

工程堆积体上不同植被类型枯落物和土壤水文效应

丁鹏玮^{1,2}, 戴全厚^{1,2}, 姚一文^{1,2}, 高儒学^{1,2}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 为探讨工程堆积体不同植被类型的枯落物特征、枯落物持水及拦蓄能力、土壤物理性状和土壤涵水性能, 采用室内浸水法和环刀法分别对工程堆积体植被与原生植被的枯落物及 0—20 cm 土层的持水能力进行研究。结果表明: (1) 不同植被类型枯落物厚度及蓄积量均存在显著差异 ($P < 0.05$), 原生乔木林、乔木林、灌木林、草地枯落物厚度依次为 3.76, 2.89, 2.67, 1.23 cm, 蓄积量分别为 5.95, 3.86, 3.19, 0.65 t/hm²。枯落物未分解层厚度、蓄积量均大于半分解层。(2) 各植被类型土壤容重与毛管孔隙度范围分别在 1.19~1.25 g/cm³ 和 41.58%~46.13%, 原生乔木林土壤容重小于乔木林, 而土壤毛管孔隙度大于乔木林。堆积体各植被类型土壤毛管孔隙度大小依次为草地 > 灌木林 > 乔木林。(3) 各植被类型土壤最大持水量及毛管持水量均存在显著差异 ($P < 0.05$), 土壤最大持水量与毛管持水量范围分别为 44.31~46.23, 34.07~37.98 g/cm³, 均呈现原生乔木林最高, 乔木林最低。(4) 枯落物持水量随时间呈对数关系, 吸水速率随时间呈幂函数关系, 其吸水速率在 0.5 h 最高, 在 4.0 h 下降, 12 h 最大持水量达饱和, 吸水速率接近于 0。(5) 原生乔木林枯落物最大持水率、有效拦蓄率均大于乔木林, 工程堆积体各植被类型最大持水率及有效拦蓄率表现为草地 > 灌木林 > 乔木林。从堆积体枯落物和土壤持水能力角度来看, 草灌混交这一搭配模式可以作为工程堆积体的先锋植被, 用于在堆积体初期构建稳定群落生态结构。研究结果可为工程堆积体开展水土保持治理措施和植被恢复提供理论依据。

关键词: 工程堆积体; 枯落物; 持水特性; 植被类型; 土壤物理性质

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0135-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.019

Hydrological Effects of Litter and Soil of Different Vegetation Types on Engineering Accumulation

DING Pengwei^{1,2}, DAI Quanhou^{1,2}, YAO Yiwen^{1,2}, GAO Ruxue^{1,2}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025;

2. Soil Erosion and Ecological Restoration Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to explore the litter characteristics of different vegetation types in the engineering accumulation, the water holding capacity and retention capacity of the engineering accumulation vegetation, litter of the native vegetation and 0—20 cm soil layer were studied by indoor immersion method and cutting ring method respectively. The results showed that: (1) There were significant differences in litter's thickness and volume among different vegetation types ($P < 0.05$). The litter's thickness of primary arbor forests, arbor forests, shrub forests, and grassland were 3.76, 2.89, 2.67, 1.23 cm, and the litter's volume amount were 5.95, 3.86, 3.19, 0.65 t/hm². The thickness and volume of the undecomposed layer were larger than that of semi-decomposed layer. (2) The soil bulk density and capillary porosity of different vegetation types ranged from 1.19 g/cm³ to 1.25 g/cm³ and 41.58% to 46.13% respectively. The soil bulk density of the primary arbor forests was lower than that of arbor forests, while the soil capillary porosity was higher than that of arbor forests. The order of soil capillary porosity of different vegetation types in the accumulation body was grassland, shrubs forests, and arbor forests. (3) The maximum soil water holding capacity and capillary water holding capacity of different vegetation types were significant different ($P < 0.05$). The maximum soil

收稿日期: 2021-01-21

资助项目: 贵州省高层次人才项目[黔科合平台人才[2018]5641]; 中国博士后科学基金项目(2020M673296); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788); 贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007)

第一作者: 丁鹏玮(1997—), 男, 硕士, 主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail: 2858020224@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

water holding capacity and capillary water holding capacity ranged from 44.31 to 46.23 and 34.07 to 37.98 g/cm³, and the primary arbor forest was the highest and the arbor forest was the lowest. (4) The water holding capacity of litter showed logarithmic relationship with time. The water absorption rate was the highest at 0.5 h, and decreased at 4.0 h. The maximum water holding capacity reached saturation at 12 h, and the water absorption rate was close to 0. (5) The maximum water holding rate and effective interception rate of the primary arbor forests litter were higher than those of the arbor forests. The maximum water holding rate and effective interception rate of each vegetation type of the engineering accumulation body were grassland>shrub forests>arbor forests. From the perspective of litter and soil water holding capacity, the combination made of grass and shrub can be used as a pioneer vegetation for the construction of stable community ecological structure at the initial stage of the accumulation. The research results can provide a theoretical basis for the soil and water conservation measures and vegetation restoration.

Keywords: engineering accumulation; litter; water-holding characteristics; vegetation type; soil physical properties

工程堆积体是交通、工矿和水利工程等生产建设项目中产生的弃土弃渣堆积物^[1]。工程堆积体不仅扰动原生下垫面,而且破坏土壤结构,其植被恢复难度大,恢复程度低且恢复年限长^[2]。工程堆积体结构松散、物质组成复杂,颗粒间黏结性差,土壤保肥保水性极差,造成原地地貌—地下水文特征发生变化,同时,其产生的水土流失量远超过原地貌单元^[3]。有研究^[4]表明,工程堆积体入渗速率随时间分别呈快速减弱、缓慢减弱、稳定入渗 3 个变化阶段。在入渗过程中,坡面入渗量、入渗系数随产流量、坡度的增加而减少,且入渗过程不稳定。工程堆积体土壤持水能力由土壤渗透特性、物理性质共同决定,其中不同植被类型的土壤渗透特性、物理性质对工程堆积体坡面持水特性具有显著影响^[5],如刘志鹏等^[6]研究了抚顺复垦矿场不同植被类型的土壤持水能力及入渗特性并发现,工程堆积体的持水能力与毛管孔隙度、入渗性能呈正相关关系,与容重呈负相关关系;吕钊^[7]分析了弃渣场植被恢复特征并发现,工程堆积体上植被恢复可以明显降低土壤容重,且恢复时间越久,土壤容重改善效果越显著。植物措施通常被认为是防治工程堆积体土壤侵蚀的最根本措施,地表枯落物作为植物措施的重要一环,在拦截降雨的同时,还增加地表粗糙度,从而延阻地表径流,极大程度地保护土壤结构,其对减少水土流失有着直接的作用。同时枯落物层具有强大的吸水、透水能力,大量的枯落物可以有效避免降雨对土壤表层的溅蚀,并减弱地表径流发生的水蚀,其在水文生态循环及水土保持效益方面具有极其重要的作用。以往关于堆积体的研究主要集中在枯落物层水文特征^[8]、土壤入渗性能^[9]、持水能力^[10]、饱和导水率^[11]、工程堆积体植被恢复效益评价^[7]等方面,如张耿杰^[12]揭示了植被可以有效改善堆积体土壤容重、孔隙度、团聚体含量等土壤物理性

质;闫浩等^[13]通过枯落物持水性能的研究指出,根据特定的覆土厚度选择适宜的植被类型,优先选择草地作为煤矿排土场恢复植被。

目前国内关于枯落物水文效应的研究主要集中在不同林分类型的枯落物持水特性^[14]、土壤涵养水源能力^[15]等方面,而对于工程堆积体这一特殊对象,针对其不同植被类型枯落物持水特性与土壤持水性能的研究偏少。本文以工程堆积体不同植被类型枯落物厚度及蓄积量、枯落物持水及蓄水能力、土壤物理性状和土壤持水性能 4 个生态恢复指标,对堆积体、原地貌不同植被类型的枯落物特征与土壤物理性质进行定量对比研究,以为工程堆积体土地复垦、植被恢复及生境改善提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于贵州省贵阳市云岩区金惠街道贵昆高铁旁的杨惠村(26°34′50″—26°35′13″N,106°35′41″—106°35′56″E),属亚热带湿润季风气候,年均气温达 15.5℃,年均降水量约 1 085.5 mm,全年中 5—10 月为雨季,约占全年降水量 78.3%,日照时间约 1 062.0 h,≥10℃的年积温 4 900~5 200℃,无霜期达 270 天。该区属于贵州高原中部典型的低中山丘陵区,海拔 800~1 300 m,属中亚热带常绿阔叶林带,侵蚀类型以浅切剥蚀型岩溶分布为主。

通过对贵阳市花溪区、云岩区、乌当区等各区及周边由线性工程项目产生的堆积体开展详细调查,其堆积年限均不超过 10 年,坡度大体分布在 30°~45°,土石混合比为 25%~40%。因此,本研究以在工程堆积体上生长的 3 种不同类型植被(乔木林、灌木林、草地)为研究对象,以工程堆积体周围原乔木林为对照,探究工程堆积体不同植被类型枯落物及土壤水文

效应。该堆积体的面积约 11 364.83 m²,土壤类型为第四纪红色黏土发育而成的黄壤。剖面类型以坡面为主,堆积方式为依坡倾倒型,植被恢复模式为自然

恢复,恢复时间大约有 9~10 年的时间,工程堆积体周围原生乔木林主要以马尾松为主。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本情况

植被类型	地理位置	海拔/ m	郁闭度/ %	平均 树高/m	平均 胸径/cm	石砾 含量/%	坡度/ (°)	坡向	坡长/ m	主要植被
草地	26°34'53.69"N 106°35'46.39"E	1297.01	64	0.7	—	37.53	32.0	北坡	14.8	白车轴草、野艾蒿、黑麦草、狗尾草、草木犀、苘草
灌木林	26°34'50.45"N 106°35'49.01"E	1294.10	75	2.3	1.1	33.72	33.0	北坡	15.0	马桑、苦参、锈毛莓、狗尾草、白车轴草、红端木
乔木林	26°34'55.74"N 106°35'56.35"E	1282.49	88	10.0	6.7	31.41	34.5	北坡	19.5	乌柏、刺槐、白车轴草、锈毛莓、杨树、三球悬铃木、马桑、榉树
原乔木林	26°35'12.91"N 106°35'40.84"E	1252.06	92	23.0	22.0	28.40	24.0	南坡	20.0	马尾松

注:白车轴草(*Trifolium repens*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、草木犀(*Melilotus officinalis*)、苘草(*Arthraxon hispidus*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、苦参(*Sophora flavescens*)、锈毛莓(*Rubus reflexus*)、红端木(*Swida alba*)、乌柏(*Sapium sebiferum*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、杨树(*Populus L.*)、三球悬铃木(*Platanus orientalis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、榉树(*Zelkova serrata*)。

1.2 试验设计

研究于 2020 年 7 月进行野外样品采集,在工程堆积体坡面的乔木林样地设置 20 m×20 m 的样方 3 个,记录样方内出现的植物种名、株数、树高和冠幅等数据,在每个样方内随机收集 5 个 1 m² 的表层枯落物,共 15 个。由于工程堆积体坡面植被较为稀疏,其灌木林样方设置进行适当扩大,灌木林设置 10 m×10 m 的样方 12 个,记录样方内灌木林的种名、株数或丛数、高度、盖度等,并在每个样方内随机取 3 个 1 m² 的表层枯落物,共 36 个;草地设置 5 m×5 m 的样方 15 个,记录样方内草本的种名、株数或丛数、高度、盖度等,并在每个样方内随机收集 3 个 1 m² 的表层枯落物,共 45 个。对每种植被类型下的枯落物未分解层、半分解层分别用网袋进行采样收集以及厚度、质量的测量并密封做好标记,以取其平均值。去除每个堆积体样方表层的枯落物后,使用 200 cm³ 环刀分别在 0—5,5—10,10—15 cm 的土层内随机取原状土 3 个,共计得到 288 个土壤样品,标记后带回实验室称重,用于测定土壤的容重、持水能力等参数。

1.3 测定方法

用恒温烘干箱(80 °C)将枯落物样品烘干至恒重并称量,求其单位面积的干重得到枯落物的蓄积量。使用固定时间浸泡法对枯落物持水量及吸水速率进行测量,每隔 0.08 (5 min),0.17 (10 min),0.25,1,1.5,2.5,4.5,12,24 h 将浸泡的枯落物取出静置至质量稳定状态并测量其重量,记录枯落物持水过程,计算各浸水时间内的枯落物持水量及吸水速率。枯落物最大拦蓄量即枯落物发挥最大拦蓄能力,但在实际

野外降雨过程中,受到重力、坡度等方面影响,实际拦蓄量仅为最大拦蓄量的 0.85 倍^[16],即为有效拦蓄量,各计算公式为:

$$R_0 = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_0)} \times 100\%$$

$$R_{\max} = \frac{M_2 - M_0}{M_0} \times 100\%$$

$$M_{\max} = R_{\max} \times S$$

$$V = \frac{M_n}{t}$$

式中: R_0 为自然含水率(%); R_{\max} 为最大含水率(%); M_{\max} 为最大含水量(t/hm²); M_0 为枯落物干重(g); M_1 为枯落物鲜重(g); M_2 为枯落物 24 h 后的浸水重量(g); S 为枯落物蓄积量(t/hm²); V 和 M_n 分别为浸水 n 时吸水速率(g/h)及持水量(g); t 为枯落物浸水时间(h)。

$$MS_{\max} = (R_{\max} - R_0) \times S$$

$$RS_{\max} = \frac{MS_{\max}}{S}$$

$$M_e = (0.85R_{\max} - R_0) \times S$$

$$R_e = \frac{M_e}{S}$$

式中: MS_{\max} 为枯落物最大拦蓄量(t/hm²); RS_{\max} 为枯落物最大拦蓄率(%); M_e 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²); R_e 为枯落物有效拦蓄率(%)。

土壤容重及持水量采用环刀法测定,将土样浸水 12 h 后称重并计算出土壤最大持水量(%),静置 2 h 后称重并计算出毛管持水量(%),静置 24 h 后称重并计算出最小持水量(%)。土壤最大持水量与毛管

持水量的差值再和土壤容重的乘积为非毛管孔隙度(%)，土壤毛管持水量与土壤容重的乘积为毛管孔隙度(%)，总孔隙度(%)为非毛管孔隙度与毛管孔隙度的总和。

运用 SPSS 20.0 软件对多重比较数据使用最小显著性差异法比较分析(LSD)，最后用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2018 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤持水量及孔隙度变化特征

土壤容重决定土壤透气性的大小，也是间接反映土壤疏松程度的重要因素之一^[9]。由图 1 和图 2 可以看出，草木的土壤容重最大值(1.25 g/cm³)是乔木(1.19 g/cm³)土壤容重最小值的 1.05 倍。孔隙是岩土固体矿物颗粒间的空间，作为水分的主要通道，土壤总孔隙度影响土壤蓄水量的大小。其中毛管孔隙是土壤吸持水、贮藏水的孔道，而非毛管孔隙是土壤水分受重力作用向下渗透的场所^[17]。4 种植被类型土壤总孔隙度差异显著，工程堆积体土壤总孔隙度大小依次为乔木林地(52.38%)、灌木林地(53.39%)、草地(54.09%)，三者均低于原生乔木林地(55.64%)。但毛管孔隙度差异显著($P < 0.05$)，原生乔木林最大(46.13%)，乔木林最小(41.58%)，二者相差超过 5 个百分点，同时非毛管孔隙度也同样差异明显，乔木林最大值(12.4%)分别是草地(11.39%)、灌木林(9.41%)、原乔木林(8.29%)的 1.09, 1.32, 1.50 倍。各植被中自然含水率最大值为原乔木林(32.50%)是草地最小值(24.04%)的 1.35 倍。不同植被类型土壤最大持水量和毛管持水量范围分别为 44.31%~46.23%，34.07%~37.98%，均以原乔木林最高，堆积体上的乔木林最低。而非毛管持水量乔木林最大值(10.20%)是原乔木林最小值(6.58%)的 1.55 倍。

2.2 不同植被类型枯落物厚度、蓄积量变化特征

作为堆积体生态系统中重要组成之一的枯落物，其积累时间与分解速度等因素共同决定枯落物蓄积量的大小。同时，枯落物的厚度也影响堆积体植被涵养水源能力的强弱以及土壤水分下渗速度的大小^[18]。从表 2 可以看出，枯落物平均厚度最小的植被类型为草地(1.23 cm)，最大的为原乔木林(3.76 cm)，

而灌木林(2.67 cm)与乔木林(2.89 cm)差异不显著。4 种植被类型未分解层枯落物的平均厚度均大于半分解层，其中灌木林、乔木林、原乔木林的未分解层远大于半分解层(其中灌木林、乔木林、原乔木林的未分解层显著高于半分解层($P < 0.05$)。此外，4 种植被类型枯落物单位面积蓄积量表现为原乔木林(5.96 t/hm²)>灌木林(3.86 t/hm²)>乔木林(3.19 t/hm²)>草地(0.65 t/hm²)，其中草地的未、半分解层比例(7:3)，灌木林比值与草地相近，乔木林枯落物未、半分解层比例为(1.08:1)，原乔木林枯落物未分解层蓄积量(3.45 t/hm²)是半分解层(2.5 t/hm²)的 1.38 倍。与各植被类型枯落物厚度特点相同的是其未分解层蓄积量均大于半分解层。通过 4 种植被类型枯落物蓄积量与土壤理化性质相关性研究(表 3)发现，各植被类型枯落物蓄积量与土壤容重(0—15 cm)呈显著负相关关系，其中草地枯落物蓄积量与土壤容重呈极显著负相关($P < 0.01$)，而各植被类型枯落物蓄积量分别与土壤总孔隙度、毛管孔隙度呈显著正相关关系，其中原乔木林枯落物蓄积量分别与土壤总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著负相关($P < 0.01$)。

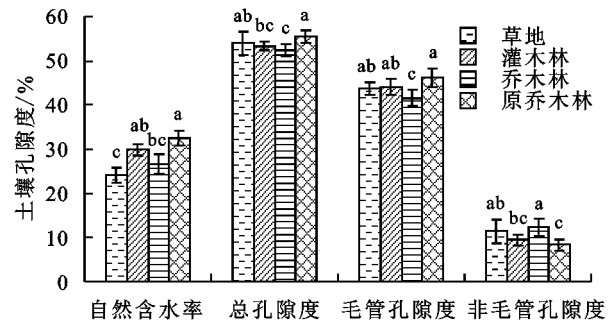


图 1 4 种植被类型土壤孔隙度的比较分析

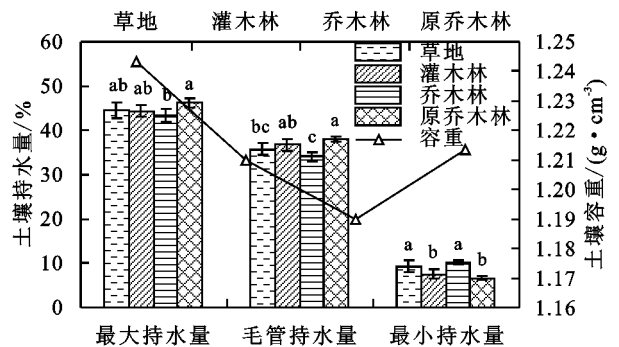


图 2 4 种植被类型土壤持水量的比较分析

表 2 不同植被类型的枯落物厚度与蓄积量

植被类型	枯落物厚度/cm		总厚度/cm	枯落物蓄积量/(t·hm ²)				总蓄积量/(t·hm ⁻²)
	未分解层	半分解层		未分解层	百分比/%	半分解层	百分比/%	
草地	0.86±0.05Da	0.37±0.02Db	1.23	0.45±0.04Da	69.23	0.20±0.01Db	30.77	0.65
灌木林	2.25±0.41Ca	0.42±0.06Cb	2.67	2.20±0.52Bb	68.97	0.99±0.07Cb	31.03	3.19
乔木林	2.38±0.66Ba	0.51±0.01Bb	2.89	2.00±0.27Ca	51.81	1.86±0.62Bb	48.19	3.86
原乔木林	3.04±0.94Aa	0.72±0.08Ab	3.76	3.45±0.73Aa	57.98	2.50±0.37Ab	42.02	5.95

注：表中数据后不同大写字母表示不同植被类型在 0.05 水平上差异显著，不同小写字母表示未、半分解层之间在 0.05 水平上差异显著。

表3 不同植被类型枯落物蓄积量与土壤物理性质相关关系

植被类型	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	平均厚度/cm
草地	-0.89**	0.56*	0.41*	0.44*
灌木林	-0.73*	0.39*	0.52*	0.64**
乔木林	-0.61*	0.30	0.33	0.87**
原乔木林	-0.12	0.63**	0.75**	0.99**

注:*表示显著相关($P < 0.05$);**表示极显著相关($P < 0.01$)。

2.3 浸泡时间对不同植被类型枯落物持水量和吸水速率的影响

2.3.1 枯落物持水量与浸泡时间关系 枯落物持水过程与枯落物蓄积量、干燥程度、结构有关,通过模拟不同植被类型在未、半分解层枯落物对雨水的持水过

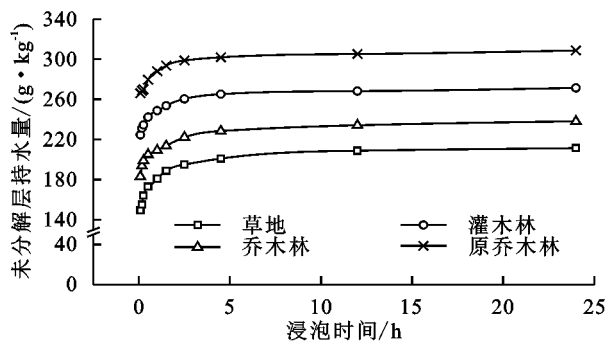


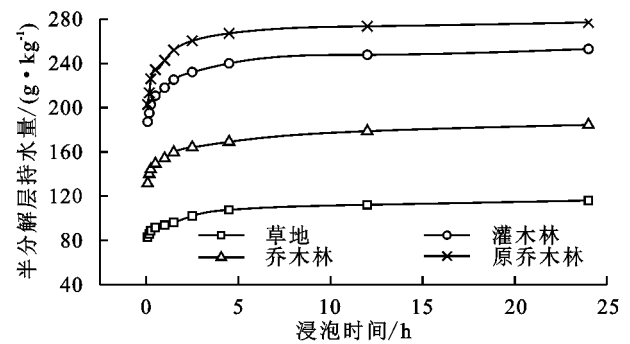
图3 不同植被类型的枯落物持水量与浸泡时间关系

表4 不同植被类型的枯落物持水量与浸泡时间拟合关系

枯落物层	植被类型	拟合关系式	R^2	F
未分解层	草地	$Q = 25.14 \ln(t) + 183.75$	0.96	197.09
	灌木林	$Q = 21.10 \ln(t) + 248.81$	0.90	308.16
	乔木林	$Q = 23.21 \ln(t) + 211.30$	0.94	398.99
	原乔木林	$Q = 18.98 \ln(t) + 286.32$	0.93	109.03
半分解层	草地	$Q = 14.63 \ln(t) + 96.58$	0.94	347.77
	灌木林	$Q = 28.70 \ln(t) + 219.00$	0.97	477.45
	乔木林	$Q = 22.56 \ln(t) + 156.09$	0.93	423.71
	原乔木林	$Q = 31.74 \ln(t) + 242.30$	0.94	294.47

2.3.2 枯落物吸水速率与浸泡时间关系 枯落物的吸水速率是反映枯落物持水能力强弱的重要指标之一,枯落物吸水速率越快,降雨量被枯落物蓄积起来并转化为枯落物持水量越多,从而极大程度减少地表径流发生^[20]。本研究发现,不同时间段、不同植被类型枯落物吸水速率不同,从图4可以看出,浸水0.5 h后,枯落物吸水速率迅速增加并出现第1个转折点,因为枯落物烘干后从极度干燥的状态进水后,在内外水势差的作用下,通过枯落物细胞渗透膜完成渗透。随着枯落物浸水时间的增长,吸水速率急剧下降并在4.0 h出现第2个转折点,吸水速率开始变得缓和。枯落物浸水12 h后吸水速率接近于0,持水量也接近最大饱和持水量。24 h内未分解层枯落物吸水速率表现为原乔木林>灌木林>乔木林≈草地,其中乔木林与草地差异不显著;半分解层枯落物吸水速率

程,可以发掘浸水时间与持水量之间的动态变化关系^[19]。从图3可以看出,4种植被类型未分解层、半分解层枯落物随时间变化的持水过程相似,随浸水时间的增加,各植被类型枯落物持水量均随之增大。在浸泡起始的0~0.5 h过程中持水量显著增加,0.5~8 h过程中持水过程变得缓和,12 h以后逐渐接近持水最大值。相同浸水时间未、半分解层枯落物持水量均表现为原乔木林>灌木林>乔木林>草地。通过对4种植被类型枯落物持水量和浸泡时间进行函数拟合发现,两者呈对数函数关系,拟合系数 R^2 在0.85以上,表明拟合效果好,其表达式为 $Q = k \ln(t) + b$ 。式中: Q 为浸泡 t 时间枯落物的持水量(g/kg); t 为枯落物浸泡时间(h)(表4)。



表现为原乔木林远大于灌木林,乔木林次之,草地最弱。通过对4种植被类型枯落物吸水速率和浸泡时间进行函数拟合发现,二者呈幂函数关系,拟合系数 R^2 在0.85以上,表明拟合效果好,其表达式为: $V = kt^n$ 。式中: v 为浸泡 t 时间枯落物的吸水速率(g/h); t 为枯落物浸泡时间(h)(表5)。

2.4 不同植被类型枯落物蓄水效应

2.4.1 不同植被类型的枯落物持水特征 堆积体植被枯落物持水能力与表层各类型植被盖度、组成及自然恢复年限和枯落物厚度、蓄积量及分解状况有紧密关系^[8]。本研究发现,枯落物最大持水率及最大持水量可以直接反映出枯落物吸水、持水的差异,从表6可以看出,堆积体上的植被枯落物与原生植被枯落物的未、半分解层自然含水率差异显著($P < 0.05$),其中堆积体上各植被类型(乔灌草)枯落物半分解层分别是未分解层的4.98,1.42,2.08倍。包括原乔木林在内,各植被类型枯落物最大持水量均表现为未分解层大于半分解层,其中原生乔木林枯落物总持水量最为显著,达 $14.57 t/hm^2$ 。各植被中,枯落物未分解层最大持水率最高为灌木(414.5%),最低为乔木林(247.18%),吸水量分别是自身重量的1.79,1.11倍;枯落物半分解层最大持水率最高为草地(443.51%),最低为乔木林(239.39%),吸水量分别是自身重量的3.25,1.75倍。

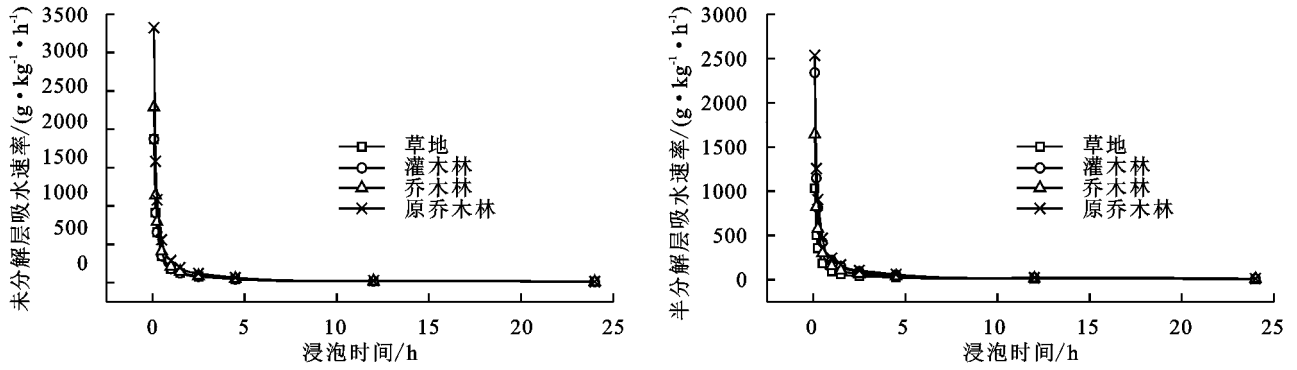


图 4 不同植被类型的枯落物吸水速率与浸泡时间关系

表 5 不同植被类型的枯落物吸水速率与浸泡时间拟合关系

枯落物层	植被类型	拟合关系式	R^2	F
未分解层	草地	$V=9.035t^{-1.321}$	0.870	56.613
	灌木林	$V=27.302t^{-1.521}$	0.928	102.839
	乔木林	$V=14.478t^{-1.553}$	0.883	60.333
	原乔木林	$V=33.133t^{-1.350}$	0.880	58.687
半分解层	草地	$V=2.791t^{-1.488}$	0.906	77.118
	灌木林	$V=23.214t^{-1.465}$	0.944	134.809
	乔木林	$V=8.823t^{-1.587}$	0.948	144.698
	原乔木林	$V=27.033t^{-1.448}$	0.909	79.629

2.4.2 不同植被类型的枯落物拦蓄能力 枯落物最大持水量是理论上达到饱和的一种临界状态,实际中枯落物对降雨截留拦蓄量远达不到最大持水量,约为最大持水率的 85%,对于枯落物层对降雨的实际拦蓄量一般用有效拦蓄量表示^[14]。从表 7 可以看出,原乔木与堆积体各植被类型枯落物拦蓄量均表现为未分解层大于半分解层,其中枯落物未分解层的最大

拦蓄量显著大于半分解层。堆积体上各植被枯落物最大拦蓄量表现为草地(7.66 t/hm²)>灌木林(5.22 t/hm²)>乔木林(4.97 t/hm²),其中堆积体上的乔木林最大拦蓄量小于原生乔木林(5.04 t/hm²),同时各植被枯落物有效拦蓄量与最大拦蓄量变化规律相似。堆积体上各植被枯落物有效拦蓄率表现为草地(670.46%)>灌木林(391.51%)>乔木林(276.80%),其中堆积体上的乔木林有效拦蓄率小于原生乔木林(360.12%),同时各植被枯落物最大拦蓄率与有效拦蓄率变化规律相似。原乔木林与堆积体各植被类型枯落物拦蓄率均表现为未分解层大于半分解层,其中各植被枯落物未分解层最大拦蓄率最高为草地(415.72%),最低为乔木林(246.02%),吸水量分别是自身重量的 1.81,1.10 倍;枯落物半分解层最大持水率最高为草地(380.33%),最低为乔木林(107.56%),吸水量分别是自身重量的 2.78,1.09 倍。

表 6 不同植被类型的枯落物最大持水量与最大持水率

植被类型	自然含水率/%		最大持水量/(t·hm ⁻²)		总持水量/(t·hm ⁻²)	最大持水率/%		总持水率/%
	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层		未分解层	半分解层	
草地	13.38±1.56Db	27.79±2.54Da	1.77±0.24Da	0.89±0.04Db	2.66	393.71±3.69Bb	443.51±1.98Aa	837.22
灌木林	84.59±2.81Ab	120.45±1.57Ba	8.29±0.97Ba	5.34±0.71Bb	13.63	414.50±2.2Aa	287.33±2.59Bb	701.83
乔木林	26.48±1.21Cb	131.82±2.32Aa	6.00±1.07Ca	2.37±0.71Cb	8.37	247.18±3.94Da	239.39±2.72Cb	486.57
原乔木林	64.27±1.67Ba	29.39±1.29Cb	8.53±1.19Aa	6.04±1.91Ab	14.57	272.50±3.29Cb	286.69±3.18Ba	559.19

注:数据后不同大写字母表示不同植被类型在 0.05 水平上显著;不同小写字母表示未、半分解层之间在 0.05 水平上显著。下同。

表 7 不同植被类型的枯落物拦蓄能力

植被类型	枯落物层	最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	最大拦蓄率/%	有效拦蓄率/%
草地	未分解层	5.35±0.19Aa	4.55±0.39Aa	415.72±4.36Aa	349.19±3.99Aa
	半分解层	2.30±0.67Ab	1.86±0.09Ab	380.33±5.70Ab	321.27±2.39Aa
	合计	7.66	6.41	796.05	670.46
灌木林	未分解层	4.51±0.24Ba	3.83±0.97Ba	329.90±4.25Ba	267.73±3.61Ba
	半分解层	0.71±0.17Cb	0.61±0.44Cb	166.87±6.11Cb	123.78±2.20Cb
	合计	5.22	4.44	496.78	391.51
乔木林	未分解层	4.03±0.34Da	3.42±0.51Da	246.02±4.86Da	205.14±3.67Dd
	半分解层	0.94±0.08Bb	0.80±0.16Bb	107.56±2.64Db	71.66±3.10Db
	合计	4.97	4.22	353.58	276.80
原乔木林	未分解层	4.34±0.62Ca	3.74±0.47Ca	257.30±3.93Ca	214.29±2.02Ca
	半分解层	0.70±0.03Db	0.54±0.22Db	182.91±2.26Bb	145.83±2.61Bb
	合计	5.04	4.28	440.21	360.12

3 讨论

3.1 植被类型对土壤持水效应的影响

土壤持水效益主要由土壤物理性状决定,其表层枯落物厚度及蓄积量大小可作为生态恢复的参考指标^[21]。本研究发现,工程堆积体上各植被类型枯落物厚度与蓄积量呈显著正相关(表3),这与相关结论^[22]基本一致。其中枯落物未分解层蓄积量大于半分解层,而其厚度显著大于半分解层(表2),其原因是在枯落物叶片结构、化学成分的影响下,位于上层的未分解层分散程度大且含有树脂等大量不易分解的物质,而位于下层的半分解层与土层接触紧密,在微生物分解作用下,枯落物半分解层分解速率明显小于未分解层,造成其厚度小于未分解层。同时,雨季下的土壤微生物更活跃,枯落物分解程度越大,其未、半分解层厚度比也随之发生变化^[16]。

本研究还发现,枯落物蓄积量越大的植被类型其土壤容重越小,二者呈负相关关系,同时枯落物蓄积量还与土壤总孔隙度呈正相关关系(表3)。探究其原因,在枯落物分解的过程中,随着蓄积量的增大,其改善土壤质量、增加土壤孔隙度的作用更显著。胡建朋等^[17]研究结果不仅与本研究有一致的结论,而且还发现未分解层枯落物蓄积量与土壤有机质质量分数也显著正相关。本研究通过对堆积体上乔木林地与原生乔木林地对比发现,前者土壤容重较大,土壤透气性较差,毛管孔隙度较小,土壤保水性较差,主要是由于堆积体土石等其他物质组成成分复杂且极度离散、不均匀且在堆积过程中分层压实,与自然发育土层有所差异,同时在人为活动及降雨冲刷的影响下,其土壤与自然沉降后的土壤相比较为紧实,土层固结率高,土表易形成大量土壤结皮。因此,工程堆积体自身土壤结构组成对土壤水分的迁移—贮存过程具有较大影响。

刘西刚等^[23]研究表明,各植被类型土壤总孔隙度表现为草、灌大于乔木。本试验通过对堆积体不同植被类型土壤总孔隙度的研究,一方面也得出一致的结果,其原因是在自然沉降的过程中,草、灌植被所生长的浅层土壤较为松散,而乔木所生长的深层土壤疏松程度相对较弱;但另一方面,各植被类型土壤孔隙度大小差异不显著,主要是由于堆积体特殊的立体三维结构所致^[24]。灌木土壤的吸持能力(毛管孔隙度)与滞留能力(非毛管孔隙)相对其他植被类型更佳,表明堆积体上灌木的土壤持水效果更好,更有利于植被恢复生长,进而改善水文生态环境^[25]。对土石堆积体各植被类型下土壤持水特性研究(图2)发现,灌、草植被根系能够有效改善浅层土壤结构及其疏松程度,降低浅层土壤密度,增大浅层土壤孔隙,从而改善

土壤物理性质,增加土壤养分含量并提高养分利用率^[26]。同时草灌混交这一搭配模式可以作为土石工程堆积体先锋植被,用于在堆积体初期构建稳定群落生态结构。各不同堆积体类型,其生态修复障碍因子各不相同,导致各植被类型枯落物持水及土壤涵养水源能力的差异也不尽相同,需要进一步的研究。

3.2 植被类型对枯落物持水效应的影响

枯落物层作为土壤表层的“保护伞”,不仅可以有效截持降水以减小降雨对土壤的直接冲刷,并且还可以抑制土壤水分蒸发,阻延地表径流。同时工程堆积体植被枯落物持水能力不仅与枯落物蓄积量、结构等有关,而且还与其最大持水量及最大持水率有密切关系^[27]。本研究表明,枯落物浸水24 h,各植被类型枯落物未分解层吸水速率显著高于半分解层(图4),与陈琦等^[19]研究结果一致,与齐瑞等^[21]研究结果有所不同,主要是由于枯落物未分解层与半分解层相比,结构更为疏松且间隙较大,从而枯落物未分解层的吸水能力更强。在取样时可以发现,堆积体上植被枯落物未、半分解层及其分解的腐殖质没有明显的分界线,造成枯落物半分解层发生一定程度的腐化,导致其吸水速率较弱。其中枯落物未、半分解层吸水速率均呈现明显的幂函数拟合关系(表5),这与相关研究^[28]结论相似。其原因是在枯落物内外水势压力差的作用下,枯落物初期的吸水速率最为显著,随着吸水量的增加,压力差也在逐渐减小,进而枯落物吸水速率无限接近于0。同时,枯落物的吸水速率还与其自身的物质组成、特性有密切的关系^[29]。与枯落物吸水速率不同的是,枯落物24 h内持水过程呈现对数函数关系式,吸水前期(0~8 h)枯落物持水量显著增加,待持水量达到极度饱和时,在吸水后期(12~24 h)枯落物持水量不再大幅增加,趋于平缓并接近最大持水量。植被之间最大持水量和最大持水率呈现出不同的变化规律,主要是枯落物的结构和生物量大小共同影响着最大持水率,而且枯落物的持水能力还与枯落物分解程度有密切的关系^[8]。枯落物的最大持水量是由枯落物蓄积量、厚度及最大持水率共同决定的,这也是造成原生乔木半分解层枯落物持水量显著大于其他植被枯落物持水量的主要原因。同时,原生乔木林地受人为活动影响较小,其枯落物分解程度较高,使得其枯落物层蓄积量较大,植被枯落物的持水能力较高。

本试验通过不同植被类型枯落物持水特性研究发现,堆积体乔木林地枯落物最大持水率、有效及最大拦蓄率均小于原生乔木林地枯落物(表6、表7),探究其原因:一方面堆积体土壤养分较少且其保水保肥性远不如自然条件下的土壤,植被生长状况也远不如原生植被。堆积体上乔木林地植被郁闭度、树高、胸

径等指标均显著小于原生乔木林地(表 1),其枯落物的蓄积量与持水特性也会随之受到影响;另一方面,植被枯落物持水特性还与枯落物生长旺期、凋落盛期有关;同时处于堆积体阳坡的堆积体,其土壤微生物活动频繁,枯落物的分解程度较高^[18]。堆积体各植被类型之间枯落物最大持水率、有效及最大拦蓄率有显著差异,且草灌大于乔木,主要是由于对研究区内堆积体优势树种进行调查发现,以禾本科、豆科植物构成的草地,其叶表面积明显大于以刺槐和马尾松组成的乔木林地;同时,由于空间异质性,堆积体乔木林地土壤毛管孔隙度、容重等土壤物理性状较差,使其枝叶生长发育不佳,造成枯落物吸水、持水效果差^[28]。有关枯落物持水特性与土壤物理性状是否有直接关系,还需要进一步的研究。

4 结论

(1)各植被类型枯落物层平均厚度与蓄积量呈正相关。枯落物未分解层蓄积量大于半分解层,厚度大于半分解层。枯落物平均厚度与蓄积量均以原乔木林最高,草地最低。

(2)各植被类型枯落物蓄积量与其土壤容重呈显著负相关关系,与毛管孔隙度呈显著正相关关系。原乔木林土壤容重小于乔木林,而土壤毛管孔隙度大于乔木林。堆积体各植被类型土壤毛管孔隙度大小依次为草地、灌木林和乔木林。

(3)综合比较分析堆积体各植被类型土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度大小,灌木最为显著。各植被类型土壤最大持水量及毛管持水量均存在显著差异($P < 0.05$),均呈现原乔木林最高,乔木林最低。

(4)各植被类型枯落物持水量、吸水速率与时间分别呈对数函数($Q = k \log(t) + b, R^2 > 0.85$)、幂函数($V = kt^n, R^2 > 0.85$)关系,枯落物吸水速率在 0.5 h 最高,在 4.0 h 下降,12 h 最大持水量达饱和,吸水速率接近于 0。各植被类型枯落物未分解层吸水速率高于半分解层。

(5)原乔木枯落物最大持水率、有效拦蓄率均大于乔木,工程堆积体各植被类型最大持水率及有效拦蓄率表现为草地 > 灌木林 > 乔木林。综上所述,工程堆积体上灌草植被类型土壤蓄水能力、枯落物持水能力较显著,灌草混交这一搭配模式可以作为土石工程堆积体先锋植被,用于在堆积体初期构建稳定群落生态结构。

参考文献:

[1] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17):152-161.

[2] 赵暄.生产建设项目弃土堆置体下垫面概化与水土流失特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[3] 聂慧莹,王文龙,郭明明,等.降雨条件下两种土壤类型工程堆积体坡面水沙关系与侵蚀动力特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3141-3153.

[4] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等.重庆市典型工程堆积体边坡物理力学变化及稳定性特征[J].水土保持学报,2017,31(1):109-115.

[5] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.城镇化人为扰动下垫面类型影响水源涵养功能的评价[J].农业工程学报,2017,33(22):92-102.

[6] 刘志鹏,蒋光毅,史东梅,等.工程堆积体入渗特性及持水能力对降雨条件的响应[J].水土保持学报,2016,30(5):240-245,271.

[7] 吕钊.宁北风蚀区生产建设项目弃渣场植被恢复研究[D].北京:北京林业大学,2013.

[8] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.

[9] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.

[10] 隋聚艳,王建文.黄土丘陵区 3 种典型林地土壤持水能力研究[J/OL].人民黄河:1-6[2021-03-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1128.TV.20200621.1709.004.html>.

[11] 杨震,黄萱,余冬立.晋西北黄土丘陵区土壤饱和导水率的空间分布特征及影响因素[J].水土保持学报,2020,34(6):178-184.

[12] 张耿杰.矿区复垦土地质量监测与评价研究[D].北京:中国地质大学,2013.

[13] 闫浩,孙世国,金松丽,等.布沼坝露天矿生态复垦工程[J].煤矿安全,2013,44(1):150-152.

[14] 敖特根其木格,秦富仓,周佳宁,等.内蒙古自治区多伦县不同林地枯落物持水性能研究[J].水土保持通报,2017,37(4):114-118.

[15] 朱志俊.两种类型地被物覆盖下地被物层与土壤层水文动态过程研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[16] Qi F, Zhang R H, Liu X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu Mountainous region[J]. Soil and Tillage Research,2018,184:45-51.

[17] 胡建朋,杨吉华,罗明达,等.山东砂石山区不同林分类型土壤的蓄水效益[J].中国水土保持科学,2011,9(9):67-72.

[18] 周祥,赵一鹤,张洪江,等.云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J].生态环境学报,2011,20(2):248-252.

[19] 陈琦,刘苑秋,刘士余,等.杉木取代阔叶林后林下水源涵养功能差异评价[J].水土保持学报,2019,33(2):244-250.

[20] 沈盈佳,曾建军.保山北庙水库集水区 5 种森林类型枯落物持水特性研究[J].长江科学院院报,2015,32(1):43-48.

- drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1:14-27.
- [19] Cao S X. Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42 (6): 1826-1831.
- [20] Yan E P, Wang G X, Lin H, et al. Phenology-based classification of vegetation cover types in Northeast China using MODIS NDVI and EVI time series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36 (2): 489-512.
- [21] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J]. *地理学报*, 2001, 56(6): 667-672.
- [22] Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 261-270.
- [23] Gurung R B, Breidt F J, Dutin A, et al. Predicting Enhanced Vegetation Index (EVI) curves for ecosystem modeling applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2186-2193.
- [24] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2431-2436.
- [25] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [26] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [27] 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 179-185.
- [28] Shi S Y, Yu J J, Wang F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau [J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2020, 755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142419>.
- [29] Hu Y G, Li H, Wu D, et al. LAI-indicated vegetation dynamic in ecologically fragile region: A case study in the Three-North Shelter Forest program region of China [J/OL]. *Ecological Indicators*, 2021, 120. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106932>.
- [30] 杜加强, 赵晨曦, 贾尔恒·阿哈提, 等. 近 30 a 新疆月 NDVI 动态变化及其驱动因子分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 172-181.
- [31] 田海静. 非气候因素引起的中国植被变化遥感诊断 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [32] Zhu Z C, Bi J, Pan Y Z, et al. Global data sets of vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 927-948.
- [33] 杨胜天, 刘昌明, 孙睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J]. *地理学报*, 2002, 57(6): 679-684.
- [34] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [35] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 等. 三江源 1982—2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应[J]. *草业科学*, 2017, 34(10): 1977-1990.
- (上接第 142 页)
- [21] 齐瑞, 杨永红, 陈宁, 等. 白龙江上游 5 种典型灌木林枯落物蓄积量及持水特性[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 123-127.
- [22] 庞梦丽, 朱辰光, 翟博超, 等. 河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 51-56.
- [23] 刘西刚, 王勇辉, 焦黎. 夏尔希里自然保护区典型植被土壤水源涵养功能探究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 121-128.
- [24] 高儒学, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 1-8, 39.
- [25] Wang J P, Zhuang P Z, Luan J Y, et al. Estimation of unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from particle size parameters [J/OL]. *Water*, 2019, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091826>.
- [26] 牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 等. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 134-143.
- [27] 李叶鑫, 吕刚, 刁立夫, 等. 露天煤矿排土场不同植被类型持水能力评价[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 309-314, 320.
- [28] 罗佳, 田育新, 周小玲, 等. 湘西北小流域不同植被类型枯落物层持水特性研究[J]. *湖南林业科技*, 2018(45): 1-6.
- [29] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土丘陵区典型植被枯落物持水性能空间变化特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 225-230.