
试
验
研
究

红壤侵蚀地植被恢复后土壤水分特征及其凋落物碳归还模式

朱丽琴¹, 黄荣珍¹, 李凤¹, 赵薇¹, 翟翠红², 欧阳慧¹

(1. 南昌工程学院 江西省水文水资源与水环境重点实验室, 江西 南昌 330099; 2. 南昌市水务局, 江西 南昌 330004)

摘要: [目的] 研究退化恢复地土壤水分物理性质和凋落物碳归还的关系, 理解不同植被恢复措施的理水调水功能。[方法] 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 研究了南方红壤侵蚀地典型植被恢复模式(柑橘林、封育林、木荷×马尾松林混交林、阔叶林)土壤(0—80 cm 土层)水分特征及其凋落物碳归还。[结果] (1) 不同植被恢复模式土壤含水量随土壤水吸力的增大而减小, 其剖面平均含水量在 15 与 2.5 kPa 水吸力条件下相比, 下降幅度的大小依次为: 柑橘林(45.92%)>封育林(45.10%)>木荷×马尾松林混交林(38.79%)>阔叶林(31.20%); (2) 土壤含水量随土层深度的增加而降低, 各植被恢复模式在不同水吸力条件下底层(60—80 cm)土壤含水量与表层(0—10 cm)的相比, 柑橘林的变化幅度为 30.11%~9.72%, 封育林为 31.81%~24.46%, 木荷×马尾松林混交林为 24.46%~5.49%, 阔叶林为 8.21%~0.24%; 在不同土层或不同水吸力条件下, 阔叶林土壤含水量下降的幅度均最小; (3) 不同模式凋落物碳归还总量大小依次为: 木荷×马尾松林混交林(1 915.79 kg/hm²)>阔叶林(1 414.84 kg/hm²)>封育林(1 212.32 kg/hm²)>柑橘林(633.88 kg/hm²), 阔叶林阔叶碳归还量和饱和含水量均大于木荷×马尾松林混交林, 阔叶碳归还量和饱和含水量表现出更大的一致性。[结论] 阔叶林土壤保水持水性能最佳, 且阔叶碳归还对土壤饱和含水量的影响大于其他组分。

关键词: 植被恢复; 凋落物; 碳归还; 土壤水分特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0001-06

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.066

Soil Moisture Characteristics and Litter Carbon Return Patterns After Vegetation Restoration in Eroded Area of Red Soil

ZHU Liqin¹, HUANG Rongzhen¹, LI Feng¹, ZHAO Wei¹, ZHAI Cuihong², Ouyang Hui¹

(1. Nanchang Institute of Technology/Jiangxi Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Water Environment, Nanchang, Jiangxi 330099, China; 2. Nanchang Water Resource Bureau, Nanchang, Jiangxi, 330004, China)

Abstract: [Objective] Studying the relationship between soil hydro-physical properties and litter carbon return in restored degraded land is beneficial to understanding the hydrological functions associated with different restoration measures. [Methods] Soil moisture characteristics in different soil layers(0—80 cm) and litter carbon were examined in four typical vegetation types in eroded area of red soil, i. e. *Citrus reticulata* Banco forest, enclosed forest, *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest and broad-leaved forest, based on field investigations and laboratory tests. [Results] (1) The soil water content decreased with the increases of soil water suction. The average soil water content with a treatment of 1 500 kPa water suction, compared with the treatment of 2.5 kPa water treatment, was reduced more in *Citrus reticulata* Banco forest [(45.92%) than in other vegetation types (enclosed forest (45.10%), *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest (38.79%), broad-leaved forest(31.20%)]. (2) The soil water content decreased with the increases in soil depth. Among different water suction treatments, soil water content in the bottom soil layer

收稿日期:2014-06-16

修回日期:2014-07-21

资助项目:国家自然科学基金项目“生态恢复对红壤严重侵蚀地土壤水库重建的影响与机制”(31160179); 江西省自然科学基金项目(20151BAB204033); 江西省和南昌工程学院研究生创新专项基金项目“红壤侵蚀地不同植被恢复模式土壤水库库容对土壤有机碳的响应”。

第一作者:朱丽琴(1986—),女(汉族),江西省景德镇市人,硕士研究生,实验师,研究方向为植被恢复与重建。E-mail:zhliq.nit@163.com。

通信作者:黄荣珍(1975—),男(汉族),福建省莆田市人,博士,教授,硕士生导师,主要从事坡地水文与生态修复等方面的研究。E-mail:huangrz@nit.edu.cn。

(60—80 cm) varied between 30.11% to 9.72% in *Citrus reticulata* Banco forest, 31.81% to 24.46% in enclosed forest, 24.46% to 5.49% in *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest and 8.21% to 0.24% in broad-leaved forest. The reductions in soil water content in broad-leaved forest were smallest among four vegetation types. (3) The total litter carbon significantly varied among four vegetation types, i. e. *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest(1 915.79 kg/hm²) > broad-leaved forest(1 414.84 kg/hm²) > forbidden forest(1 212.32 kg/hm²) > *Citrus reticulata* Banco forest(633.88 kg/hm²). The carbon return of broad leaf and saturated water content in broad-leaved forest were larger than those in *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest, showing greater consistency. [Conclusion] Soil water-preserving and holding capacity in broad-leaved forest is the best. The carbon return of broad leaf had greater impacts on soil water content than other factors.

Keywords: vegetation restoration; litter; carbon return; soil moisture characteristics

与同纬度带的荒漠、沙漠形成鲜明对比,中国亚热带区域是世界上少有的绿洲与典型的生态过渡带,对环境变化也最为敏感^[1]。地处中亚热带的江西省,丘陵山地面积占总面积的 70%,由于山高坡陡、降雨强度大、红壤抗蚀性差等自然因素和人为破坏等多种因素影响,成为不毛之地的“红色沙漠”和南方红壤侵蚀的典型代表^[2],导致土壤结构破坏及土壤水库理水调水功能剧降。土壤水库功能失调制约了植被恢复与稳定,而植被恢复程度和稳定性又反过来影响土壤水分和区域水文循环。朱显谟先生^[3]曾提出维护土壤水库功能的正常发挥是重建生态环境的有效途径,其变化与演变是陆地生态系统发展的关键和“动力”。人们一般认为水分是中国北方植被恢复的限制性因素,其实位于南方湿润季风气候区的红壤侵蚀退化地,降雨的季节分布不均和严重水土流失造成尖锐的土壤水分缺乏和失调问题,因此,加强该区土壤水库重建研究对于有效防治红壤严重侵蚀地水土流失、加速生态恢复进程和保障区域生态安全显得异常紧迫和重要。本文从凋落物凋落量和碳归还量的角度研究不同植被恢复模式土壤持水性的差异,拟通过探讨差异产生的原因与机理,为从土壤有机质—土壤结构—土壤稳定性—土壤回复力角度理解土壤结构与功能相互作用提供新的认识,并为南方严重红壤侵蚀区植被恢复措施选择和水土保持生态恢复实践提供科学依据。

1 研究区概况

试验地位于江西省泰和县灌溪乡(115°04'13"E, 26°44'48"N)中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站(简称千烟洲站)。该区属典型红壤丘陵地貌,海拔高度在 60~115 m,土壤类型以红壤为主,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物。该区光能充足,雨量丰沛,四季分明,年均气温 17.9 °C,年均日照 1 406 h,年均降水量 1 489 mm,属典型中亚热带湿润季风气候。

各试验样地基本情况见表 1。封育林主要乔木树种为:马尾松(*Pinus massoniana*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、黄檀(*Dalbergia hupeana*)、冬青(*Ilex chinensis*)、欏木(*Loropetalum chinense*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、白栎(*Quercus fabri* Hance)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)、槭树(*Acer truncatum*),平均树高为 12 m,平均胸径为 11.5 cm。木荷×马尾松林混交林主要乔木树种为木荷(*Schima superba*)和马尾松,木荷平均树高为 22 m,平均胸径为 19 cm;马尾松平均树高为 18 m,平均胸径为 22 cm。阔叶林主要乔木树种为香樟(*Cinnamomum camphora*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、木荷、深山含笑(*Michelia maudiae*)、枫香,平均树高为 22 m,平均胸径为 15 cm。

表 1 试验样地概况

植被恢复模式	栽植时间/a	坡度/(°)	坡向	保留密度/ (株·hm ⁻²)	乔木郁 闭度/%	灌木盖度/ %
柑橘林	2000 ^①			550	≥95	无植被覆盖
封育林	1984	15	阳坡	—	90	50
木荷×马尾松林混交林	1984	15	阴坡	1750	92	15
阔叶林	1984	25	阴坡	860	92	47

注:①1984年在原来 5°左右的缓坡上通过修建宽度为 3 m 的水平阶而成,2000年砍伐原有果树进行嫁接。

2 研究方法

2.1 试验地设置

选取红壤侵蚀区典型植被恢复模式,即柑橘林、封育林、木荷×马尾松混交林、阔叶林等4种恢复模式,每种植被恢复模式中分别建立3块20 m×20 m固定标准地。

2.2 凋落物收集

2011年10月在标准地内布设10个面积为0.5 m²的正方形凋落物收集框,每个月月底定期收集,周期为1 a,即2011年10月至2012年9月。凋落物每个季度处理1次,区分叶、枝、花、果、其他(碎屑、昆虫粪便、小动物尸体等)等,置80℃下烘干至恒重,分别称重并测定其碳含量,同时换算成每1 hm²林地的年凋落物量。

2.3 土壤样品采集

2012年5月在每种植被恢复模式标准地内按“S”型布设5个取样点,每个样点用环刀按0—10,10—20,20—40,40—60和60—80 cm这5个层次分别取土,作为土壤水分特征曲线指标和土壤容重测定项目使用。

2.4 土壤质量含水率测定

2012年7月至2013年5月,在中国科学院红壤生态试验站测定土壤样品,利用环刀法测定土壤饱和含水率;利用压力膜仪(1500型)测定在施加0.025,0.06,0.1,0.3,1,3和15 bar压力下土壤质量含水率。

2.5 土壤容重测定

利用100 cm³的钢制环刀,切割自然状态的土壤,使土样充满其中,然后称量计算单位体积的烘干土重。

2.6 凋落物有机碳测定

将烘干的凋落物粉碎,精确称取1~2 mg,采用元素分析仪(2400 II型)测定。

2.7 数据处理

所有数据均为各重复实测值的平均值,采用Microsoft Excel 2003,SPSS 19.0软件对试验数据进行统计、分析和制图。

3 结果与分析

3.1 不同植被恢复模式土壤水分特征

由表2可看出,各植被恢复模式在不同的土层,其土壤含水量均随土壤水吸力的增大而减小。在2.5~1500 kPa水吸力变化范围内,整个剖面(0—80 cm)的平均含水量均在2.5 kPa时达到最高,1500 kPa时降到最低,下降的幅度大小依次为:柑橘林(45.92%)>封育林(45.10%)>木荷×马尾松林混

交林(38.79%)>阔叶林(31.20%)。不同植被恢复模式的土壤含水量在15与2.5 kPa水吸力条件下相比,0—10 cm土层的土壤含水量下降的幅度大小依次为:木荷×马尾松林混交林(49.81%)>柑橘林(49.04%)>封育林(47.05%)>阔叶林(35.31%);10—20 cm土层下降的幅度大小依次为:柑橘林(52.45%)>封育林(51.13%)>木荷×马尾松林混交林(42.19%)>阔叶林(28.01%);20—40 cm土层下降的幅度大小依次为:柑橘林(50.11%)>木荷×马尾松林混交林(44.39%)>封育林(41.37%)>阔叶林(32.44%);40—60 cm土层下降的幅度大小依次为:封育林(42.76%)>柑橘林(41.24%)>木荷×马尾松林混交林(33.37%)>阔叶林(31.87%);60—80 cm土层下降的幅度大小依次为:封育林(42.78%)>柑橘林(35.27%)>阔叶林(28.15%)>木荷×马尾松林混交林(23.67%)。因此,阔叶林土壤含水量总体上在不同的水吸力条件下,其下降的幅度最小,说明阔叶林其土壤持水保水性能最佳。

在垂直剖面上,土壤含水量大致随土层深度的增加而降低。在不同水吸力条件下,各植被恢复模式底层(60—80 cm)土壤含水量与表层(0—10 cm)的相比,柑橘林的变化幅度为30.11%~9.72%,封育林为31.81%~24.46%,木荷×马尾松林混交林为24.46%~5.49%,阔叶林为8.21%~0.24%。在同一土壤水吸力条件下,各植被恢复模式0—10 cm土层土壤含水量明显高于其他土层,表明表层土壤持水性较强;在2.5 kPa水吸力条件下,不同植被恢复模式底层(60—80 cm)的土壤含水量与表层(0—10 cm)的相比,下降的幅度大小依次为:封育林(31.81%)>柑橘林(28.92%)>木荷×马尾松林混交林(24.46%)>阔叶林(8.21%);在0.06 bar水吸力条件下,土壤含水量下降的幅度大小依次为:柑橘林(29.70%)>封育林(24.46%)>木荷×马尾松林混交林(19.52%)>阔叶林(7.41%);在0.1 bar水吸力条件下,土壤含水量下降的幅度大小依次为柑橘林(28.56%)>封育林(25.42%)>木荷×马尾松林混交林(14.35%)>阔叶林(6.68%);在30 kPa水吸力条件下,土壤含水量下降的幅度大小依次为封育林(27.07%)>柑橘林(21.24%)>木荷×马尾松林混交林(5.59%)>阔叶林(4.39%);在100,300和1500 kPa水吸力条件下,土壤含水量下降的幅度大小依次均为封育林>柑橘林>阔叶林,而木荷×马尾松林混交林在高水吸力条件下,其底层(60—80 cm)的土壤含水量却均高于表层(0—10 cm),说明其微细孔隙较表层的多,植被生长对其影响小,不能有效改良底层土壤。

表 2 不同植被恢复模式对应土壤水分特征曲线数据

植被恢复模式	土层/cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	不同土壤水吸力对应的土壤质量含水率/%						
			2.5 kPa	6 kPa	10 kPa	30 kPa	100 kPa	300 kPa	1 500 kPa
柑橘林	0—10	1.48	26.04±0.83 ^a	24.14±1.44 ^a	22.83±1.43 ^{ac}	20.34±1.70 ^a	17.66±1.21 ^{ad}	15.90±1.21 ^{ac}	13.27±1.33 ^a
	10—20	1.48	24.46±1.67 ^b	21.50±1.60 ^a	20.55±1.60 ^c	18.66±1.99 ^c	16.24±1.24 ^c	14.29±0.84 ^c	11.63±1.03 ^a
	20—40	1.61	21.04±2.17 ^a	18.27±2.22 ^a	16.99±2.08 ^a	15.49±2.25 ^a	14.24±1.11 ^a	13.07±1.13 ^a	10.50±0.89 ^a
	40—60	1.79	18.33±0.14 ^a	17.88±0.30 ^a	17.21±0.37 ^a	16.62±0.37 ^a	13.63±1.52 ^b	12.42±1.47 ^b	10.77±1.90 ^a
	60—80	1.75	18.51±1.61 ^a	16.97±1.96 ^a	16.31±2.26 ^a	16.02±2.30 ^a	15.39±1.48 ^a	14.28±1.31 ^b	11.98±0.33 ^{bc}
	剖面平均含水量		21.43	19.56	18.61	17.32	15.34	13.93	11.59
	封育林	0—10	1.45	26.91±2.55 ^a	23.96±2.05 ^a	22.62±1.90 ^{ad}	21.28±1.92 ^{ac}	18.79±1.83 ^{ac}	16.99±1.78 ^{adc}
10—20	1.66	19.40±2.33 ^{ad}	16.82±2.50 ^d	15.71±2.39 ^a	15.10±2.16 ^a	12.71±1.63 ^a	11.50±1.40 ^a	9.48±1.63 ^d	
20—40	1.61	20.50±2.32 ^a	19.74±2.12 ^a	18.54±2.02 ^a	16.65±1.71 ^a	14.87±1.77 ^a	14.05±1.71 ^a	12.02±1.33 ^a	
40—60	1.66	19.27±2.00 ^a	17.50±2.56 ^a	16.80±2.46 ^a	15.71±2.27 ^a	14.45±1.98 ^a	13.11±2.00 ^b	11.03±2.06 ^a	
60—80	1.65	18.35±1.30 ^a	18.10±1.33 ^a	16.87±1.46 ^a	15.52±1.34 ^a	13.50±1.45 ^b	12.32±1.44 ^b	10.50±1.44 ^{bd}	
剖面平均含水量		20.73	19.10	17.99	16.74	14.76	13.50	11.38	
木荷×马尾松林混交林	0—10	1.41	25.72±0.98 ^a	23.72±0.85 ^a	21.74±0.90 ^a	18.59±0.93 ^a	15.43±1.05 ^a	13.25±1.05 ^a	12.91±1.57 ^{ad}
	10—20	1.51	21.00±1.75 ^{af}	19.56±1.86 ^a	18.02±1.83 ^a	15.63±1.51 ^a	13.53±1.51 ^a	12.34±1.36 ^a	12.14±0.29 ^{ac}
	20—40	1.59	20.41±2.12 ^a	19.51±2.20 ^a	18.19±2.11 ^a	16.53±2.45 ^a	14.19±1.72 ^a	13.08±1.40 ^a	11.35±2.64 ^{ac}
	40—60	1.74	18.52±1.45 ^a	17.94±1.50 ^a	17.04±1.55 ^a	16.19±1.65 ^a	14.61±1.66 ^a	13.83±1.53 ^{ab}	12.34±1.53 ^a
	60—80	1.76	19.43±1.53 ^a	19.09±1.64 ^a	18.62±1.70 ^a	17.55±1.97 ^a	16.75±1.75 ^{ab}	16.08±1.67 ^{ab}	14.83±1.78 ^{acd}
剖面平均含水量		20.83	19.83	18.63	16.87	14.94	13.79	12.75	
阔叶林	0—10	1.43	29.37±1.13 ^a	28.60±1.25 ^a	27.40±1.30 ^{bcd}	25.27±1.20 ^{bc}	22.25±1.14 ^{bc}	20.61±1.09 ^{bd}	19.00±1.04 ^{bc}
	10—20	1.44	26.60±1.51 ^b	26.10±1.66 ^b	24.99±1.76 ^b	23.47±1.72 ^b	21.19±1.68 ^b	19.85±1.45 ^b	19.15±1.93 ^b
	20—40	1.52	24.97±1.13 ^b	24.34±1.24 ^b	23.37±1.33 ^b	22.03±1.69 ^b	19.83±1.63 ^b	18.62±1.70 ^b	16.87±1.87 ^{bc}
	40—60	1.45	26.51±1.29 ^b	25.97±1.40 ^b	24.90±1.43 ^b	22.91±1.86 ^b	20.48±1.42 ^b	19.00±1.45 ^a	18.06±0.72 ^b
	60—80	1.50	26.96±1.00 ^b	26.48±1.16 ^b	25.57±1.27 ^b	24.16±1.49 ^b	22.17±1.44 ^a	20.56±1.29 ^a	19.37±2.27 ^a
	剖面平均含水量		26.86	26.27	25.22	23.55	21.17	19.72	18.48

注:表中数据为平均值±标准差;同列同土层不同字母表示差异达显著水平($p < 0.05$)。下同。

综上所述,柑橘林与封育林土壤含水量在不同土层下降变幅大,而阔叶林的变幅小。阔叶林在不同水吸力条件下随土层深度的增加变化不明显,这进一步说明阔叶林其土壤的持水保水性能优于其他植被恢复模式。

方差分析显示,阔叶林与柑橘林,封育林,木荷×马尾松林混交林间在同一水吸力下土壤含水量存在显著性差异($p < 0.05$),但木荷×马尾松林混交林与柑橘林,封育林间土壤含水量差异性不显著($p > 0.05$)。

3.2 不同植被恢复模式凋落物碳归还量

凋落物层作为森林生态系统独特的结构层次^[4],对森林的生物地球化学循环起着重要的作用。其通过增加地表粗糙度不仅能阻缓径流,而且能抑制土壤水分的蒸发,起到良好的蓄水保土作用;同时,森林凋落物又可使碳从地上生物库向地下土壤库转移,成为森林生态系统土壤碳归还的主要来源^[5]。因此,凋落物有机碳的归还通过影响土壤团聚体及结构,能够对土壤水分状况产生重大影响。

由表 3 可知,不同植被恢复模式凋落物有机碳归还总量大小依次为:木荷×马尾松林混交林(1 915.79 kg/hm^2) > 阔叶林(1 414.84 kg/hm^2) > 封育林(1 212.32 kg/hm^2) > 柑橘林(633.88 kg/hm^2)。经方差分析,木荷×马尾松林混交林与柑橘林,封育林,阔叶林间凋落物碳归还总量存在显著性差异($p < 0.05$);柑橘林与封育林,阔叶林间存在显著性差异($p < 0.05$),且柑橘林凋落物碳归还总量明显低于其他植被恢复模式,主要是由于柑橘林作为典型的农应用型植被类型,随着果实的采收、除草等使地表凋落物残体较少。阔叶林与封育林间差异不显著($p < 0.05$)。

叶、枝、花、果及其他为凋落物的组成部分,其化学组成和分解的难易程度不同,归还速度也不同。由于叶(包括阔叶和针叶)的碳归还量在柑橘林,封育林,木荷×马尾松林混交林和阔叶林的凋落物碳归还总量中所占比重分别达到 72.39%,75.37%,67.86%和 80.40%,因此,叶的碳归还量在各组分中占绝对优势,能够主导碳归还总量的变化趋势,反映了其在森林生态系统凋落物碳归还中的重要地位。

表 3 不同植被恢复模式凋落物各组分的碳归还量

kg/hm²

植被恢复模式	阔叶	针叶	阔枝	针枝	花果	其他	碳归还总量
柑橘林	458.84±55.20 ^a	0	111.58±13.24 ^a	0	34.57±4.57 ^{ab}	28.89±2.98 ^a	633.88 ^a
封育林	822.18±72.23 ^c	91.54±7.62 ^a	86.12±8.57 ^a	36.65±3.42 ^a	76.70±9.18 ^b	99.13±12.19 ^b	1212.32 ^b
木荷×马尾松林混交林	758.92±32.18 ^c	541.22±17.45 ^b	153.94±10.34 ^a	166.99±14.28 ^b	199.44±13.62 ^c	95.28±9.36 ^b	1915.79 ^c
阔叶林	1115.10±135.70 ^b	22.38±1.96 ^a	160.19±17.98 ^a	14.97±1.37 ^a	18.73±3.81 ^a	83.47±6.55 ^b	1414.84 ^b

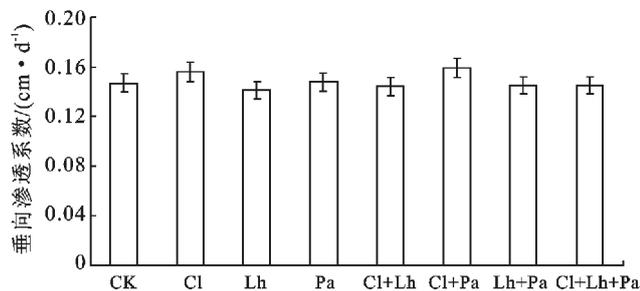


图 1 不同植被恢复模式土壤剖面对应饱和含水量

凋落物碳归还量通过影响土壤有机质,改变土壤结构,影响土壤含水量。由图 1 可见,不同层次的土壤饱和含水量,自表层到底层大致逐渐减小。阔叶林饱和含水量明显高于其他植被恢复模式,其随土壤深度的增加,其饱和含水量下降的幅度最小。在 0—10 cm 土层饱和含水量的大小依次为:阔叶林>木荷×马尾松林混交林>封育林>柑橘林,10—20 cm 土层为阔叶林>柑橘林>木荷×马尾松林混交林>封育林,20—40 cm 土层为:阔叶林>封育林>木荷×马尾松林混交林>柑橘林,40—60 cm 土层为:阔叶林>木荷×马尾松林混交林>封育林>柑橘林,60—80 cm 土层为:阔叶林>封育林>木荷×马尾松林混交林>柑橘林,0—80 cm 整个剖面平均饱和含水量为阔叶林(28.60%)>木荷×马尾松林混交林(23.27%)>封育林(22.87%)>柑橘林(22.38%)。而根据表 3,不同植被恢复模式阔叶碳归还量的大小依次为:阔叶林>封育林>木荷×马尾松林混交林>柑橘林,针叶为:木荷×马尾松林混交林>封育林>阔叶林,阔枝为阔叶林>木荷×马尾松林混交林>柑橘林>封育林,针枝为木荷×马尾松林混交林>封育林>阔叶林,花果为:木荷×马尾松林混交林>封育林>柑橘林>阔叶林,其他为:封育林>木荷×马尾松林混交林>阔叶林>柑橘林。可以看到,凋落量中阔叶碳归还量与土壤饱和含水量存在密切联系,显现出阔叶凋落量碳归还对土壤含水量的影响较其他组分更大。

同时,由表 3 还可知,木荷×马尾松林混交林凋落物碳归还总量均大于阔叶林,而其饱和含水量却小于阔叶林。虽然木荷×马尾松林混交林叶的碳归还总量(1 300.14 kg/hm²)只是略大于阔叶林(1 137.48

kg/hm²),但两者饱和含水量却表现出明显差异,主要是木荷×马尾松林混交林针叶的碳归还量(541.22 kg/hm²,占凋落物碳归还总量的 28.25%)远大于阔叶林(22.38 kg/hm²,占凋落物碳归还总量的 1.58%),而阔叶碳归还量(758.92 kg/hm²,占凋落物总量的 39.61%)远小于阔叶林(1 115.10 kg/hm²,占凋落物总量的 78.81%)。这说明土壤含水量的大小与凋落物组分中阔叶、针叶碳归还量所占比重有关。

4 结论

(1) 土壤含水量总体上随土层深度的增加而降低,随土壤水吸力的增大而减小;在同一土壤水吸力条件下,各植被恢复模式 0—10 cm 土层土壤含水量最高,该土层持水性较强;在不同土层或不同水吸力条件下,阔叶林土壤含水量下降的幅度均最小,表明其保水持水性能最佳。这与刘效东等^[6]研究的南亚热带地区 3 种林型土壤水分含量大小依次为:季风阔叶林>马尾松针阔叶混交林>人工恢复的马尾松针叶林的结果一致。杨宏等^[7]研究的长白山北坡阔叶红松林土壤含水量大于暗针叶林,也证实了阔叶林土壤持水性优于针叶林。从试验现场观测的结果来看,随着恢复时间的推移,马尾松等针叶树种正在逐渐成为被压木、所占比例变小,最终将退出,而木荷等阔叶树种将占有较大优势,并逐渐发展成顶级群落;且随着林龄的增长,阔叶林地土壤持水能力有增强的趋势^[8]。

(2) 不同植被恢复模式凋落物碳归还总量大小依次为:木荷×马尾松林混交林>阔叶林>封育林>柑橘林,虽然木荷×马尾松林混交林凋落物碳归还总量大于阔叶林,但其阔叶碳归还量小于阔叶林,后者与含水量差异情况相一致,说明凋落物中不同组分通过碳归还的方式改变土壤物理结构、影响土壤水分状况时,阔叶碳归还对土壤含水量的影响大于其它组分。在阔叶林中,生物活动更加活跃,养分循环更加强烈,更能促进凋落物的分解、有机质的形成,有利于改善土壤结构,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,增强土壤蓄水、保水功能;而木荷×马尾松混交林中的针叶凋落量较多,分解速率相对迟缓,更新进程则相对缓慢,凋落物碳归还总量虽大,效果却不及阔叶林。研究同时发现,阔叶林凋落物中阔叶碳归还量比木荷

×马尾松林混交林提高了 46.93%，但阔叶林表层(0—10 cm)的土壤饱和含水量只比木荷×马尾松林混交林提高 7.29%，说明凋落物碳归还在一定程度上对土壤水分产生影响，但二者并非线性正相关，土壤水分状况的改善还受到其他因素的影响，须进一步开展研究，以更好地指导红壤侵蚀退化地的生态恢复工作。

(3) 土壤水分特征包括其库容特征，土壤水库强大的持水、蓄水、调水功能可有效减少地表径流、消减洪峰，而不同土壤类型、不同植被恢复模式，其土壤持水性的差异对土壤水库蓄水、调水功能的发挥有着直接的影响。在中国南方红壤区，年均降雨量大、雨季集中且暴雨频繁，侵蚀地恢复的植被虽然覆盖率和多样性有了很大的提升，但水土流失依然严重、水源涵养能力仍旧低下，其与土壤水分物理性质没有获得有效改善有关^[9]，与相同质地的东北黑土、华北潮土、黄土母质发育的褐土相比，红壤的防洪库容和有效库容大约只是它们的 1/2，使其更易受到洪涝灾害威胁^[10]。因此维护、改善土壤水库，使水库功能得以正常发挥，有利于植被的恢复与稳定，对有效防治红壤侵蚀区严重水土流失、提高防洪减灾能力尤为重要。

(4) 凋落物是土壤有机质的主要来源，而土壤有机碳作为土壤有机质的重要组成成分，其含量与凋落物量呈正相关关系^[11]，土壤有机碳对森林生态系统土壤层水分的持留及其水分特征曲线有深刻的影响^[12]。Dexter 和 Wick 等^[13-14]的研究表明，随着植被恢复有机质增加，大团聚体和微团聚体增加。构成土壤水库库容的孔隙存在于不同大小团聚体之间和内部，依据自然特性，其等级的形成和团聚体等级相对应^[15]，即植被恢复可以促进土壤有机质含量的增加，促进土壤团聚体和团粒结构的形成，改善土壤的结构，增加土壤的孔隙度，增强土壤的毛管作用。同时，植被恢复可以改变土壤的胶体状况，增强土壤的吸附作用，从而有利于保持土壤水分，使得土壤含水量增加，持水性能增强，土壤通气和透水性能也得到改善。

[参 考 文 献]

- [1] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 关于中国的亚热带[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(1): 1-10.
[2] 赵其国. 闽西南及赣南地区水土流失治理问题的思考与

建议[J]. 中国水土保持, 2006(8): 1-3.

- [3] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 科技与社会, 2006, 21(4): 320-324.
[4] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 30-34.
[5] 潘辉, 黄石德, 洪伟, 等. 3 种相思人工林凋落物量及其碳归还动态[J]. 福建林学院学报, 2010, 30(2): 104-108.
[6] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.
[7] 杨弘, 李忠, 裴铁瑶, 等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 272-276.
[8] 徐敬华, 陈云明, 邓岚. 黄土丘陵半干旱区典型人工林土壤水分特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 48-52.
[9] 方堃, 陈效民, 张佳宝, 等. 红壤地区典型农田土壤水力学特性及土壤水库容研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 23-27.
[10] 张斌, 张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究[M]//赵其国, 王明珠, 孙波, 等. 红壤物质循环及其调控. 北京: 科学出版社, 2002: 203-209.
[11] Sauer T J, Cambardella C A, Brandle J R. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt [J]. *Agroforestry Systems*, 2007, 71(3): 163-174.
[12] Ouattara K, Ouattara B, Assa A, et al. Long-term effect of ploughing, and organic matter input on soil moisture characteristics of a Ferric Lixisol in Burkina Faso[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 88(1): 217-224.
[13] Dexter A R, Richard G, Arrouays D, et al. Complexed organic matter controls soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2008, 144(3): 620-627.
[14] Wick A F, Ingram L J, Stahl P D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 41(2): 201-209.
[15] McCarthy J F, Ilavsky J, Jastrow J D, et al. Protection of organic carbon in soil microaggregates via restructuring of aggregate porosity and filling of pores with accumulating organic matter [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(19): 4725-4744.