

枯落物敷盖对红壤坡地土壤水分特性的影响

聂小飞^{1,2,3}, 郑海金^{1,2}, 左继超^{1,2}, 李贲璟^{1,2}, 王凌云^{1,2}, 廖凯涛^{1,2}

(1. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029;

2. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029; 3. 水利部鄱阳湖水资源水生态环境研究中心, 南昌 330029)

摘要: 为探明红壤坡地枯落物敷盖的保水作用及其机理, 在江西省北部德安县第四纪红黏土母质发育的红壤坡地开展定位试验, 以裸露坡地为对照, 研究枯落物敷盖措施实施 15 年后对 0—60 cm 土层土壤的持水性、供水性和水分有效性的影响。结果表明: 赣北红壤坡地的土壤水分持水能力低, 供水能力弱, 有效水含量少, 仅为 9.0%~11.1%; 枯落物敷盖处理的红壤坡地上层(0—30 cm)土壤持水能力高于裸露坡地; 低吸力范围(<100 kPa)枯落物敷盖处理的下层(30—60 cm)土壤供水能力高于裸露坡地。枯落物敷盖能够有效提高红壤坡地土壤(尤其是上层土壤)持水能力, 增强上层土壤在相对湿润状况下的供水性能, 而对土壤水分有效性影响相对较弱。该研究可为优化地表敷盖措施、增加和保持土壤水资源以及合理开发利用南方红壤坡地提供参考。

关键词: 红壤坡地; 枯落物敷盖; 水分特征曲线; 比水容量; 水分有效性

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0085-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.015

Effects of Litter Mulch on Soil Water Properties in Red Soil Sloping-land

NIE Xiaofei^{1,2,3}, ZHENG Haijin^{1,2}, ZUO Jichao^{1,2},

LI Yunjing^{1,2}, WANG Lingyun^{1,2}, LIAO Kaitao^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029;

2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029; 3. Research Center of Water Resources and Ecological Environment of Poyang Lake, The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Nanchang 330029)

Abstract: To explore the effect of litter mulch on preserving soil water and its mechanism in red soil sloping-land, in situ experiments were conducted in sloping-land of red soil derived from Quaternary red clay in De'an County in northern Jiangxi Province, the effects on soil water retention capacity, soil water supplying capability and soil water availability of the 0—60 cm soil layer were studied after the litter mulching measure had been implemented for 15 years, with the bared slope being used as the control. The results showed that soil water retention capacity of red soil in northern Jiangxi Province was low, water supplying capability was weak, and soil water availability was low, i. e. from 9.0% to 11.1%. The water retention capacity of the upper layer of the soil (i. e. the soil within 0—30 cm depth) on the red soil slope with little mulch was higher than that of the bared slope. The water supplying capability of the lower layer of the soil (i. e. the soil within the 30—60 cm depth) of the red soil slope with litter mulch was higher than that of the bared slope when the soil water suction was less than 100 kPa. Litter mulch effectively increased the soil water retention capacity of the red soil, especially for the upper layer, and also enhanced the water supplying capability of the upper layer of the soil under relatively wet conditions, but had relatively weak effects on soil moisture availability. The results of this study can provide guidelines for the optimization of the surface mulching measures of sloping cropland, increasing and maintaining soil water resources, and reasonable exploitation and utilization of red soil slopes in southern China.

Keywords: red soil slopes; litter mulch; soil water characteristic curve; specific water capacity; soil water availability

收稿日期: 2016-07-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401311); 水利部公益性行业科研专项(201501045); 水利部技术示范项目(SF-201623); 水利部鄱阳湖水资源水环境研究中心开放基金项目(ZXKT201503)

第一作者: 聂小飞(1985—), 男, 湖北安陆人, 工程师, 博士, 主要从事土壤水分运移与坡面氮磷流失研究。E-mail: xfnie85@163.com

通信作者: 郑海金(1978—), 女, 江西抚州人, 高级工程师, 博士, 主要从事水土保持与坡地养分循环研究。E-mail: haijinzheng@163.com

土壤水分是植被恢复和农林牧业生产的主要限制因子,其科学高效利用受到人们的普遍关注。深入了解土壤水分特性是分析土壤水分承载力和生产力的重要依据,也是植被快速恢复和农林牧业抗旱工作的重要基础^[1]。土壤水分特征曲线是土壤最重要的水力特性之一,不仅反映了土壤的持水和供水能力,也间接反映出土壤孔隙的分布状况,是模拟土壤水分运动的重要参数,对研究土壤水分的有效性有重要意义^[2-3]。自上世纪 80 年代以来,受水资源短缺的影响,土壤水分—物理性质的研究成为热点问题^[4]。国外学者主要研究了不同水质状况、灌溉条件和作物类型对土壤水分—物理性质的影响,明确了土壤孔隙度、容重、结构、质地及有机质含量是土壤水分特征曲线的主要影响因子,并提出了一系列经验公式来描述土壤水分特征曲线^[5-6]。当前,拟合土壤水分特征曲线的公式主要有:van Genuchten 方程及其修正方程、Brooks-Corey 方程、Gardner 方程等^[2]。其中, van Genuchten 方程无论是对粗质地土壤还是较黏质地的土壤,其拟合效果均较好,应用更广泛^[3]。国内围绕土壤水分特性也开展了一系列研究,包括土壤水分特征曲线拟合模型比较^[2],典型用地类型土壤持水性能^[7-8],植被措施^[9]、植物根系^[10]、土壤机械组成^[3]、土壤容重^[11]和施肥^[12]等对土壤水分特性的影响,且当前土壤水分特征曲线方面的研究多集中在林地、农地和草灌地。

南方红壤丘陵区水热资源较为丰富,但年内分配极不均匀,干湿季节明显交替,加上红壤自身调节水分能力差^[13],往往会导致这一地区植被恢复和农林生产严重受阻。因此,研究红壤坡地土壤水分特性,探索土壤水资源高效利用技术显得尤为重要。目前,南方红壤丘陵区土壤水分—物理性质的研究主要集中在旱坡地和人工林地,如刘祖香等^[14]和姚贤良^[13]研究了典型旱地红壤的水力学特性及其影响因素,黄志刚等^[15]研究了红壤丘陵区杜仲人工林土壤水分分配规律,但针对水土保持措施对土壤水分特性的影响研究鲜有报道。草本植物刈割物敷盖(Litter mulch)是常用的水土保持措施。已有研究表明,枯落物敷盖措施对坡面土壤侵蚀控制效果良好,可有效减少径流泥沙^[16],改善土壤水分状况^[17]。本文以百喜草(*Paspalum notatum*)刈割物为敷盖材料,通过开展对照试验,以土壤水的动力学理论为依据,对红壤坡地枯落物敷盖和裸露处理 0—60 cm 土壤水分特征曲线、土壤比水容量、土壤水分有效性进行系统分析,探究枯落物敷盖对红壤坡地土壤水分特性的影响规律及作用机理,为南方红壤坡地合理开发利用过程中最大限度利用天然降水、增加和保持土壤水资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江西省北部九江市德安县城郊的江西水土保持生态科技园内(115°42′38″—115°43′06″E, 29°16′37″—29°17′40″N),地处我国南方红壤的中心分布区域,具有典型代表意义。该园位于鄱阳湖流域博阳河水系,属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 16.7℃,多年平均潜在蒸发量 1 558 mm,多年平均降水量 1 469 mm,其中 4—8 月份降水约占全年降水量的 60%左右,导致雨季、旱季先后发生水土流失和季节性干旱;年日照时数 1 650~2 100 h,无霜期为 245~260 d;地貌为浅丘岗地,海拔 30~100 m,坡度 5°~25°。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,地带性土壤是由第四纪红黏土母质发育的红壤。

1.2 试验设计

在土层厚度均匀、土壤理化特性较一致、坡度较均一的同一坡面上建立 2 个试验小区,各小区沿坡向方向投影长 15 m,垂直坡向方向宽 5 m,坡度 14°,成土母质为第四纪红黏土。试验设置枯落物敷盖(将刈割的百喜草横向敷盖于地表,厚度约 15 cm,盖度 100%)与裸露对照(地表完全裸露)2 个处理,各处理自 2000 年实施,持续至今已有 15 年。

1.3 样品采集与指标测定

于 2015 年 5 月 22 日(天气晴好)采集土壤样品,采样设置 3 个重复,分别位于各小区的上坡、中坡和下坡,每个坡位按 0—30 cm(后文称“上层”)和 30—60 cm(后文称“下层”)土壤层次分别采集土壤样品。采样时,用土钻分别采集 0—30 cm 和 30—60 cm 新鲜土样,并将相同坡位和土壤层次的土样混合均匀后,采用四分法保留 1 kg 左右土壤样品备用。同时,在各土层中间部位采集环刀样。采用环刀法测定土壤容重和总孔隙度,通过比重计法测定土壤颗粒组成(美国制),采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定土壤有机质含量,采用美国 SEC 公司的压力膜仪分别测定 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 500, 1 000, 1 500 kPa 吸力的土壤质量含水率,根据土壤容重换算其体积含水量,最后绘制土壤体积含水量与吸力关系曲线(即土壤水分特征曲线)。枯落物敷盖和裸露处理试验小区土壤的基本理化性质见表 1。

1.4 数据处理与分析

土壤水分特征曲线用 RETC 软件 van Genuchten 模型拟合^[18],公式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); θ_r 为滞留含水量(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水量(cm^3/cm^3); h 为土壤水吸力(kPa); α 、 n 、 m 为拟合参数,且 $m=1-1/n(n>1)$ 。

表 1 试验土壤基本理化性质

处理	土层深度/ cm	有机质含量/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	总孔 隙度/%	土壤颗粒含量/%		
					粘粒 (<0.002 mm)	粉(砂)粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (0.05~2 mm)
枯落物敷盖	0—30	14.81	1.16	51.29	19.01	60.38	20.61
	30—60	5.57	1.27	48.58	19.06	61.58	19.37
裸露	0—30	11.38	1.19	55.69	12.70	62.23	25.07
	30—60	8.63	1.27	51.25	16.81	62.06	21.13

对 van Genuchten 模型公式(1)两边求导,得到计算土壤比水容量的公式^[19]:

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} = -(\theta_s - \theta_r) m n \alpha^n \frac{h^{n-1}}{[1 + (\alpha h)^n]^{m+1}} \quad (2)$$

式中: $C(h)$ 为土壤比水容量($\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$),其他参数见式(1)。

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计分析,采用 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 枯落物敷盖对红壤坡地土壤持水能力的影响

土壤水分特征曲线表征土壤水吸力与土壤含水量之间的关系,能够很好地反映土壤的持水特性,曲线的高低表征土壤持水能力的大小,即相同吸力下,曲线越高,其持水能力越强,反之持水能力越弱。枯落物敷盖和裸露处理的上、下层土壤的水分特征曲线见图 1。图 1 表明,枯落物敷盖与裸露处理土壤均表现为土壤含水量随土壤水吸力的增加而减少的规律,且均表现为在低吸力段(<100 kPa)较窄范围内水分特征曲线陡直,而在中高吸力段(>100 kPa)较宽区间水分特征曲线趋于平缓,呈现出“快速下降—缓慢下降—基本平稳”的变化趋势,体现了土壤持水能力随土壤水吸力增加而降低的基本规律。究其原因,主要与土壤在不同水吸力范围内的持水机制不同有关。在低吸力范围内,土壤所能持有的水量主要取决于土壤结构,此范围内土壤中赋存大量重力水,随着土壤水吸力增大,土壤中结构性大孔隙所持有的水分被排出,土壤含水量迅速下降;在中高吸力段,土壤所能持有的水量主要决定于粘粒胶体含量,此范围内土壤水为非重力水,土壤颗粒的表面吸附起作用,孔隙水因毛管作用而不易被排出,土壤含水量随吸力增加变化较缓。

枯落物敷盖能够显著增强红壤坡地土壤持水能力,且枯落物敷盖对上层土壤的影响明显高于对下层土壤的影响。图 1 表明,在 0~1 500 kPa 吸力范围内,当吸力相同时,枯落物敷盖处理各土层土壤含水量均高于裸露处理,可知,在同一吸力范围内,枯落物敷盖处理的土壤持水性高于裸露对照。这主要与枯落物敷盖处理对土壤理化性质有较为明显的改良作用有关。具体表现为敷盖的枯落物分解,增加了土壤

有机质含量,增强了微生物和动物滋生繁殖活动,增加了土壤孔隙度,改善了土壤结构,降低了土壤容重,增加了土壤孔隙度(表 1),使其持水能力增大。枯落物敷盖对土壤持水性能具有较强的提升作用,这与谢颂华等^[20]得出的研究结论相一致。持水性能的大小,可以间接反映土壤的抗冲刷能力,持水性能越好,其抗冲刷能力就强,反之亦然^[21]。因此,在南方红壤坡地实施水土保持林草措施时,应注意保留枯落物层和腐殖质层,避免大面积营造单一结构层次的人工纯林而造成林下水土流失。此外,无论是枯落物敷盖还是裸地,上层土壤持水能力均优于下层土壤,该规律与窦建德等^[8]的研究成果相一致。究其原因,这可能与上层土壤较下层土壤有机质含量更高、土壤容重更小、总孔隙度更大(表 1)有关。通常情况下,总孔隙度越大,土壤容重越小,说明土壤发育越好,土壤对水分蓄集和保持的能力越强。有机质是土壤最好的胶结剂,可以改善土壤结构,增加土壤的总孔隙度和毛管孔隙度,降低非毛管孔隙度及土壤容重,提高土壤的导水及持水性能^[11]。

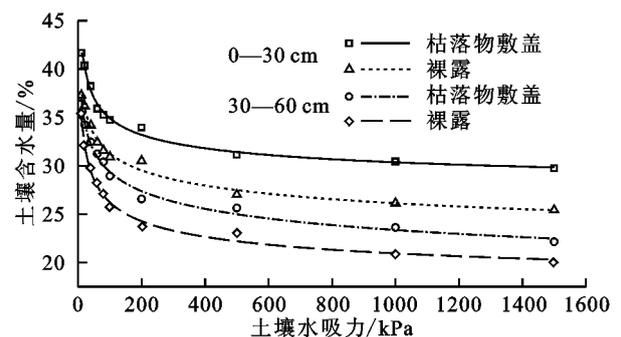


图 1 枯落物敷盖与裸露处理土壤水分特征曲线

2.2 枯落物敷盖对红壤坡地土壤供水能力的影响

采用 van Genuchten 模型,分别针对枯落物敷盖和裸露处理的上、下层土壤的水分特征曲线进行拟合,得到的模型拟合参数及拟合优度见表 2。对于红壤坡地枯落物敷盖和裸露处理土壤各土层,模型的拟合优度 R^2 均高于 0.98,可见 van Genuchten 模型较好地拟合了红壤坡地土壤水分特征曲线。

土壤脱湿时的比水容量反映土壤的释水或供水性能,是评价土壤耐旱性的重要指标。比水容量越大,表明土壤的供水性或耐旱性越好。基于表 2 所列的拟合参数,式(2)得到的枯落物敷盖和裸露处理的

上、下层土壤的比水容量见图 2 所示, 枯落物敷盖与裸露处理土壤均表现为土壤的比水容量随水吸力增加而减小的规律, 但在不同吸力范围内, 比水容量变化幅度有所差异。与土壤水分特征曲线变化规律类似, 枯落物敷盖与裸露处理土壤的比水容量曲线也均

表现为在低吸力段 (<100 kPa) 较窄范围内陡直, 而在中高吸力段 (>100 kPa) 较宽区间趋于平缓, 呈现出“快速下降—缓慢下降—基本平稳”的变化趋势, 体现了土壤供水能力随土壤水吸力增加而减弱的基本规律。

表 2 土壤特征曲线 van Genuchten 模型拟合参数

处理	土层深度/cm	θ_r	θ_s	α	n	m	R^2
枯落物敷盖	0—30	0.273	0.437	0.063	1.402	0.287	0.990
	30—60	0.081	0.435	0.339	1.144	0.126	0.991
裸露	0—30	0.184	0.397	0.083	1.229	0.186	0.988
	30—60	0.182	0.394	0.090	1.538	0.350	0.994

注: θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 、 m 均为拟合参数, R^2 为决定系数。

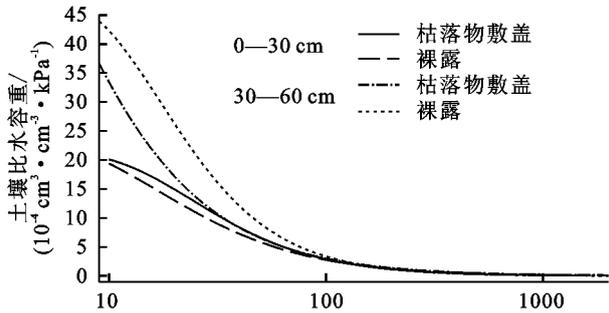


图 2 枯落物敷盖与裸露处理土壤比水容量曲线

枯落物敷盖能够改变红壤坡地土壤供水能力, 且其对上层土壤的影响明显高于对下层土壤的影响。基于图 2 不难看出, 枯落物敷盖对红壤坡地土壤供水能力的影响在不同土层、不同吸力范围内呈现出不同的特征。具体而言, 当水吸力为 10 kPa 时, 枯落物敷盖和裸露处理的上层土壤比水容量分别为 $0.002\ 008$, $0.001\ 937$ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$, 而下层土壤比水容量分别为 $0.003\ 338$, $0.004\ 226$ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$; 当水吸力为 100 kPa 时, 枯落物敷盖和裸露处理的上层土壤比水容量分别为 $0.000\ 287$, $0.000\ 275$ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$, 而下层土壤比水容量分别为 $0.000\ 301$, $0.000\ 335$ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$; 当水吸力为 1 500 kPa 时, 枯落物

敷盖和裸露处理的上层土壤比水容量分别为 $0.000\ 007$, $0.000\ 011$ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$, 而下层土壤比水容量分别为 $0.000\ 014$, $0.000\ 005$ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{kPa})$ 。总而言之, 枯落物敷盖对红壤坡地土壤的供水性能有一定的影响, 但不同吸力段作用效果有所不同。在低吸力范围或土壤相对湿润时, 枯落物敷盖提高了红壤坡地上层土壤的供水能力, 而高吸力范围或土壤相对干燥时, 枯落物敷盖降低了上层土壤的供水能力, 林丽蓉等^[9]在湖北咸宁的红壤坡地也发现了类似规律。可见, 枯落物敷盖对红壤坡地土壤供水能力的增强效果主要作用于上层土壤, 且主要限于土壤水吸力小于 100 kPa 的相对湿润阶段。

2.3 枯落物敷盖对红壤坡地土壤水分有效性的影响

表 3 为红壤坡地枯落物敷盖与裸露处理土壤不同土层的土壤水分常数。试验红壤坡地土壤饱和含水量为 39.4%~43.7%, 低于黄土丘陵区撂荒坡地对应土层的 52.0%~58.1%^[7], 进一步反映出红壤坡地土壤持水能力较差。枯落物敷盖处理土壤的饱和含水量为裸露处理的 1.1 倍, 可见枯落物敷盖能够较好地增强土壤的持水能力。

表 3 试验土壤水分常数

处理	土层深度/cm	饱和含水量 (0 kPa)/%	田间持水量 (30 kPa)/%	毛管断裂含水量 (100 kPa)/%	永久凋萎点 (1500 kPa)/%
枯落物敷盖	0—30	43.7	38.8	34.7	29.8
	30—60	43.5	33.2	28.9	22.1
裸露	0—30	39.7	34.8	30.9	25.4
	30—60	39.4	29.8	25.6	20.0

注: 毛管断裂含水量 (100 kPa) 与永久凋萎点 (1 500 kPa) 采用实测值, 饱和含水量 (0 kPa) 与田间持水量 (30 kPa) 基于表 2 中参数值采用 van Genuchten 模型计算而来。

由于土壤的供水性能随着土壤水吸力的增加呈递减趋势, 当土壤水吸力逐渐增大, 直到土壤可以释出的水量 (即植被可吸收的水量) 极少时, 植被就会因缺水而凋萎, 因此土壤有效水范围内的土壤水分并非等效发挥作用^[22]。由图 1 和表 3 可知, 红壤坡地枯落物敷盖和裸露处理上层土壤 0~100 kPa 吸力段的可释水量明显多于 100~1 500 kPa 吸力段, 各土层

0~100 kPa 吸力段的可释水量分别占总可释水量 (0~1 500 kPa) 的 64.3% 和 61.4%, 说明尽管 0~100 kPa 吸力段范围很窄, 却能释出较多水量, 而 100~1 500 kPa 吸力段范围很宽, 却只能释出较少水量。

为了进一步分析不同类型有效水含量, 基于表 3 计算出的红壤坡地枯落物敷盖和裸露处理土壤不同土层的土壤水分分类及其含量见表 4。从表 3 可知,

枯落物敷盖既增加了饱和含水量、田间持水量,又增加了凋萎含水量,导致表 4 中枯落物敷盖和裸露处理土壤之间土壤水分有效性范围相差不大,表明本研究中枯落物敷盖对土壤水分有效性范围的影响不太明显,枯落物敷盖和裸露处理土壤的土壤水分有效性范围呈现出相似的规律,均表现为无效水较多而有效水相对较少的规律。具体而言,枯落物敷盖和裸露处理各土层深度的土壤达到无效水吸力时的土壤含水量均较高,上层分别为 29.8%和 25.4%,下层则分别为 22.1%和 20.0%,远高于黄土丘陵区撂荒坡地土壤的 8.0%~10.3%^[7]、北京西山地区土壤的 2.9%~

5.6%^[23];枯落物敷盖和裸露处理土壤有效水吸力范围内均持水较少,上层分别为 9.0%和 9.3%,下层分别为 11.1%和 9.9%,仅与锡林格勒草原土壤有效水含量相当^[22],而远低于北京西山地区土壤^[23]。可见,赣北红壤坡地土壤的水分有效性很差,与姚贤良^[13]得出的江西典型旱地红壤保水性差的结论相一致。形成这一不良性状的根源在于土壤本身,由第四纪红黏土发育而来的赣北坡地红壤,有效孔隙度较低,粘粒表面吸附水分和团聚体内所吸持的无效水分占土壤含水量的比重较大,而这部分水分只有在较大吸力范围内才能缓慢释出,导致其有效水含量低^[13]。

表 4 试验土壤水分有效性范围

处理	土层深度/cm	重力水 (0<30 kPa)/%	有效水/%			无效水 (>1500 kPa)/%
			全有效水 (30~1500 kPa)	速效水 (30~300 kPa)	迟效水 (300~1500 kPa)	
枯落物敷盖	0—30	4.9	9.0	6.5	2.5	29.8
	30—60	10.3	11.1	7.0	4.1	22.1
裸露	0—30	4.9	9.3	6.2	3.1	25.4
	30—60	9.6	9.9	8.0	1.8	20.0

3 结论

赣北红壤坡地的土壤持水能力低,供水能力弱,有效水含量少,仅有 9.0%~11.1%。枯落物敷盖能够有效提高红壤坡地土壤持水能力,对红壤坡地土壤的供水性能也有一定影响,而对土壤水分有效性影响相对较弱。枯落物敷盖对红壤坡地上层土壤的持水性能的增强效果强于下层,对供水能力的增强效果则仅在上层土壤有所体现,且主要限于土壤水吸力小于 100 kPa 的土壤相对湿润状态。后期有必要系统研究不同枯落物敷盖强度下土壤容重、质地、有机质含量、孔隙度等土壤理化性质的差异以及不同土壤理化性质组合作用对土壤水分特征的影响,以深入揭示枯落物敷盖对红壤坡地土壤水分特征的影响机理。为了有效应对南方红壤区的季节性干旱问题,农户可以考虑对红壤坡地进行枯落物敷盖处理。

参考文献:

[1] 柳玉龙,施振香,尹骏,等.旱地红壤与红壤性水稻土壤水分特性分析[J].水土保持学报,2009,23(2):232-235.
 [2] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等.鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟[J].土壤学报,2016,53(2):355-364.
 [3] 李卓,冯浩,吴普特,等.砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].水土保持学报,2009,23(3):204-208.
 [4] Raats P A C. Development in soil-water physics since the mid 1960s[J]. Geoderma,2001,100(3):355-387.
 [5] Sciences F, Arabia S. Saline drainage water, irrigation frequency and crop species effects on some physical properties of soils[J]. Journal of Agronomy and Crop Science,2001,186(1):15-20.

[6] Sacco D, Cremon C, Zavattaro L, et al. Seasonal variation of soil physical properties under different water managements in irrigated rice[J]. Soil and Tillage Research, 2012,118(5):22-31.
 [7] 宁婷,郭忠升,李耀林.黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J].水土保持学报,2014,28(3):166-170.
 [8] 窦建德,王绪芳,熊伟,等.宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J].林业科学研究,2006,19(3):301-306.
 [9] 林丽蓉,陈家宙,王峰,等.稻草覆盖对红壤旱坡地水力性质及水分状况的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(2):159-166.
 [10] 马昌臣,王飞,穆兴民,等.小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):105-109.
 [11] 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.
 [12] 王艳玲,刘翠英,徐江兵,等.长期有机无机肥配施条件下的旱地红壤水分特征分析[J].土壤通报,2015(2):334-340.
 [13] 姚贤良.华中丘陵红壤的水分问题:II.旱地红壤的水分状况[J].土壤学报,1998,35(1):16-24.
 [14] 刘祖香,陈效民,靖彦,等.典型旱地红壤水力学特性及其影响因素研究[J].水土保持通报,2013,33(2):21-25.
 [15] 黄志刚,李锋瑞,曹云,等.南方红壤丘陵区杜仲人工林土壤水分动态[J].2006,18(9):1937-1944.
 [16] 程冬兵,张平仓,杨洁.红壤坡地覆盖与敷盖径流调控特征研究[J].长江科学院院报,2012,29(1):31-34.