. Ecological Processes, 2021, 10: 1

- [28] KORKANÇ S Y. Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties[J]. CATENA, 2014, 123: 62
- [29] 向元彬,周世兴,肖永翔,等. 模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4686
- [30] 王斐,马锐豪,夏开,等. 森林转换对土壤活性有机碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 233

Water-holding capacity and impact on soil organic carbon of typical plant communities in semi-arid area in Liupan mountain, Ningxia

TU Lihui¹⁾ XIONG Wei²⁾ WANG Yanhui¹⁾ YU Pengtao¹⁾ HAN Xinsheng³⁾

(1)Institute of Forest Ecological Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry, 100091, Beijing, China;

2)Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, 100091, Beijing, China;

3)Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Research Center for Ecological Restoration and Multi-Functional Forestry of Ningxia, 750002, Yinchuan, Ningxia, China)

Abstract Quantitative analysis and evaluation of water-holding and carbon-fixing functions of vegetation communities have great significance to understand water conservation and carbon sequestration of desert vegetation communities. Four typical plant communities (*Larix principis-rupprechtii*, *Betula platyphylla*, *Hippophae rhamnoides* and grassland) in the Diediegou small watershed of semi-arid area in Liupan mountains, Ningxia, China were studied in this work. Field measurement and quantitative comparison of water-holding and carbon-fixing functions of litter layer and soil layer were conducted. Water-holding capacity of litter layer and soil layer of plant communities was analyzed by entropy weight method (EWM). The relationship between soil organic carbon content and holding water capacity was analyzed by path analysis. Maximum water holding capacity of litter layer of these 4 plant communities was found to range from 3.03 to 20.55 t · hm⁻², effective storage capacity range from 2.13 to 14.58 t · hm⁻²; the largest was found with *Betula platyphylla*, being 1.4, 3.0 and 6.8 times of *Larix principis-rupprechtii*, *Hippophae rhamnoides* and grassland, respectively. In the 0-100 cm soil layer of these plant communities, maximum water holding capacity was found to range from 515.0 to 563.9 mm, capillary water holding capacity range from 377.8 to 423.1 mm, with *Larix principis-rupprechtii* showing the best soil water retention. Mean organic carbon content of 0-100 cm soil layer of these 4 plant communities ranged from 23.89 to 26.43 g · kg⁻¹, the highest was found with *Larix principis-rupprechtii*, the lowest *Betula platyphylla*. Soil organic carbon content was found significantly positively correlated with soil water retention properties (total porosity, capillary porosity, maximum water holding capacity, capillary water holding capacity). The comprehensive evaluation results of water-holding and carbon-fixing functions of litter layer and soil layer of *Larix principis-rupprechtii* were the highest (0.330), followed by *Betula platyphylla* (0.303), grassland (0.218) and *Hippophae rhamnoides* (0.148). The above data suggest that water-holding and carbon-fixing functions of litter layer and soil layer of *Larix principis-rupprechtii* are better than other plant communities, and should be given priority when site conditions are better. This study will facilitate restoration and multi-functional optimization management of forest vegetation in semi-arid Liupanshan area.

Keywords litter; soil layers; holding water capacity; soil organic carbon

【责任编辑:武佳】