

# 喀斯特地区不同年限退耕草地的持水性能

罗秀龙, 舒英格, 龙慧, 李雪梅

(贵州大学 农学院 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 研究不同年限退耕草地持水性能, 为喀斯特地区退耕草地持水性能和水土保持提供科学依据。[方法] 选取贵州省安顺市喀斯特地区不同年限退耕草地(5, 10, 15, 20 a)和耕地(对照 CK)为研究对象, 采用“时空替代法”研究凋落物蓄积量、持水量和拦蓄量以及土壤剖面容重、孔隙度、颗粒组成、含水率及持水量随退耕年限的变化特征。[结果] ①凋落物层蓄积量、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均表现为: 15 a > 20 a > 10 a > 5 a, 且凋落物层持水量、吸水速率与浸水时间的关系分别符合对数函数和幂函数。②退耕草地砂粒含量和容重随着退耕年限的延长均呈现出先下降再上升的趋势; 粉粒、黏粒、总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量和毛管持水量的变化规律与土壤容重相反。③凋落物层和土壤层的持水总量表现为: 10 a > 20 a > 15 a > 5 a > CK, 其中土壤层最大持水量贡献率达到 99% 以上。[结论] 退耕草地不仅增加了凋落物层的生物积累、拦截降雨作用和持水性能, 还在改善土壤结构和孔隙状况的同时, 提高了土壤持水性能。退耕草地均在退耕 10 a 以后逐渐趋于稳定。因此, 建议在退耕 10 a 以后种植落叶树种。

**关键词:** 喀斯特地区; 年限; 退耕草地; 持水性能

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)05-0007-11

**中图分类号:** S812.2

**文献参数:** 罗秀龙, 舒英格, 龙慧, 等. 喀斯特地区不同年限退耕草地的持水性能[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 7-17. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.002; Luo Xiulong, Shuyingge, Long Hui, et al. Water-holding capacity of reclaimed grassland with different ages in karst regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 7-17.

## Water-holding Capacity of Reclaimed Grassland with Different Ages in Karst Regions

Luo Xiulong, Shu Yingge, Long Hui, Li Xuemei

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** [Objective] The water-holding capacity of reclaimed grassland of different ages was studied in order to provide a scientific basis for water retention and soil and water conservation of reclaimed grassland in karst regions. [Methods] Reclaimed grassland of different ages (5, 10, 15, 20 yr) and cultivated land (CK) in a karst area in Anshui City, Guizhou Province was selected as the research objects, and the “space-time substitution method” was used to study litter storage, water-holding capacity, and water storage capacity. The change characteristics of soil profile bulk density, porosity, particle composition, water content, and water-holding capacity were determined for different ages of reclaimed grassland. [Results] ① The litter-layer storage capacity, maximum water-holding capacity, maximum storage capacity, and effective storage capacity followed the reclaimed grassland age order of 15 yr > 20 yr > 10 yr > 5 yr. The relationships of litter-layer water-holding capacity and water absorption rate with soaking time were characterized by a logarithmic function and a power function, respectively. ② The sand content and bulk density of the reclaimed grassland showed a trend of first decreasing and then increasing as age of reclaimed grassland increased. Changes in silt, clay, total porosity, capillary porosity, maximum water-holding capacity, and capillary water-holding capacity were opposite to the changes in soil bulk density. ③ The total water-holding capacity of the litter layer and

收稿日期: 2023-02-15

修回日期: 2023-03-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特山区林草间作生态恢复过程中土壤质量演变规律及其评价: 以贵州‘晴隆模式’为例”(31460133)

第一作者: 罗秀龙(1998—), 男(彝族), 贵州省黔西市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤学。Email: 2238511549@qq.com。

通信作者: 舒英格(1973—), 男(汉族), 贵州省镇宁县人, 博士, 教授, 主要从事农业资源与环境、土地利用与规划研究。Email: maogen958@163.com。

the soil layer followed the order of 10 yr > 20 yr > 15 yr > 5 yr > CK. The maximum water-holding contribution rate of the soil layer was more than 99%. [Conclusion] Reclaimed grassland of different ages not only increased the bioaccumulation, rainfall interception, and water-holding capacity of the litter layer, but also improved soil structure and pore status. The soil water-holding capacity gradually stabilized after 10 years. Therefore, it is recommended that planting deciduous trees after 10 years of farmland conversion to grassland.

**Keywords:** karst area; years; reclaimed grassland; water-holding capacity

贵州省喀斯特地区的生态环境具有地表崎岖破碎,溶蚀、水蚀作用严重,土壤浅薄且不连续,土壤持水能力弱等特点<sup>[1]</sup>,因此,植被恢复成为改善喀斯特生态环境的根本措施和手段<sup>[2]</sup>。2000年以来,随着人口、经济增长,大量农村人口选择外出务工,加之在国家退耕还林草政策的推动下,大面积耕地都已实现了退耕<sup>[3]</sup>。目前喀斯特生态系统处于退耕后不同恢复阶段<sup>[4]</sup>,草本植物恢复阶段作为陆地生态系统的重要组成部分,在水文生态功能中占有极其重要的地位。草地不仅能够截留降水,而且有着较高的渗透性和保水能力,在水土保持及改良土壤等方面具有重要意义<sup>[5]</sup>。因此,研究喀斯特地区不同年限退耕草地持水性能成为退耕草地演替及生态恢复的重要基础。

土壤持水性能是影响地表过程的关键因素<sup>[6]</sup>,体现了土壤蓄积和保持水分的能力,是预防土壤侵蚀、制定水土保持措施和水分管理等的依据<sup>[7]</sup>。对于土壤持水性能评价,目前采用的指标主要包括土壤颗粒组成、土壤容重、土壤孔隙度和土壤持水量等<sup>[8-9]</sup>,这些指标与土壤持水性能密切相关。凋落物是植物的地上部分产生并归还到地表的有机物质总称<sup>[10]</sup>,其结构疏松、透水性和持水能力良好,在改善土壤理化性质、水源涵养、水量平衡等方面起着非常重要的作用<sup>[11]</sup>。近年来国内研究者采用“空间代替时间”的方法对植被恢复过程中的土壤水分特征进行了研究。例如,张永旺等<sup>[12]</sup>探究了黄土高原地区土壤持水性与土壤水分有效性对不同植被(草地、灌木林地和乔木林地)的响应。在草本植物恢复阶段的研究中,易湘生等<sup>[13]</sup>开展了黄河源区草地退化对土壤持水性影响研究;王普昶等<sup>[14]</sup>研究了贵州南部人工草地不同放牧强度下浅层土壤剖面水分的空间异质性及其影响因素。关于凋落物已有的研究多集中于森林生态系统<sup>[15-16]</sup>,有部分学者以草地凋落物作为研究对象开展了一些探索性研究,涉及凋落物蓄积量、厚度特征<sup>[17-18]</sup>、凋落物持水特性<sup>[19-20]</sup>。上述研究分布于不同区域,具有一定的地域代表性。但是,已有研究较多集中在不同植被恢复阶段的土壤持水性、水分有效性和生态效应等,在草本植物阶段的研究也多关注于不同放牧及退化程度草地持水特征和土壤物理性质等,对于喀斯特地区不同年限退耕草地持水性能

的对比研究却鲜有报道,限制了对退耕地植被恢复过程中草地生态系统持水性能及其异质性的精确模拟。

因此,本文选择了喀斯特地区退耕 5, 10, 15, 20 a 的次生草地凋落物和不同土层(0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm)土壤为研究对象,以耕地为对照,通过“时空替代法”研究不同退耕年限下草地凋落物层和土壤层持水性能的差异和变化特征,以期对喀斯特地区退耕草地持水性能和水土保持提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市平坝区,地处云贵高原东侧梯状斜坡中段,地势西北高东南低,中部较平坦。山系属苗岭山群,多呈北东—南西走向,呈非平行展布,连续性较差。境内大部为丘陵,喀斯特地貌极为突出,土层较薄,土壤中石砾含量较高。地理坐标为 106°27′57″—106°32′19″E, 26°18′59″—26°22′47″N,海拔 1 218~1 285 m。为亚热带季风湿润气候,多年平均降雨量为 1 298 mm,年平均气温为 14.1℃。居住汉族、苗族、布依族人口。耕地面积 2 673.3 hm<sup>2</sup>,粮食作物主要以玉米(*Zea mays*)、水稻(*Oryza sativa*)为主。研究区内主要土壤种类以石灰土和黄壤为主,并且有明显的石灰岩出露。所选试验样地退耕前为种植玉米的耕地,退耕后在自然状态下生长的次生草地,土壤类型均为石灰土,且未进行过人工干预。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置及土壤样品采集

2022年9月,通过对安顺市平坝区进行实地勘察并访问当地老农,结合 Bigemap 和谷歌地球等工具来对历史卫星影像图进行比较,通过空间替代时间的方法,在坡向、坡度及海拔等立地条件基本一致的退耕集中连片地区,分别选取退耕时间为 5, 10, 15, 20 a 的草地和耕地作为对照的 5 个样地(表 1)。每个样地都布设 3 个 20 m × 20 m 的标准样方,共设置 15 块标准样方。分别在每一个样方内沿对角线随机布设 3 个取样点,挖土层剖面,共计 45 个剖面。自下到上采用沟槽方式在 0—40 cm 深度分 5 个层次采集距地面 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土壤。其中,在采集草地土壤剖面样品前,除去土壤表

面的枯枝落叶层及其分解和半分解层。每层取土样约一千克,将每个样方内的相同深度 3 个采样点的土壤混匀装袋,并依次在各土层用环刀法来测定土壤容

重。使用 GPS 准确读取并记录采样点坐标、海拔等信息。将已收获的土样经过自然风干,并挑出植物根和砾石,过 2 mm 筛后用于土壤颗粒组成的测定。

表 1 不同退耕年限草地样地状况

Table 1 Conditions of plots with different years of reclaimed grassland

退耕年限/a	坐标	海拔/m	坡向	坡度/(°)	主要植被
CK	106°28'48"E 26°18'59"N	1 243.06	NW	15	玉米( <i>Zea mays</i> )
5	106°32'19"E 26°22'47"N	1 217.62	W	14	白茅( <i>Imperata cylindrica</i> )、地三叶草( <i>Trifolium subterraneum</i> )
10	106°29'10"E 26°19'28"N	1 236.36	N	16	白茅、地三叶草、五月艾( <i>Artemisia indica</i> )
15	106°27'57"E 26°20'52"N	1 285.38	NW	15	白茅、地三叶草、五月艾、红刺苔( <i>Rubus sumatranus</i> )、青刺尖( <i>Prinsepia utilis</i> )
20	106°28'48"E 26°18'60"N	1 249.93	NW	18	白茅、地三叶草、五月艾、红刺苔、火棘( <i>Pyracantha fortuneana</i> )

## 2.2 凋落物层的蓄积量与自然含水率测定

2022 年 9 月,以每块标准样地的四角及对角线中心为基准,沿对角线均匀设置 3 个 0.5 m × 0.5 m 的小样方(共 12 个小样方)。采用直接收获法按未分解层和半分解层收集样方内所有凋落物,装入相同规格的自封袋,将其密封后带回实验室、称其鲜重,然后用烘箱(75 °C)将不同年限的凋落物烘干至恒重,用于计算凋落物的蓄积量、自然含水率等指标,计算公式为:

$$R_0 = (M_1 - M_0) / M_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $R_0$  为凋落物自然含水率(%);  $M_1$  为凋落物鲜重(g);  $M_0$  为凋落物干重(g)。

## 2.3 凋落物持水量与吸水速率测定

采用室内浸水法测定凋落物持水量及吸水速率。将烘干后的凋落物全部装入孔径为 1 mm 的网袋(预先称重,并标记),把它们完全浸泡在盛有清水的容器里。分别在浸水 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24 h 后,将网袋从水中取出,悬挂在空中约 5 min,当没有水滴滴落时,立即称量。所得凋落物质量与凋落物干重之差即为此时凋落物的持水能力。根据持水量计算凋落物的吸水速率、持水率、最大持水量、最大持水率。各指标计算公式为:

$$\Delta M = M_t - M_0 \quad (2)$$

$$V = (M_t - M_0) / t \quad (3)$$

$$R = (M_t - M_0) / M_0 \times 100\% \quad (4)$$

$$M_{\max} = M_{24} - M_0 \quad (5)$$

$$R_{\max} = (M_{24} - M_0) / M_0 \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\Delta M$  为凋落物浸泡  $t$  h 的持水量( $t/hm^2$ );  $M_t$  为浸泡  $t$  h 的质量(g);  $V$  为浸泡  $t$  h 的吸水速率 [ $t/(hm^2 \cdot h)$ ];  $t$  为浸泡时间(h);  $R$  为持水率(%);

$M_{\max}$  为最大持水量( $t/hm^2$ );  $M_{24}$  为浸泡 24 h 的质量(g);  $R_{\max}$  为最大持水率(%).

## 2.4 凋落物有效拦蓄量测定

凋落物的最大拦蓄量、最大拦蓄率、有效拦蓄量。各指标计算公式<sup>[21]</sup>为:

$$W_{\max} = W_m \times M \quad (7)$$

$$W_m = R_{\max} - R_0 \quad (8)$$

$$W = (0.85 R_{\max} - R_0) \times M \quad (9)$$

式中: $W_{\max}$  为最大拦蓄量( $t/hm^2$ );  $W_m$  为最大拦蓄率(%);  $M$  为凋落物蓄积量( $t/hm^2$ );  $W$  为有效拦蓄量( $t/hm^2$ )。

## 2.5 其他指标

土壤颗粒组成的测定采用比重计速测法;容重、孔隙度、持水量的测定采用环刀法;土壤含水率的测定采用烘干法。

## 2.6 数据分析

使用 Excel 完成数据的整理和计算。使用 SPSS 23.0 软件对不同年限退耕草地凋落物层蓄积量和持水能力以及不同年限同一土层各持水性指标的差异显著性( $p < 0.05$ )进行单因素方差分析,并对其进行多重比较,对凋落物持水量及吸水速率进行回归分析。使用 Origin 2021 进行绘图。

# 3 结果与分析

## 3.1 不同年限退耕草地凋落物持水性能

3.1.1 不同年限退耕草地凋落物蓄积量 由表 2 可知,不同年限退耕草地凋落物的总蓄积量为 1.29~4.31  $t/hm^2$ ,未分解层蓄积量变化在 0.24~1.48  $t/hm^2$ ,半分解层蓄积量变化在 1.05~2.83  $t/hm^2$ ,均表现为:15 a > 20 a > 10 a > 5 a。通过方差分析可知,凋落

物总蓄积量、未分解层和半分解层蓄积量均表现出在退耕 5 a 和 10 a 与 15 a 和 20 a 之间存在显著性差异,此外,未分解层蓄积量还表现出在退耕 5 a 与 10 a 之间存在显著性差异,说明退耕 15 a 对凋落物蓄积量的影响较大。从凋落物组成来看,凋落物半分解层和未分解层蓄积量占总蓄积量的比例不同,未分解层占总蓄积量百分比的变化范围为 18.91%~34.23%,

半分解层占总蓄积量百分比的变化范围为 65.86%~81.35%,各退耕年限草地均表现出半分解层蓄积量 > 未分解层蓄积量。说明随着退耕年限的增加,不但可以促进草地凋落物的生物积累,同时也促使其从未分解层转化为半分解层,最后经过代谢、降解形成有机物等物质而回归土壤,从而改善土壤结构和孔隙性状。

表 2 不同年限退耕草地凋落物蓄积量

Table 2 Litter accumulation with different years of reclaimed grassland

退耕年限/a	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )		总蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	占蓄积量比例/%	
	未分解层	半分解层		未分解层	半分解层
5	0.24±0.05 <sup>c</sup>	1.05±0.08 <sup>b</sup>	1.29±0.06 <sup>b</sup>	18.75±3.93 <sup>b</sup>	81.25±3.93 <sup>a</sup>
10	0.50±0.08 <sup>b</sup>	1.10±0.12 <sup>b</sup>	1.60±0.12 <sup>b</sup>	31.44±4.75 <sup>a</sup>	68.56±4.75 <sup>b</sup>
15	1.48±0.07 <sup>a</sup>	2.83±0.10 <sup>a</sup>	4.31±0.42 <sup>a</sup>	34.35±1.96 <sup>a</sup>	65.65±1.96 <sup>b</sup>
20	1.36±0.04 <sup>a</sup>	2.62±0.19 <sup>a</sup>	3.98±0.22 <sup>a</sup>	34.19±1.21 <sup>a</sup>	65.81±1.21 <sup>b</sup>

注:表中数据为平均值±标准误差;同列数据不同小写字母表示不同年限间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

3.1.2 不同年限退耕草地凋落物持水能力 凋落物的最大持水量和最大持水率是反映凋落物持水性能的重要指标,其主要决定于凋落物的现存量。由表 3 可知,不同年限退耕草地凋落物最大持水量总和范围在 5.86~18.57 t/hm<sup>2</sup>,依次为:15 a>20 a>10 a>5 a,最大持水率为 384.23%~460.12%,依次为:5 a>15 a>10 a>20 a。可见凋落物最大持水量与凋落物最大持水率排列不相同。

方差分析可知,草地凋落物未分解层最大持水量

在退耕 5 a 和 10 a 与 15 a 和 20 a 之间存在显著性差异,退耕 15 a 的半分解层最大持水量显著高于其他年限。退耕 10 a 和 20 a 的未分解层最大持水率显著低于 5 a,各退耕年限的半分解层最大持水率无显著性差异。各退耕年限的半分解层最大持水量均高于未分解层,这与凋落物的蓄积量规律一致。由此可见,凋落物持水能力与凋落物的分解程度和蓄积量有关,分解程度越大,蓄积量越多,凋落物的持水能力越强。

表 3 不同年限退耕草地凋落物最大持水量和持水率

Table 3 Maximum litter water-holding capacity and water holdup of litter accumulation in different years of reclaimed grassland

退耕年限/a	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
5	1.38±0.03 <sup>b</sup>	4.48±0.75 <sup>c</sup>	5.86±0.75 <sup>c</sup>	491.60±44.07 <sup>a</sup>	428.64±63.58 <sup>a</sup>	460.12±10.30 <sup>a</sup>
10	2.02±0.39 <sup>b</sup>	4.81±0.35 <sup>c</sup>	6.83±0.6 <sup>c</sup>	401.30±15.79 <sup>b</sup>	401.25±26.17 <sup>a</sup>	401.28±8.28 <sup>b</sup>
15	5.84±1.53 <sup>a</sup>	12.72±1.57 <sup>a</sup>	18.56±2.6 <sup>a</sup>	441.12±30.20 <sup>ab</sup>	454.30±39.07 <sup>a</sup>	447.71±3.14 <sup>a</sup>
20	5.31±0.72 <sup>a</sup>	9.85±0.95 <sup>b</sup>	15.17±0.52 <sup>b</sup>	390.12±45.02 <sup>b</sup>	378.34±60.21 <sup>a</sup>	384.23±25.62 <sup>b</sup>

3.1.3 凋落物拦蓄能力 由表 4 可知,凋落物有效拦蓄量范围为 4.69~13.42 t/hm<sup>2</sup>,最大拦蓄量范围在 5.57~16.84 t/hm<sup>2</sup>,各退耕年限凋落物层有效拦蓄量和最大拦蓄量大小顺序均为 15 a>20 a>10 a>5 a;最大拦蓄率范围在 362.79%~460.67%,大小顺序为 15 a>5 a>10 a>20 a。经方差分析可知,草地凋落物未分解层、半分解层的有效拦蓄量和最大拦蓄量均在退耕 5 a 和 10 a 与 15 a 和 20 a 之间存在显著性差异,同时,各退耕年限的半分解层的有效拦蓄量和最大拦蓄量均高于未分解层,这与凋落物的蓄积量、最大持水量规律一致;各退耕年限间的凋落物最大拦蓄

率的差异性与最大持水率相同。综合 4 个退耕年限凋落物的降雨拦蓄变化来看,退耕 15 a 的草地拦蓄能力最强。

3.1.4 不同年限退耕草地凋落物持水过程 凋落物经过浸泡以后呈现出一定的规律,4 个退耕年限草地凋落物的未分解层(图 1a)和半分解层(图 1b)持水量均随着浸水时间的加长而不断增加。各层凋落物均在浸泡 15 min 内迅速增加,之后持水量累计增加量迅速减少且很快进入平缓增加状态,特别是 1 h 之后增加非常缓慢,直到 24 h 达到最大持水量,凋落物的持水量达到饱和状态。草地未分解层凋落物的持水

能力表现为:15 a>20 a>10 a>5 a,半分解层凋落物持水能力表现为在浸泡 4 h 之前为:15 a>20 a>10 a>5 a,浸泡 4 h 以后为:15 a>20 a>5 a>10 a。随着退耕年限的延长,凋落物的持水能力呈先增加后减少的趋势。从表 5 得出,4 个退耕年限不同层次凋落物的

持水量  $Q$  与浸水时间  $t$  以对数函数拟合效果较好,持水量  $Q$  随浸水时间  $t$  延长以对数函数增加,关系式为:

$$Q = a \ln(t) + b \quad (10)$$

式中: $Q$  为凋落物持水量 ( $t/\text{hm}^2$ );  $t$  为浸水时间 ( $\text{h}$ );  $a$  为方程系数;  $b$  为方程常数。

表 4 不同年限退耕草地凋落物最大拦蓄量和有效拦蓄量

Table 4 Maximum storage capacity and effective storage capacity of litter accumulation in different years of reclaimed grassland

退耕年限/a	最大拦蓄率/%			最大拦蓄量/( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )			有效拦蓄量/( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	总和
5	480.17±24.41 <sup>a</sup>	441.17±44.52 <sup>a</sup>	460.67±21.40 <sup>a</sup>	1.29±0.02 <sup>c</sup>	4.29±0.73 <sup>b</sup>	5.57±0.73 <sup>c</sup>	1.08±0.02 <sup>b</sup>	3.62±0.62 <sup>b</sup>	4.69±0.62 <sup>a</sup>
10	380.65±13.49 <sup>b</sup>	354.86±38.98 <sup>a</sup>	367.76±13.67 <sup>b</sup>	1.91±0.36 <sup>c</sup>	3.91±0.81 <sup>b</sup>	5.82±0.71 <sup>c</sup>	1.61±0.30 <sup>b</sup>	3.25±0.70 <sup>b</sup>	4.86±0.61 <sup>a</sup>
15	428.36±29.56 <sup>ab</sup>	365.87±101.63 <sup>a</sup>	392.92±58.58 <sup>b</sup>	6.50±0.54 <sup>a</sup>	10.34±2.80 <sup>a</sup>	16.84±1.33 <sup>a</sup>	4.77±1.30 <sup>a</sup>	8.65±2.38 <sup>a</sup>	13.42±1.83 <sup>a</sup>
20	371.78±45.87 <sup>b</sup>	353.80±59.05 <sup>a</sup>	362.79±27.74 <sup>b</sup>	5.06±0.72 <sup>b</sup>	9.21±0.94 <sup>a</sup>	14.27±0.63 <sup>b</sup>	4.27±0.61 <sup>a</sup>	7.73±0.81 <sup>a</sup>	12.00±0.55 <sup>a</sup>

4 个退耕年限草地未分解层(图 2a)和半分解层(图 2b)凋落物的吸水速率均随着浸泡时间延长而减小。浸泡 15 min 时,不同年限凋落物的未分解层和半分解层吸水速率最大,在 0—2 h 内,凋落物的吸水速率呈现直线下降,浸泡 2 h 后,凋落物的吸水速率下降缓慢,在浸泡 12 h 后,凋落物的吸水速率基本趋于

0。从表 6 得出,4 个退耕年限不同层次凋落物的吸水速率  $V$  与浸水时间  $t$  以幂函数拟合效果较好,吸水速率  $V$  随着浸水时间  $t$  延长以幂函数减小,关系式为:

$$V = at^b \quad (11)$$

式中: $V$  为凋落物吸水速率 [ $t/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ];  $t$  为浸泡时间 ( $\text{h}$ );  $a$  为方程系数;  $b$  为指数。

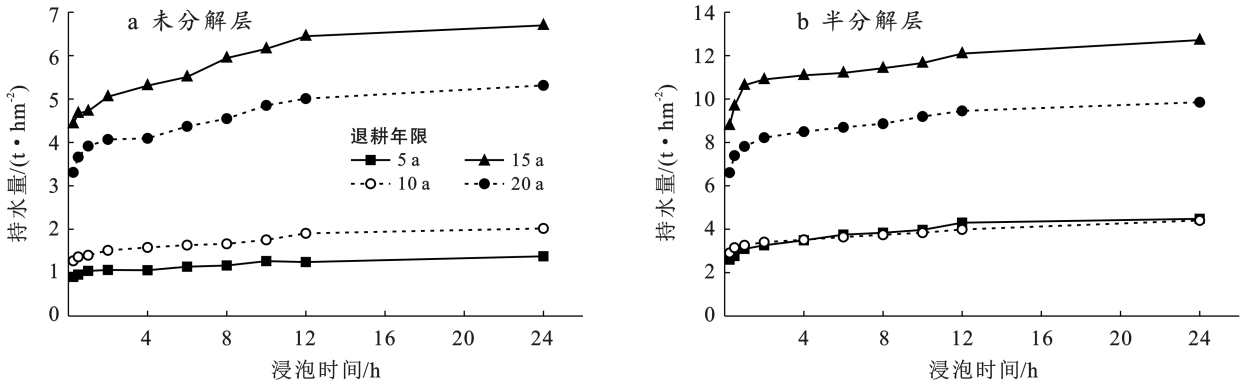


图 1 不同年限退耕草地未分解层和半分解层的凋落物持水量随浸泡时间的变化  
Fig.1 Changes of litter water capacity in undecomposed layer and semi-decomposed layer with soaking time in different years of reclaimed grassland

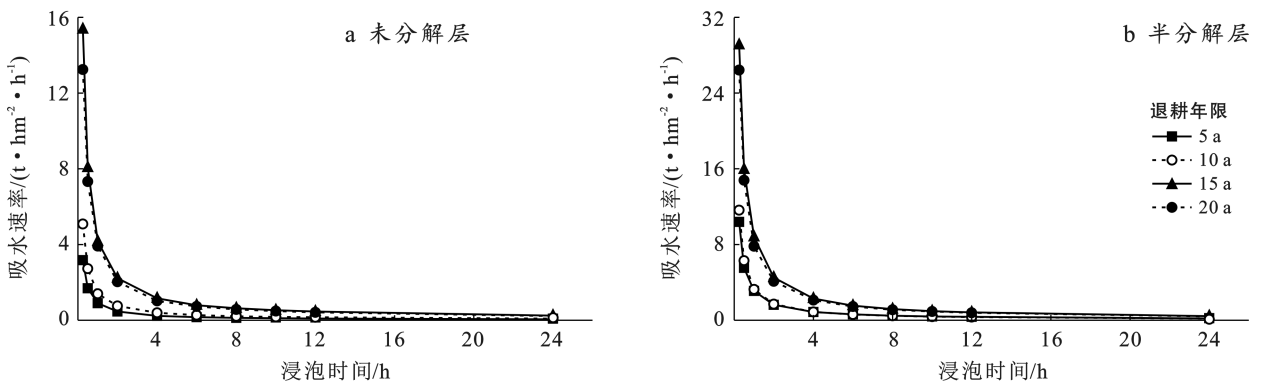


图 2 不同年限退耕草地未分解层和半分解层的凋落物持水速率随浸泡时间的变化  
Fig.2 Changes of litter water absorption rate in undecomposed layer and semi-decomposed layer with soaking time in different years of reclaimed grassland

表 5 不同年限退耕草地凋落物持水量与浸水时间关系式

Table 5 Relation between litter capacity and soaking time in different years of reclaimed grassland

退耕年限/a	未分解层		半分解层	
	关系式	R <sup>2</sup>	关系式	R <sup>2</sup>
5	$Q=0.185 \ln(t)+0.842$	0.852	$Q=0.185 \ln(t)+0.842$	0.919
10	$Q=0.301 \ln(t)+1.155$	0.850	$Q=0.555 \ln(t)+2.748$	0.864
15	$Q=0.999 \ln(t)+3.986$	0.852	$Q=1.513 \ln(t)+8.734$	0.956
20	$Q=0.809 \ln(t)+3.092$	0.898	$Q=1.325 \ln(t)+6.458$	0.975

表 6 不同年限退耕草地凋落物吸水速率与浸水时间关系式

Table 6 Relation between water absorption rate and soaking time of litters in different years of reclaimed grassland

退耕年限/a	未分解层		半分解层	
	关系式	R <sup>2</sup>	关系式	R <sup>2</sup>
5	$V=5.349 t^{-1.820}$	0.970	$V=15.119 t^{-1.750}$	0.969
10	$V=7.527 t^{-1.811}$	0.968	$V=17.600 t^{-1.843}$	0.969
15	$V=25.686 t^{-1.810}$	0.971	$V=55.145 t^{-1.853}$	0.963
20	$V=19.907 t^{-1.802}$	0.966	$V=40.979 t^{-1.832}$	0.964

### 3.2 不同年限退耕草地土壤的持水性能

3.2.1 不同年限退耕草地土壤颗粒组成、容重和孔隙状况 土壤颗粒组成变化是土壤形成、发育及进化的标志,良好的土壤颗粒组成有利于土壤团聚体形成,增加孔隙度,提高土壤持水性能<sup>[22]</sup>。研究区各样地粉粒成分最高,其比例都在 30%以上,最大值达到了 50.47%,而黏粒的含量最小,其比例均不足 30%,最小值只有 8.53%。随退耕年限延长,各粒径所占比例不同。在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层中,砂粒(图 3)在退耕 5~15 a 阶段分别显著上升至峰值 49.1%,49.0%和 50.5%,在退耕 15~20 a 阶段分别显著下降至 30.0%,27.5%和 30.2%;黏粒在退耕 5~15 a 阶段分别显著下降至极小值 12.5%,9.3%和 8.5%,在退耕 15~20 a 阶段分别显著上升至峰值 27.7%,27.3%和 22.6%;粉粒在退耕 5~10 a 阶段除了在 5—10 cm 土层下降至极小值不显著外,在 0—5 cm 和 10—20 cm 土层分别显著下降至极小值 37.9%和 39.3%,在退耕 10~20 a 阶段分别显著上升至 42.3%,45.3%和 47.2%。在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层中,退耕 5 a 时砂粒分别处于峰值 38.6%和 37.3%,在退耕 5~20 a 阶段呈先下降后上升再下降趋势,但变化差异都不显著;黏粒在退耕 5~10 a 阶段分别显著增加上升至峰值 28.5%和 37.3%,在退耕 10~20 a 阶段,在 20—30 cm 土层呈现出先显著下降至 17.1%,后上升的趋势,30—40 cm 土层显著下降至 19.5%;粉粒比例在退耕 5~10 a 阶段分别显著下降至极小值 38.3%和 34.1%,在退耕 10~20 a 阶段分别显著上升至峰值 48.3%和 48.0%。

土壤容重和孔隙状况是土体构造虚实松紧的反映,影响土壤的通气性、透水性及其贮存水分能力,关

系着土壤中水分的流通和贮存<sup>[23]</sup>。由图 4 可知,随着退耕年限的进一步延长,0—5 cm 和 10—20 cm 土层容重在退耕 5~15 a 阶段逐年下降,并趋于稳定,分别达到极小值 1.02, 1.06 g/cm<sup>3</sup>;在退耕 15~20 a 阶段,土层容重分别显著上升至 1.16, 1.19 g/cm<sup>3</sup>。5—10 cm 土层容重在退耕 5~10 a 阶段显著性下降到极小值 0.96 g/cm<sup>3</sup>;在退耕 10~20 a,显著性上升到峰值 1.29 g/cm<sup>3</sup>。20—30 cm 和 30—40 cm 土层容重在退耕 5~20 a 变化差异都不显著。

由表 7 可知,在 0—5 cm 土层,土壤总孔隙度和毛管孔隙度均呈现出先在退耕 5~10 a 阶段上升,后在退耕 10~15 a 阶段下降,再在退耕 15~20 a 阶段上升的趋势,在退耕 20 a 时显著达到峰值 61.82%和 60.58%;在 5—10 cm 土层中,土壤总孔隙度、毛管孔隙度均在退耕 10 a 时显著上升到峰值 63.22%, 60.97%,在退耕 10~20 a 阶段呈下降趋势,但变化差异均不显著;在 10—20 cm 土层中,土壤总孔隙度、毛管孔隙度随着退耕年限的增加,总体变化规律和在 0—5 cm 土层相同,并在退耕 10 a 时显著达到峰值 56.39%和 54.37%;在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层中,土壤总孔隙度、毛管孔隙度随着退耕年限的变化规律和在 0—5 cm 土层中相同,但仅在 20—30 cm 土层中,毛管孔隙度在退耕 20 a 时显著达到峰值 54.62%,其余变化差异均不显著。在 0—5 cm 土层中,非毛管孔隙度在退耕 10 a 时候显著下降到极小值 1.06%,在退耕 15 a 时候显著上升到峰值 2.54%;在 5—10 cm 土层中,在退耕 10 a 时显著下降到极小值 0.87%,在退耕 20 a 时候显著上升到峰值 3.17%;在 20—30 cm 土层中,在退耕 20 a 时候显著下降到极小值 0.99%;在 10—20, 30—40 cm 土层中,非毛管孔隙度在各退耕年限间的差异并不显著。

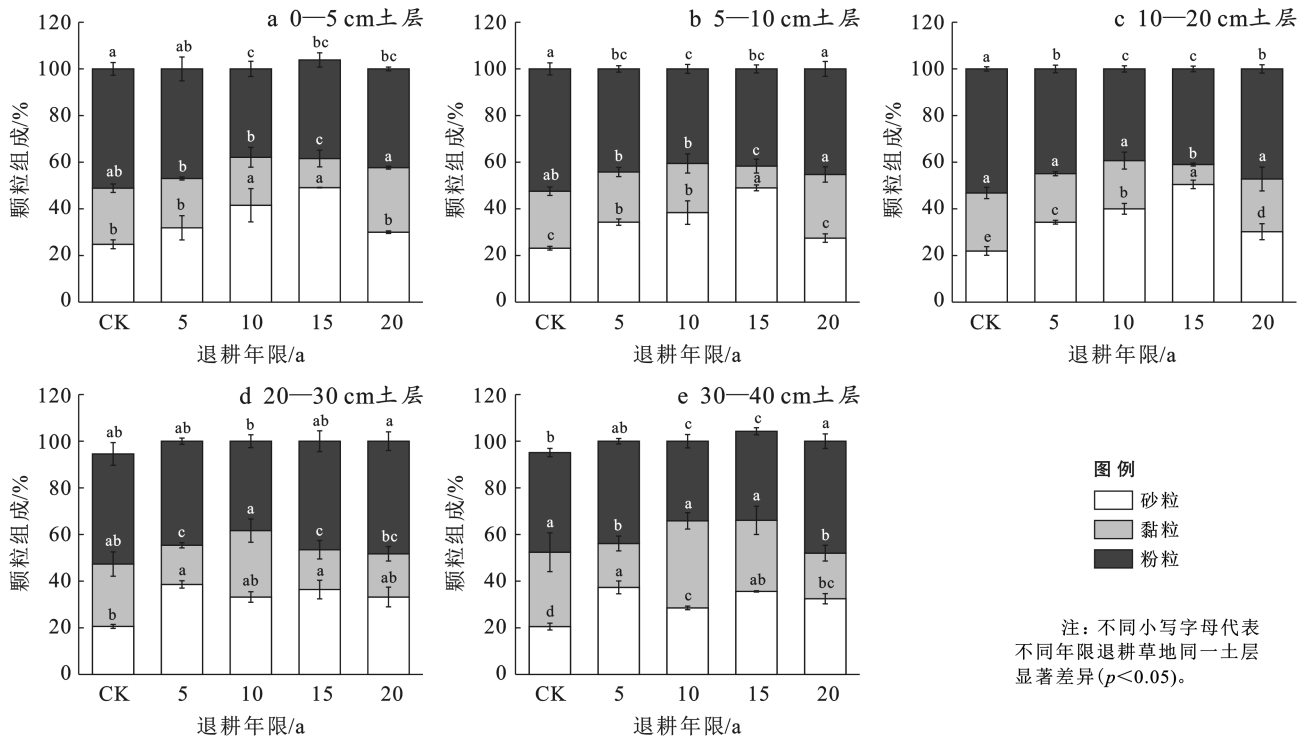


图 3 不同年限退耕草地 0—40 cm 土层土壤颗粒组成

Fig.3 Soil mechanical composition of 0—40 cm soil layer in different years of reclaimed grassland

表 7 不同年限退耕草地土壤孔隙度变化特征

Table 7 Variation characteristics of soil porosity in different years of reclaimed grassland

物理性质	退耕年限/a	土层深度/cm				
		0—5	5—10	10—20	20—30	30—40
总孔隙度/%	CK	48.85 ± 5.33 <sup>b</sup>	49.29 ± 5.60 <sup>bc</sup>	45.65 ± 2.19 <sup>b</sup>	46.61 ± 3.44 <sup>a</sup>	53.00 ± 6.27 <sup>a</sup>
	5	50.26 ± 2.57 <sup>ab</sup>	47.06 ± 1.65 <sup>c</sup>	49.26 ± 3.47 <sup>ab</sup>	48.20 ± 1.77 <sup>a</sup>	52.43 ± 5.43 <sup>a</sup>
	10	60.02 ± 0.80 <sup>ab</sup>	63.22 ± 0.82 <sup>a</sup>	56.39 ± 1.58 <sup>a</sup>	53.19 ± 1.99 <sup>a</sup>	57.12 ± 7.75 <sup>a</sup>
	15	56.52 ± 2.87 <sup>ab</sup>	57.12 ± 4.65 <sup>a</sup>	54.61 ± 6.41 <sup>a</sup>	51.55 ± 9.35 <sup>a</sup>	52.57 ± 5.20 <sup>a</sup>
	20	61.82 ± 12.25 <sup>a</sup>	56.17 ± 4.21 <sup>ab</sup>	55.40 ± 4.12 <sup>a</sup>	55.60 ± 0.97 <sup>a</sup>	56.64 ± 5.63 <sup>a</sup>
毛管孔隙度/%	CK	45.62 ± 6.20 <sup>c</sup>	45.52 ± 5.98 <sup>b</sup>	43.94 ± 1.73 <sup>b</sup>	44.75 ± 4.67 <sup>b</sup>	50.24 ± 7.96 <sup>a</sup>
	5	48.39 ± 2.06 <sup>bc</sup>	45.58 ± 2.15 <sup>b</sup>	47.31 ± 2.20 <sup>ab</sup>	46.80 ± 1.65 <sup>ab</sup>	50.86 ± 5.14 <sup>a</sup>
	10	58.96 ± 1.35 <sup>ab</sup>	60.97 ± 3.04 <sup>a</sup>	54.37 ± 1.38 <sup>a</sup>	51.91 ± 1.57 <sup>ab</sup>	55.74 ± 8.35 <sup>a</sup>
	15	53.98 ± 2.91 <sup>abc</sup>	54.45 ± 4.53 <sup>a</sup>	52.92 ± 5.98 <sup>a</sup>	49.81 ± 9.80 <sup>ab</sup>	50.38 ± 4.85 <sup>a</sup>
	20	60.58 ± 11.71 <sup>a</sup>	53.99 ± 3.53 <sup>a</sup>	53.67 ± 4.69 <sup>a</sup>	54.62 ± 1.01 <sup>a</sup>	51.77 ± 4.50 <sup>a</sup>
非毛管孔隙度/%	CK	4.31 ± 0.08 <sup>a</sup>	3.76 ± 0.42 <sup>a</sup>	1.71 ± 1.12 <sup>a</sup>	2.54 ± 0.53 <sup>a</sup>	1.40 ± 1.5 <sup>a</sup>
	5	1.87 ± 0.75 <sup>bc</sup>	1.48 ± 0.77 <sup>b</sup>	1.94 ± 1.63 <sup>a</sup>	1.85 ± 0.44 <sup>ab</sup>	1.57 ± 0.29 <sup>a</sup>
	10	1.06 ± 0.60 <sup>c</sup>	0.87 ± 0.09 <sup>b</sup>	2.02 ± 1.96 <sup>a</sup>	1.62 ± 0.84 <sup>ab</sup>	1.38 ± 0.71 <sup>a</sup>
	15	2.54 ± 0.35 <sup>b</sup>	2.68 ± 0.21 <sup>a</sup>	1.69 ± 0.46 <sup>a</sup>	1.73 ± 0.47 <sup>ab</sup>	2.19 ± 0.60 <sup>a</sup>
	20	1.25 ± 0.61 <sup>c</sup>	3.17 ± 0.70 <sup>a</sup>	1.73 ± 0.65 <sup>a</sup>	0.99 ± 0.19 <sup>b</sup>	2.66 ± 2.12 <sup>a</sup>

注:不同小写字母表示不同年限退耕草地同一土层显著差异(p < 0.05)。下同。

3.2.2 不同年限退耕草地土壤的含水率和持水量特征 由图 5 可知,0—5 cm 土层含水率在退耕 5~20 a 阶段逐年上升,达到峰值 28.77%,仅在退耕 20 a 时与耕地存在显著性差异。5—10 cm 土层含水率在退耕 5~10 a 阶段显著性上升到峰值 30.49%;在退耕 10~20 a 逐年下降,但变化差异不显著。10—20 cm 土层

含水率在退耕 5~15 a 阶段显著性上升到峰值 28.55%;在退耕 15~20 a 阶段呈现下降趋势,但变化差异不显著。20—30 cm 土层含水率在退耕 5~20 a 阶段呈现先上升后下降再上升的趋势,在退耕 20 a 时显著性上升到峰值 28.45%。30—40 cm 土层含水率在退耕 5~20 a 逐年上升,但变化差异不显著。

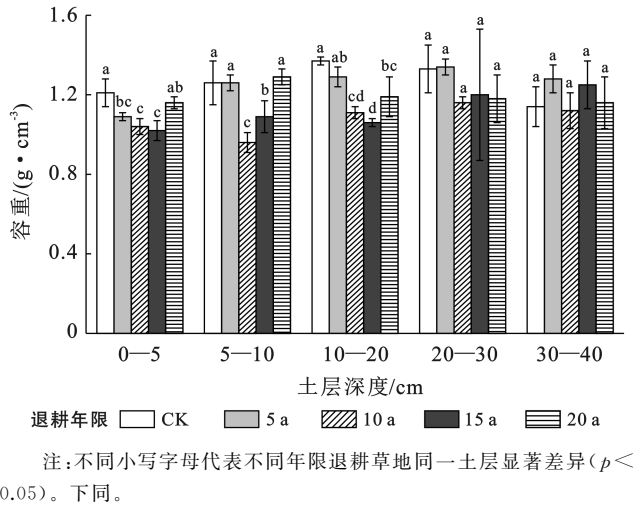


图 4 不同年限退耕草地 0—40 cm 土层土壤容重变化特征  
Fig.4 Variation characteristics of soil bulk density in 0—40 cm soil layer of reclaimed grassland in different years

土壤饱和持水量和毛管持水量均能直观反映土壤的持水性能,同时间接反映水分的再分配能力<sup>[24]</sup>。在退耕 5~20 a 过程中,饱和持水量和毛管持水量在各土壤层次中随着退耕年限的变化,其变化趋势分别与土壤总孔隙度和毛管孔隙度相同。由表 8 可知,在

0—5 cm 土层,饱和持水量和毛管持水量在退耕 20 a 显著达到峰值 309.12,302.88 t/hm<sup>2</sup>;在 5—10 cm 土层中,饱和持水量和毛管持水量在退耕 10 a 时显著上升到峰值 316.10,304.85 t/hm<sup>2</sup>;在 10—20 cm 土层中,饱和持水量和毛管持水量在退耕 10 a 时显著达到峰值 563.90,543.67 t/hm<sup>2</sup>;在 20—30,30—40 cm 土层中,随退耕年限的延长其变化差异不显著。

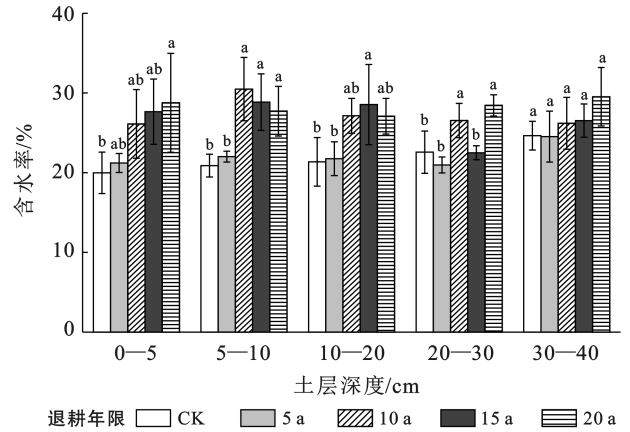


图 5 不同年限退耕草地 0—40 cm 土层含水率变化特征  
Fig.5 Variation characteristics of soil moisture content in 0—40 cm soil layer of reclaimed grassland in different years

表 8 不同年限退耕草地土壤持水量变化特征

Table 8 Variation characteristics of water holding capacity in different years of reclaimed grassland

指标	退耕年限/a	土层深度/cm				
		0—5	5—10	10—20	20—30	30—40
饱和持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	CK	244.27±26.63 <sup>b</sup>	246.43±28.01 <sup>bc</sup>	456.53±21.87 <sup>b</sup>	466.10±34.40 <sup>a</sup>	530.03±62.70 <sup>a</sup>
	5	251.32±12.85 <sup>ab</sup>	235.28±8.27 <sup>c</sup>	492.57±34.65 <sup>c</sup>	482.03±17.67 <sup>a</sup>	524.27±54.26 <sup>a</sup>
	10	300.10±3.98 <sup>ab</sup>	316.10±4.11 <sup>a</sup>	563.90±15.78 <sup>a</sup>	531.90±19.95 <sup>a</sup>	571.23±77.49 <sup>a</sup>
	15	282.60±14.37 <sup>ab</sup>	285.62±23.27 <sup>a</sup>	546.10±64.07 <sup>a</sup>	515.47±93.50 <sup>a</sup>	525.67±51.96 <sup>a</sup>
	20	309.12±61.26 <sup>a</sup>	280.85±21.07 <sup>ab</sup>	553.97±41.19 <sup>a</sup>	556.03±9.67 <sup>a</sup>	566.37±56.31 <sup>a</sup>
毛管持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	CK	228.10±31.00 <sup>c</sup>	227.62±29.88 <sup>b</sup>	439.43±17.26 <sup>b</sup>	447.50±46.74 <sup>b</sup>	502.40±79.65 <sup>a</sup>
	5	241.93±10.28 <sup>bc</sup>	227.90±10.77 <sup>b</sup>	473.13±21.97 <sup>ab</sup>	468.00±16.48 <sup>ab</sup>	508.57±51.45 <sup>a</sup>
	10	294.80±3.006.73 <sup>ab</sup>	304.85±15.19 <sup>a</sup>	543.67±13.75 <sup>a</sup>	519.13±15.67 <sup>ab</sup>	557.40±83.51 <sup>a</sup>
	15	269.90±14.55 <sup>abc</sup>	272.23±22.65 <sup>a</sup>	529.17±59.84 <sup>a</sup>	498.13±98.03 <sup>ab</sup>	503.80±48.45 <sup>a</sup>
	20	302.88±58.54 <sup>a</sup>	269.93±17.66 <sup>a</sup>	536.67±46.86 <sup>a</sup>	546.17±10.07 <sup>a</sup>	517.70±45.03 <sup>a</sup>

### 3.3 不同年限退耕草地持水能力

草地持水能力一般用土壤层和凋落物层的持水总量来评价,草地持水量是反映草地持水性能的重要指标之一,不同年限退耕草地持水总量大小依次为:10 a>20 a>15 a>5 a>CK,可见退耕 10 a 时草地的持水性能最强,其次为 20 a 和 15 a,耕地最小。此外,不同年限退耕草地凋落物层持水量均不到草地持水总量的 1%,土壤层发挥着 99% 以上的持水功能(图 6)。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 不同年限退耕草地凋落物持水性能。贵州是中国南方喀斯特的中心,特殊的地质地貌与气候背景使得喀斯特土壤特别容易流失,草地作为绿色植物的先锋,在水土保持方面起着重要作用。凋落物蓄积量主要取决于凋落物的形成量、凋落物的分解速度和积累时间<sup>[25]</sup>。



喀斯特地区不同退耕年限草地凋落物未分解层、半分解层蓄积量及总蓄积量变化趋势相同,均表现为:15 a>20 a>10 a>5 a,蓄积量整体偏低,主要原因是喀斯特土层浅薄且贫瘠缺水的生境条件形成了

生物量较低的特殊山地喀斯特草地类型。同时,喀斯特地区岩石裸露率高、渗漏性强,属于湿润气候背景下的临时性干旱,在草本植物生长后期,凋落物积累不明显。

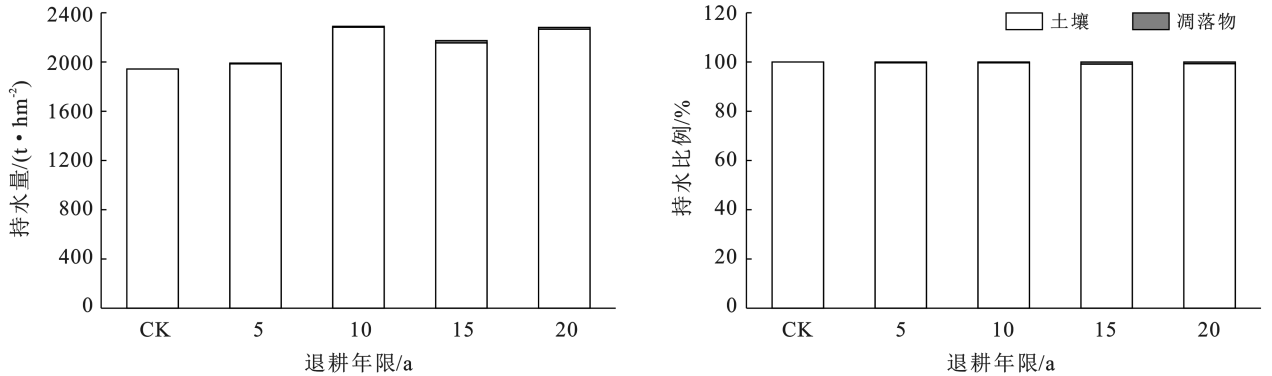


图 6 不同年限退耕草地持水能力

Fig.6 Water holding capacity of reclaimed grassland in different years

凋落物的持水量代表了凋落物的持水能力,而凋落物层的持水量与蓄积量息息相关。凋落物拦蓄量则代表凋落物在实际降雨过程的拦蓄能力,受凋落物自身含水率、吸水能力、蓄积量、持水能力等多种因素影响。本研究表明,不同退耕年限草地凋落物各层次最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量变化趋势相同,均表现出:15 a>20 a>10 a>5 a,且半分解层均高于未分解层,主要原因是最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量不仅与凋落物本身的蓄积量和凋落物结构有关,还与凋落物的分解程度有关,凋落物蓄积量越大、分解程度越大,持水能力越强。

在凋落物持水能力的试验中,不同年限退耕草地凋落物的持水量和吸水速率变换过程均存在较好的函数关系,均表现为:15 a>20 a>10 a>5 a,且不同退耕年限在同一时刻半分解层的持水量和吸水速率均明显大于未分解层。该结果能较好的反映 4 个年限退耕草地凋落物的持水过程,即不同年限退耕草地持水量均随浸水时间而增加逐步趋于稳定,吸水速率在初期最大并随浸水时间增加趋于一致,直到饱和。与以往的研究结果<sup>[26-27]</sup>类似。综上可知,凋落物半分解层的持水功能要明显强于未分解层,且在雨后 2 h 内表现出较高的持水作用。

(2) 不同年限退耕草地土壤的持水性能。土壤是草地贮存水分的最主要场所,在喀斯特地区,土壤厚度薄,在一定土壤厚度条件下,土壤颗粒组成、容重以及土壤孔隙状况决定土壤的持水能力,因此植被对这些指标的改善作用决定了土壤蓄水能力。本研究中,随着退耕年限的延长,0—20 cm 砂粒含量呈现出先上升后下降的趋势,粉粒和黏粒含量变化与之相

反,这与何洪盛等<sup>[28]</sup>对不同年限退耕地的研究结果相同。原因在于不同农田地退耕后都会出现颗粒组成粗化现象<sup>[29]</sup>,而在退耕 15 a 左右时,多年生草地根系发达,植物根系改良了土壤容重和孔隙状况<sup>[30]</sup>,水土得以保持,因此土壤粒度向越来越细化的方向演变,砂粒含量逐渐降低,说明草地土壤的结构随着退耕年限延长逐渐有所好转。0—20 cm 土壤容重随着退耕年限的延长呈现出先下降再上升的规律,土壤总孔隙度和毛管孔隙度的变化规律与容重相反,这与李静等<sup>[31]</sup>在黄土区,王理德等<sup>[32]</sup>对民勤绿洲不同年限退耕地土壤理化性质的研究,马志林等<sup>[33]</sup>对不同退耕年限土壤理化特征结论相符。主要原因是随着退耕年限延长,地表植物不断生长,土壤表面的凋落物、腐殖质大量累积,微生物数量和种类增加等使得地表土质更加疏松,总孔隙度逐渐增大,容重逐渐下降。但随着退耕年限的逐渐延长,重力和雨水冲击效应增强,土层慢慢沉积、紧实,土壤粉粒含量增高,最后逐步趋于稳定,所以容重会有所升高,土壤孔隙度有所下降。总的来看,退耕草地的土壤结构和孔隙状况优于耕地,并随着时间的延长,土壤的通气状况不断得到改善,并在退耕 10 a 时效果最为明显。

本研究中退耕能使土壤含水率在退耕 5 a 时的变化不显著,在较长年限内(5~20 a)波动性上升,这一结果与柴晓虹等<sup>[34]</sup>对石羊河中下游地区各种退耕年限内次生草地的研究结果基本相同。这是因为在退耕后较短年限内,草本植物根部残留的水分比退耕后充足,但由于浅根草本植物生长迅速,根系会迅速吸收浅层土壤水分,因此在退耕较短年限内,土壤含水率的变化并不显著,而这些状况也会随着退耕年限

的增长而逐渐有所改善。持水性是指土壤容纳和保持水分的性能,而土壤持水量则直接反映了土壤贮蓄和调节水分的潜在能力<sup>[35]</sup>。在本研究中,各土层的土壤饱和持水量和毛管持水量的变化规律与土壤总孔隙度一致,这与许多研究者的研究结果相符。这是因为土壤持水能力与容重、孔隙度等密切相关,土壤容重越小,土壤疏松多孔,结构良好,土壤持水能力就越强<sup>[36]</sup>。

土壤持水量是衡量草地土壤持水性能的重要指标。将土壤持水量与土壤物理性质指标进行相关分析(表 9)有利于理解土壤物理性质对土壤持水能力

的作用机制。结果表明,各土壤持水量与容重和粉粒含量在  $\alpha=0.01$  水平(双侧)上显著负相关;与总孔隙度、毛管孔隙度和含水率在  $\alpha=0.01$  水平(双侧)上显著正相关;与砂粒含量在  $\alpha=0.05$  水平(双侧)上显著正相关(表 9);与非毛管孔隙度、黏粒相关性不显著。说明喀斯特退耕草地土壤持水能力很大程度上取决于土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、含水率、砂粒和粉粒含量,退耕草地很可能是通过影响容重、孔隙度,土壤颗粒组成等土壤物理性质进一步影响到土壤持水能力。

表 9 5 个样地土壤持水量与土壤物理性质的相关关系

Table 9 Correlation between soil moisture capacity and soil physical properties in 5 sample plots

土壤持水量	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	砂粒	黏粒	粉粒	含水率
饱和持水量	-0.771**	0.971**	0.947**	0.006	0.474*	-0.130	-0.552**	0.845**
毛管持水量	-0.752**	0.983**	1.000**	-0.098	0.415*	-0.118	-0.615**	0.833**

注: \* 和 \*\* 分别表示在 0.05, 0.01 水平(双侧)上显著相关。

(3) 不同年限退耕草地持水能力。通过计算各年限退耕草地凋落物最大持水量与 0—40 cm 土壤最大持水量的总和,定量比较 4 个年限退耕草地凋落物和土壤的持水能力。不同年限退耕草地持水总量大小依次为: 10 a > 20 a > 15 a > 5 a > CK, 主要因为在退耕 10 a 时,土层中有机质的堆积速度较快,对表层土壤起到一定的疏松作用,致使土壤的容重降低,因此,土壤的孔隙度逐渐升高,提高土壤蓄水透水能力,进而使草地具有较好的持水能力。土壤层在草地持水功能中的比例最大,发挥着 99% 以上的持水功能,虽然凋落物层持水量比例很小,但其在减小降雨动能,延缓地表径流速度,抑制土壤蒸发,改善土壤理化性质等方面具有重要的水文生态意义。

总的来看,在退耕草地生长过程中,可以通过凋落物层的生物积累、降雨截留和减少径流对土壤的侵蚀作用来保护水源和土壤;还通过凋落物的分解腐殖化和根系的延伸、分泌和分解,改善土壤结构和孔隙条件,从而提高土壤持水性能。但是鉴于缺少植物根系生物量和分布状况以及土壤化学性质的数据,有关不同年限退耕草地植物根系生物量、分布特征和土壤化学性质与土壤持水性能的变化关系有待进一步研究。

## 4.2 结论

(1) 不同年限退耕草地的生物蓄积量为 1.29~4.31 t/hm<sup>2</sup>,最大持水量为 5.86~18.57 t/hm<sup>2</sup>,最大拦蓄量为 5.57~16.84 t/hm<sup>2</sup>,有效拦蓄量为 4.69~13.42 t/hm<sup>2</sup>,且凋落物蓄积量、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量均表现出: 15 a > 20 a > 10 a > 5 a。凋落物层持水量与浸水时间呈对数关系;吸水速率与

浸水时间呈幂函数关系。随着退耕年限的延长,草地凋落物持水性能逐渐得到改善并趋于稳定。

(2) 退耕草地砂粒含量和容重随着退耕年限的延长均呈现出先下降再上升的趋势;粉粒、黏粒、总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量和毛管持水量的变化规律与土壤容重相反;总体来看,在退耕 10 a 时能最大程度改良土壤容重及孔隙结构,提高土壤的持水性能,在退耕 10 a 之后逐渐趋于稳定。

(3) 不同年限退耕草地凋落物层和土壤层的持水总量为 1 943.36~2 290.36 t/hm<sup>2</sup>,大小依次为: 10 a > 20 a > 15 a > 5 a > CK,土壤层在草地持水功能中的比例最大,占到草地持水总量的 99% 以上。而凋落物层虽持水较少,但其对土壤结构的改善和减少地表径流等有着重要意义。退耕草地不仅增加了凋落物层的生物积累、拦截降雨作用,还在改善土壤结构和孔隙状况的同时,提高了土壤持水性能。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李士美,谢高地.草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性[J].中国草地学报,2015,37(2):88-93.
- [2] 程汉亭,李勤奋,王晓敏,等.不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):110-116.
- [3] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [4] 王德炉,朱守谦,黄宝龙.贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2003,27(3):26-30.
- [5] 段亚锋,王克林,冯达,等.典型喀斯特小流域土壤有机碳和全氮空间格局变化及其对退耕还林还草的响应[J].生

- 态学报,2018,38(5):1560-1568.
- [6] Brevik E C, Cerdà A, Mataix-Solera J, et al. The interdisciplinary nature of soil [J]. *Soil*, 2015,1(1):117-129.
- [7] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].*土壤学报*,2010,47(4):611-620.
- [8] Ilek A, Kucza J, Szostek M. The effect of stand species composition on water storage capacity of the organic layers of forest soils [J]. *European Journal of Forest Research*, 2015,134(1):187-197.
- [9] Li Xiliang, Hou Xiangyang, Liu Zhiying, et al. Long-term overgrazing-induced changes in topsoil water-retaining capacity in a typical steppe [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2017,70(3):324-330.
- [10] 王涛.大山包不同退耕年限湿地土壤理化性质研究[D].云南昆明:云南师范大学,2015.
- [11] 刘效东,乔玉娜,周国逸,等.鼎湖山3种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J].*林业科学*,2013,49(9):8-15.
- [12] 张永旺,王俊,屈亚潭等.黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价[J].*灌溉排水学报*,2020,39(6):79-85,114.
- [13] 易湘生,李国胜,尹衍雨,等.黄河源区草地退化对土壤持水性影响的初步研究[J].*自然资源学报*,2012,27(10):1708-1719.
- [14] 王普昶,王志伟,丁磊磊,等.贵州喀斯特人工草地土壤水分空间异质性及对放牧强度的响应[J].*水土保持学报*,2016,30(3):291-296.
- [15] Tu Zhihua, Chen Suyi, Ruan Dongshuo, et al. Differential hydrological properties of forest litter layers in artificial afforestation of eroded areas of latosol in China [J]. *Sustainability*, 2022,14(22):14869.
- [16] 简永旗,吴家森,盛卫星,等.间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J].*浙江农林大学学报*,2021,38(2):320-328.
- [17] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J].*生态学报*,2019,39(7):2416-2425.
- [18] Wang Dong, Liu Chun, Yang Yongsheng, et al. Clipping decreases plant cover, litter mass, and water infiltration rate in soil across six plant community sites in a semiarid grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,861:160692.
- [19] 吕宸,龚伟,车明轩,等.海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(6):219-225.
- [20] Xie Jingjie, Su Derong. Water-holding characteristics of litter in meadow steppes with different years of fencing in inner Mongolia, China [J]. *Water*, 2020,12(9):2374.
- [21] 程唱,贺康宁,俞国峰,等.干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究[J].*生态学报*,2021,41(5):1979-1990.
- [22] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].*水土保持学报*,2020,34(3):267-273.
- [23] 闫雷,喇乐鹏,董天浩,等.耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J].*农业工程学报*,2021,37(1):125-132.
- [24] 何露露,强薇,张燕等.川西亚高山针叶林次生演替对土壤持水量的影响[J].*应用与环境生物学报*,2021,27(03):639-647.
- [25] 王金悦,邓羽松,林立文,等.南亚热带5种典型人工林凋落物水文效应[J].*水土保持学报*,2020,34(5):169-175.
- [26] Zagyvai-Kiss K A, Kalicz P, Szilágyi J, et al. On the specific water holding capacity of litter for three forest ecosystems in the eastern foothills of the Alps [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,278:107656.
- [27] Zhou Qiuwen, Keith D M, Zhou Xu, et al. Comparing the water-holding characteristics of broadleaved, coniferous, and mixed forest litter layers in a karst region [J]. *Mountain Research and Development*, 2018,38(3):220-229.
- [28] 何洪盛,田青,王理德,等.青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J].*干旱区研究*,2021,38(1):223-232.
- [29] 宿婷婷,马红彬,周瑶,等.黄土丘陵典型草原土壤理化性质对生态恢复措施的响应[J].*草业学报*,2019,28(4):34-46.
- [30] 孙永磊,周金星,庞丹波,等.喀斯特断陷盆地不同植被恢复模式土壤水分动态变化[J].*林业科学研究*,2018,31(4):104-112.
- [31] 李静,周正朝,张强,等.黄土区不同退耕年限草地土壤分离速率及其理化性质[J].*干旱区研究*,2017,34(3):504-510.
- [32] 王理德,田青,郭春秀,等.不同退耕年限干旱绿洲植被群落及灰棕漠土特性变化[J].*土壤学报*,2021,58(6):1436-1447.
- [33] 马志林,周心澄,史常青.高寒山区退耕还林不同年限土壤理化性质研究:以青海省大通县为例[J].*林业资源管理*,2008(3):72-76.
- [34] 柴晓虹,王理德,姚拓,等.石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤理化及生物学特性研究[J].*草业学报*,2015,24(8):24-34.
- [35] Mei Xuemei, Ma Lan, Zhu Qingke, et al. Responses of soil moisture to vegetation restoration type and slope length on the loess hillslope [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(3):548-562.
- [36] 赵军,陈建伟,吕刚.白石砬子自然保护区主要森林类型土壤水源涵养功能研究[J].*安徽农业科学*,2009,37(33):16619-16621.