

DOI: 10.5846/stxb201912022603

刘佩伶,陈乐,刘效东,戴雨航,冯英杰,张倩媚,褚国伟,孟泽. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤水分时空变异研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1798-1807.

Liu P L, Chen L, Liu X D, Dai Y H, Feng Y J, Zhang Q M, Chu G W, Meng Z. Temporal and spatial variability of soil moisture in a forest succession series in Dinghushan. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1798-1807.

鼎湖山不同演替阶段森林土壤水分时空变异研究

刘佩伶¹, 陈乐¹, 刘效东^{1,*}, 戴雨航¹, 冯英杰¹, 张倩媚², 褚国伟², 孟泽²

1 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

2 中国科学院华南植物园, 广州 510650

摘要: 土壤水分作为森林生态系统水分蓄库的主体, 森林土壤水分储量及其时空动态与变异对揭示区域植被恢复与气候变化背景下的森林生态系统水文过程响应与服务功能变化机制具有重要意义。本研究以南亚热带地区典型森林植被演替序列马尾松人工林(*Pinus massoniana* coniferous forest, PF)-马尾松针阔叶混交林(mixed *Pinus massoniana*/broad-leaved forest, MF)-季风常绿阔叶林(monsoon evergreen broad-leaved forest, MEBF)为研究对象, 依托中国生态系统研究网络森林样地建设与监测统一规范对鼎湖山森林生态系统定位站站区内分布的上述森林类型土壤水分的长期定位观测(2005—2015年), 通过分析各演替阶段森林土壤不同土层(0—15、15—30、30—45、45—60、60—75 和 75—90 cm)土壤体积含水量观测数据, 探究该区域森林植被恢复过程中的土壤水分变化及其时空变异。结果表明: 在雨热同期且干湿季明显的南亚热带地区, 鼎湖山森林土壤储水量及其时间动态受降雨量的影响显著, 森林土壤层对降雨具有强烈的调蓄和稳定作用, 伴随 PF→MF→MEBF 自然演替进程, 调蓄水分能力逐步增强。林型间, 由初期阶段 PF 到顶级群落 MEBF, 森林土壤水分储量逐渐提高, 且演替后期林型相对于早期林型, 土壤储水量均呈现为较小的年际与年内变幅。干、湿季而言, 干季时林型间的土壤储水量差异大于湿季, 干季时 MEBF 和 MF 土壤含水量分别是 PF 的 1.33 倍和 1.11 倍。从土壤含水量的干、湿季期间变异来看, 不同林型各土层土壤含水量的变异系数大小均表现为干季大于湿季; 垂直剖面方向上, 突出表现为无论干湿季 MEBF 各层土壤含水量变异均比其他两种林型较为缓和, 充分体现了 MEBF 优越的土壤水分时空调配能力。整体上, 伴随 PF→MF→MEBF 自然演替进程, 土壤水分储量及其稳定性逐步提升。

关键词: 土壤水分; 时空变异; 森林演替; 鼎湖山

Temporal and spatial variability of soil moisture in a forest succession series in Dinghushan

LIU Peiling¹, CHEN Le¹, LIU Xiaodong^{1,*}, DAI Yuhang¹, FENG Yingjie¹, ZHANG Qianmei², CHU Guowei², MENG Ze²

1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Soil moisture is the main component of water storage in forest ecosystems. The soil water reserve of forests and its spatiotemporal dynamics and variations are of great significance for revealing the response of hydrological processes and the change mechanism of service functions in forest ecosystems under the background of regional vegetation restoration and climate change. In this study, we focused on the typical forests in lower subtropical China: a *Pinus massoniana* forest (PF), mixed *Pinus massoniana*/broad-leaved forest (MF), and monsoon evergreen broad-leaved forest (MEBF), which formed a natural successional sequence in this region. Based on the unified standards for the construction and monitoring of

基金项目:国家自然科学基金项目(31600353, 41430529); 广东省自然科学基金项目(2016A030310450); 广东省林业科技创新平台项目(2020-KYXM-09)

收稿日期:2019-12-02; 网络出版日期:2021-01-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxd@scau.edu.cn

forest plots by the Chinese Ecosystem Research Network, long-term positioning observation of soil moisture in the above forest types of the Dinghushan Forest Ecosystem Research Station was conducted during the 2005—2015 period. Through analysis of the measured soil volumetric water content in different soil layers (0—15, 15—30, 30—45, 45—60, 60—75 and 75—90 cm) of the above mentioned forests at each stage of succession, the change in soil water storage and its spatiotemporal variation in the process of forest vegetation restoration in this region were explored. The data showed that in the southern subtropical regions with simultaneous rain and heat and distinct dry and wet seasons, soil water storage and its seasonal dynamics in Dinghushan were significantly affected by rainfall, and the soil layer had a strong regulatory and stabilizing effect on rainfall. With natural succession from the planted (PF) to the climax (MEBF) stage, the ability to regulate and store water gradually increased. Among forest types, from the initial stage (PF) to the top community (MEBF), the soil water storage of the forest ecosystem gradually increased, and compared with the early forest types, the soil water storage of late succession forest types showed small interannual and intra-annual variation. At a seasonal scale, the difference in soil water storage between forest types in the dry season was greater than that in the wet season. The soil water content of MEBF and MF in the dry season was 1.33 times and 1.11 times that of PF, respectively. According to the variation in the soil water content in dry and wet seasons, the coefficient of variation of the soil water content in each soil layer of the different forest types was greater in the dry season than in the wet season. In the vertical direction, this coefficient of variation highlighted that the variation in the soil water content in each layer of MEBF was more moderate than that in the other two forest types in both the dry and wet seasons, which reflected the superior water regulation ability of MEBF. On the whole, with natural succession from the planted (PF) to the climax (MEBF) forest, the soil water storage and its stability improved.

Key Words: soil moisture; spatial and temporal variation; forest succession; Dinghushan

土壤水分作为陆地生态系统水文循环的核心,控制着生态系统内、外部物质和能量的分配与传输,对生态系统的生产力形成与维持、生态系统服务功能的发挥等起到关键性作用^[1-2]。在无人为干扰条件下,开展森林土壤水分含量的固定、长期观测,对揭示区域植被建设与气候变化背景下的生态系统水文学响应以及生态服务功能变化等具有独特意义。

土壤水分是森林生态系统水分蓄库的主体,土壤水分储量受区域气候、植被和土壤等因子的共同作用^[3-4]。气候因子如降雨、气温等直接影响生态系统水分的输入和输出。具体而言,降雨作为区域土壤水分的主要补给来源,降雨强度深刻影响土壤产流形式、入渗强度以及储水量的高低^[5-6];气温通过改变蒸发速率,影响土壤-植物-大气连续体的水分循环,进而对生态系统耗水过程产生作用。植被因子主要通过冠层截留影响降雨分配格局,由植被覆盖差异影响根系吸水、蒸腾作用过程以及表层土壤蒸发速率,最终使得不同植被类型下土壤水分的储量与分布各异^[7]。土壤因子主要通过改变土壤通气和透水能力来影响土壤水分入渗过程,进而对土壤的持水、保水性能产生作用^[5,8]。特定气候区而言,森林的自然演替进程伴随着植被组成与结构逐步复杂化以及土壤理、化、生等特性的逐步改善^[9],植被组成与结构的改变一方面通过调配大气降雨的输入量与时空分配而影响土壤层水分来源和蒸散过程,另一方面,还通过影响土壤孔隙度、容重、有机质含量等一系列理化特征而间接作用于土壤层水分储量与动态^[10]。

植被恢复过程中的土壤水分储量变化以及时空变异一直是生态水文学和自然地理学的研究热点,许多学者从不同环境条件^[11-14]、时间尺度^[15-16]、空间尺度^[7,17-19]下探讨土壤水分变异规律。研究表明:土壤质地、有机质含量、田间持水量等理化性质与土壤水分变异关系密切^[20];此外,对于特定区域来说,土壤水分变异具有明显的时空依赖性。降雨格局影响变异系数的高低,湿润时期的相应值小于干旱时期^[21-22];土壤表层受环境因素的影响较大,而深层次土壤水分变化主要由根系主导^[21],其中土壤含水量变异程度最大的不一定发生在表层^[23]。整体上,大部分研究集中于干旱、半干旱地区植被恢复过程中的土壤水分动态及相关生态系统过

程;对于降水丰富但干湿季分明的华南地区,如何基于区域典型森林类型土壤水分的长期观测数据揭示土壤水分动态与变异规律,对预测和评估我国华南地区植被恢复与气候变化背景下的森林群落结构变化机制、流域水热环境变化等新时期课题具有重要价值。

本文选取鼎湖山森林生态系统定位研究站站区内严格保护下马尾松人工林(*Pinus massoniana* coniferous forest, PF)、马尾松针阔叶混交林(mixed *Pinus massoniana*/broad-leaved forest, MF)和季风常绿阔叶林(monsoon evergreen broad-leaved forest, MEBF)为研究对象,依托中国生态系统研究网络对各典型林型样地的气象因子、土壤因子等的长期定位监测,探究该区域森林植被自然演替进程中土壤水分时间(年、季)与空间(不同林型、不同土层)变异性及其规律表征,以期为区域植被建设、管理及其相关生态服务功能评估与决策提供支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

鼎湖山国家级自然保护区($23^{\circ}09'21''$ — $23^{\circ}11'30''$ N, $112^{\circ}30'39''$ — $112^{\circ}33'41''$ E)位于广东省肇庆市,多丘陵和低山,海拔为100—700 m,最高峰鸡笼山海拔1000.3 m。地处我国南亚热带,属南亚热带湿润季风型气候,水热资源丰富,干季(10月至翌年3月)、湿季(4—9月)分明。年平均气温20.9°C,最热月7月,最冷月1月,年降雨量1860 mm,年均蒸发量1115 mm,年均相对湿度82%^[24]。地带性土壤类型主要为发育于砂岩和砂页岩的赤红壤,富含腐殖质,土壤pH在4—4.9之间^[25]。平均土层厚度约50—80 cm,局部地区土层可达100 cm。

1.2 试验设计

依托中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)森林样地长期定位观测的统一标准,森林标准样地分别设立在鼎湖山3种不同演替阶段森林类型中,该典型演替序列包括处于演替早期阶段的马尾松人工林(PF)、演替中期阶段的马尾松针阔叶混交林(MF)和演替后期阶段的区域地带性森林植被类型季风常绿阔叶林(MEBF)^[25-27]。上述3种不同演替阶段林型观测样地所处海拔、坡度等基本因子接近,各样地的基本信息如表1所示。同样地各土层的土壤物理性质如表2所示。于2005年到2015年,使用CERN统一配置中子仪(CNC503B,北京超能科技公司,北京)定期测量各样地0—15、15—30、30—45、45—60、60—75和75—90 cm共6个土层厚度的土壤含水量,每个样地内设置3—7个土壤水分观测点,样地设置与具体观测方法可参考刘佩伶等^[28]。土壤体积含水量VWC(%)和观测剖面的各土层土壤储水量SWS(mm)的计算公式为:

$$VWC = m \left(R/R_w \right) + c \quad (1)$$

$$SWS = VWC \times h/10 \quad (2)$$

式中,VWC为土壤体积含水量(%);R是土壤中的中子计数率;R_w是水体中的中子计数率;m和c均为常数,取值分别为12.272和-1.2683;SWS为各土层土壤储水量(mm);h为土层厚度(cm)。

1.3 土壤水分变异系数

变异系数(CV)和标准差(SD)的计算公式如下:

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \quad (3)$$

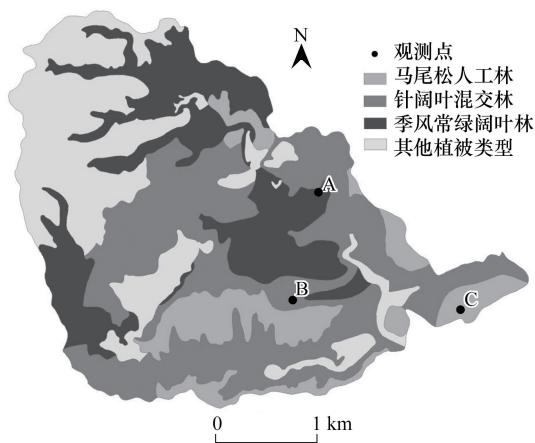


图1 研究区概况图(A、B、C分别为MEBF、MF和PF固定观测样地)

Fig. 1 Overview of the study area (A, B, C represent forest sample plots of the MEBF, MF and PF, respectively)

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: \bar{x} 为不同时间尺度的样本平均值; n 为样本个数; x_i 为样本的第 i 个样本的观测值。

表1 研究区3种森林类型的基本概况

Table 1 The general characteristics of the three forests in the study area

森林类型 Forest type	海拔 Altitude/m	坡度 Gradient/°	林龄 Stand age/a	郁闭度 Canopy coverage/%	叶面积指数 Leaf area index	年凋落物量 Annual litter fall mass/(mg/hm ²)
PF	130—200	25—30	60—70	70	4.3	2.53
MF	150—220	28—35	80—90	>90	6.5	7.31
MEBF	160—230	25—33	>400	>95	7.8	8.84

PF: 马尾松人工林 *Pinus massoniana* coniferous forest; MF: 马尾松针阔叶混交林 mixed *Pinus massoniana*/broad-leaved forest; MEBF: 季风常绿阔叶林 monsoon evergreen broad-leaved forest

表2 研究区3种森林类型土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of the three forests in the study area

林型 Forest type	土层深度 Soil depth /cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	粒级 2— 0.05 mm/%	粒级 0.05— 0.002 mm/%	粒级 <0.002 mm/%
						0.05 mm/%	0.002 mm/%	<0.002 mm/%
PF	0—15	1.4	46.0	32.6	13.4	56.0	23.7	20.3
	15—30	1.5	41.7	31.8	9.9	55.0	25.0	20.0
	30—45	1.6	40.3	31.6	8.7	50.7	25.3	24.0
	45—60	1.5	42.2	30.7	11.5	51.3	24.0	24.7
	60—75	1.6	40.5	33.6	6.9	43.7	30.3	26.0
	75—90	1.6	38.8	32.6	6.2	45.3	30.2	24.5
MF	0—15	1.3	51.7	41.2	10.5	55.3	21.8	22.9
	15—30	1.4	47.5	40.0	7.5	41.7	29.0	29.3
	30—45	1.4	46.1	41.0	5.1	37.7	27.7	34.6
	45—60	1.5	42.4	37.8	4.6	32.5	26.0	41.5
	60—75	1.5	42.7	36.6	6.1	29.3	30.7	40.0
	75—90	1.5	42.0	38.4	3.6	27.7	27.2	45.1
MEBF	0—15	1.2	55.7	41.7	14.0	40.6	33.7	25.7
	15—30	1.3	51.2	42.5	8.7	34.0	35.0	31.0
	30—45	1.3	48.9	40.0	8.9	27.1	35.6	37.3
	45—60	1.3	49.2	39.9	9.3	26.8	33.6	39.6
	60—75	1.3	49.5	38.5	11.0	25.1	37.5	37.4
	75—90	1.4	47.0	39.0	8.0	30.0	34.7	35.3

1.4 数据处理

研究期间的气象要素,包括气温和降雨数据,均来源于鼎湖山自动气象观测站的监测。本文研究的指标有样本平均值、标准差和土壤水分变异系数,所有数据处理和分析均采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行,数据结果作图用 SigmaPlot 12.5 软件完成。通过分析不同演替阶段林型土壤储水量动态以及比较不同林型同一土层体积含水量、同一林型不同土层含水量的差异与变异系数来表征土壤水分的时空动态与变异规律。

2 结果分析

2.1 不同林型土壤储水量的时间动态

研究期间,PF、MF 和 MEBF 各林型土壤储水量与降雨年际的变化较为一致(图 2)。年尺度上,不同林型土壤储水量的年均值大小关系为 MEBF(216.0 mm)>MF(182.1 mm)>PF(169.4 mm),其中 MEBF 土壤储水量波

动范围在 149.8—279.2 mm, MF、PF 土壤储水量分别在 129.3—236.4 mm 和 99.5—246.4 mm 之间波动。波幅的上限(年均最高值)、下限(年均最低值)均为 MEBF 最高。此外, 上限与下限之差为 PF 最大, PF 相应的年际变异系数也较高(33.6%)。这表明, 年尺度上演替后期 MEBF 相较于早期阶段 PF 土壤水分有较好的稳定性。

年内格局而言, 林型间土壤储水量月均值大小关系为 PF(170.4 mm) < MF(183.5 mm) < MEBF(216.1 mm), 各林型土壤储水量最高值均出现在 6 月, 最低值在 1 月。月尺度上, 土壤储水量和降雨量在不同林型中均表现为极显著正相关关系($P < 0.01$)。对 MEBF 而言, 约 92.6% 土壤储水量月变化可以用降雨量的月变化解释; MF、PF 相应值分别为 85.9% 和 88.1%。以 MEBF 为例, 土壤储水量月均值最高为(239.7 ± 48.1) mm, 最低为(183.0 ± 62.7) mm, 最高值、最低值出现的月份多年平均降水量分别为 332.3 mm 和 44.2 mm。另外, PF、MF 土壤储水量月动态波动范围分别在 132.5—202.8 mm 和 143.8—208.8 mm 之间。波幅的上限(月最高值)、下限(月最低值)依然是 MEBF 最高, 上限与下限之差为 PF 最大。从土壤储水量的月间变异来看, 林型间变异系数大小关系为 MEBF(8.7%) < MF(11.7%) < PF(14.5%)(图 3)。

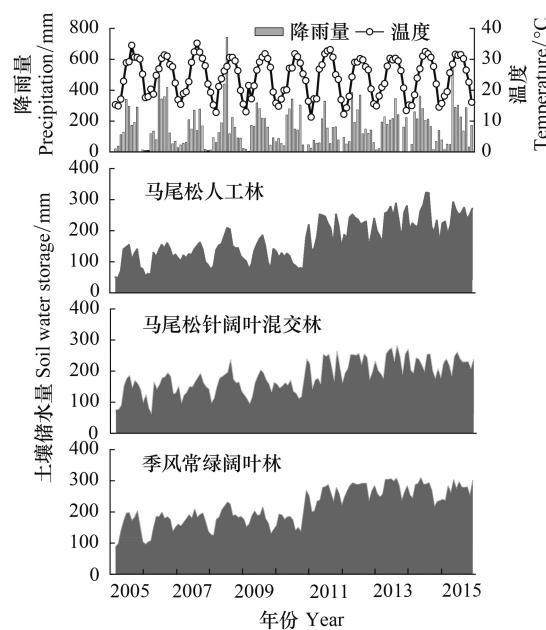


图 2 不同林型土壤储水量(0—90 cm)月动态

Fig. 2 Monthly dynamics of soil water storage (0—90 cm) in different forest types

干湿季比较来看(图 4), 各林型湿季土壤储水量亦均明显高于干季, 以 MEBF 为例, 湿季土壤储水量均值为 231.7 mm, 干季土壤储水量均值为 200.5 mm。干季时 MEBF 和 MF 土壤水分含量分别是 PF 的 1.33 倍和 1.11 倍, 湿季时 MEBF 和 MF 土壤水分含量分别是 PF 的 1.22 和 1.05 倍, 干季时各林型间的土壤储水量差异大于湿季。从季节尺度变异来看, PF、MF 和 MEBF 土壤储水量的变异系数(分别为 35.8%、24.1% 和 25.7%)均明显低于同期降水量的变异系数(57.6%), 表明了不同森林生态系统具有稳定的水分调蓄能力。

2.2 不同林型土壤含水量的垂直空间分布

从土壤垂直剖面上不同土层含水量的分布格局来看, 不同林型土壤含水量的垂向变化特征不一, 但同一林型干季与湿季土壤含水量的垂向变化规律相一致(图 5)。具体来说, MEBF 无论干、湿季表层 0—30 cm 的

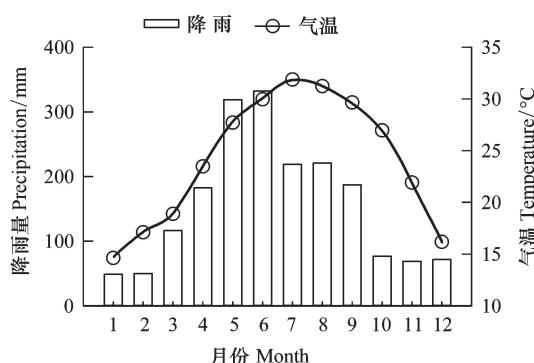


图 3 气象因子与土壤储水量的月动态

Fig. 3 Monthly dynamics of meteorological factors and soil water storage

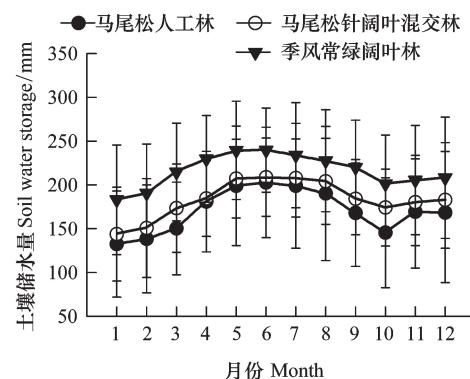


图 3 气象因子与土壤储水量的月动态

Fig. 3 Monthly dynamics of meteorological factors and soil water storage

干湿季比较来看(图 4), 各林型湿季土壤储水量亦均明显高于干季, 以 MEBF 为例, 湿季土壤储水量均值为 231.7 mm, 干季土壤储水量均值为 200.5 mm。干季时 MEBF 和 MF 土壤水分含量分别是 PF 的 1.33 倍和 1.11 倍, 湿季时 MEBF 和 MF 土壤水分含量分别是 PF 的 1.22 和 1.05 倍, 干季时各林型间的土壤储水量差异大于湿季。从季节尺度变异来看, PF、MF 和 MEBF 土壤储水量的变异系数(分别为 35.8%、24.1% 和 25.7%)均明显低于同期降水量的变异系数(57.6%), 表明了不同森林生态系统具有稳定的水分调蓄能力。

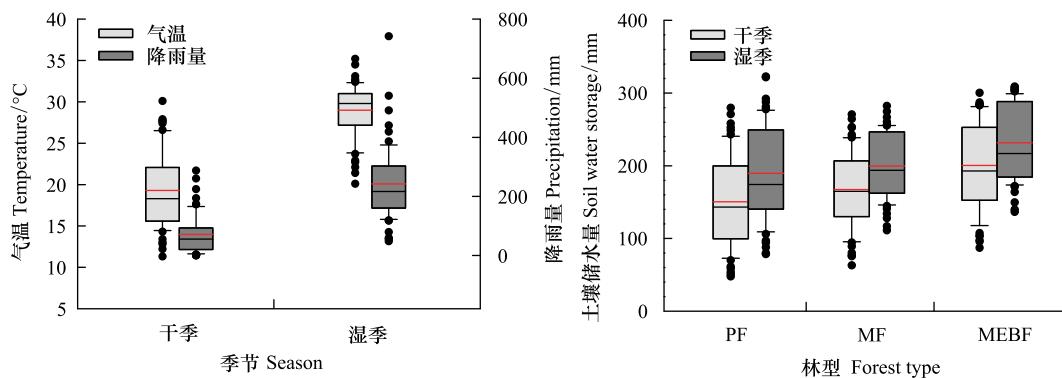


图4 不同林型土壤储水量的季节动态

Fig. 4 Seasonal dynamics of soil water storage in different forest types

土壤含水量均明显高于下层土壤含水量($P<0.05$)，而后随着土层加深，各土层土壤水分含量呈现小幅度下降趋势。MF干季时各土壤层含水量仅波动于18.5% (60—75 cm)—23.2% (15—30 cm)之间，各土层土壤含水量差值较小；而湿季时，随着土层加深，土壤水分含量从27.4% (0—15 cm)逐渐下降到60—75 cm土层的22.1%和75—90 cm土层的23.1%。PF 0—60 cm各土层水分含量相当，干、湿季对应土层的水分含量均值分别为18.6%和23.4%，60 cm以下土层水分含量略微下降。

总体上，林型间同一土层土壤含水量表现为PF<MF<MEBF，尤其是0—30 cm土层。垂直剖面方向上，各林型土层的平均土壤含水量大小出现拐点所在土层不一致，从PF到MEBF，分别为60 cm、45 cm、30 cm。以拐点为界，划分上、下层，上层与下层平均土壤含水量绝对差值最大为MEBF(7.9%)。

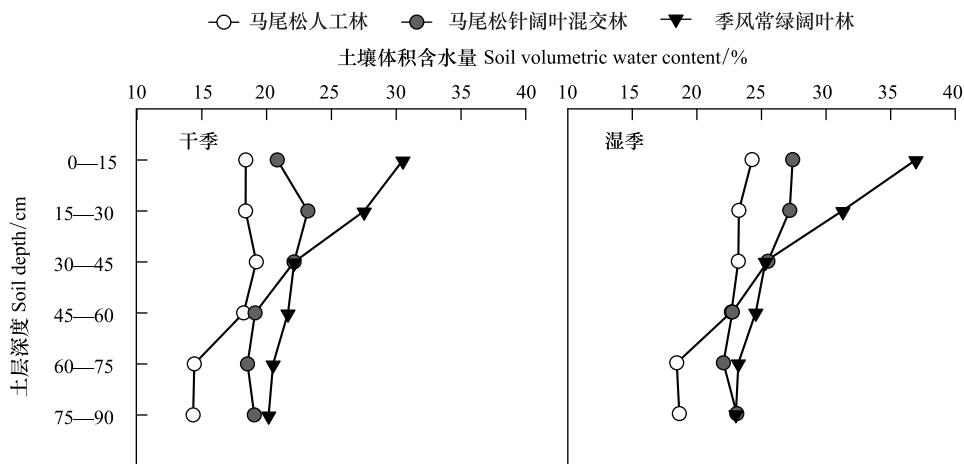


图5 各林型下土壤体积含水量的垂直变化

Fig. 5 Profile distribution of soil volumetric water content under different forest types

2.3 不同林型土壤含水量变异特征

土壤垂直剖面上(图6)，干季期间不同林型各土层含水量均为中等变异($10\% < CV < 100\%$)^[29]。MEBF 0—90 cm各土层的变异系数均较接近，各土层土壤水分含量较为稳定。MF表层变异系数最大(24.8%)，15—45 cm和45—90 cm各土层土壤含水量相对稳定，变异系数大小均值分别为16.9%和21.3%。PF 30—45 cm土层的变异系数最低(21.7%)，随着土层加深，变异系数逐渐增加至27.8%，表明深层土壤含水量的稳定性差。湿季时，MEBF 0—90 cm各土层含水量均为弱变异($CV \leq 10\%$)，PF、MF各土层含水量均为中等变异。MEBF表层变异系数为7.4%，15—30 cm土层变异系数最小(6.1%)，而后随着土层加深，变异系数逐渐

增大至 8.6% (75—90 cm)。MF 0—15 cm 表层变异程度最大(17.0%),其余土层变异系数波动范围在 12.4%—14.8% 之间。PF 60—75 cm 土层变异系数最大(16.7%),与表层变异系数(16.5%)相当。

从不同季节上看,鼎湖山小流域不同林型(PF、MF 和 MEBF)各土层土壤含水量的变异系数大小均表现为干季大于湿季,干季时不同林型间的变异系数差异明显。林型间同一土层土壤含水量的变异系数大小关系大致为 PF>MF>MEBF,演替后期阶段 MEBF 无论干、湿季各土层的土壤水分变异系数最小且相近。

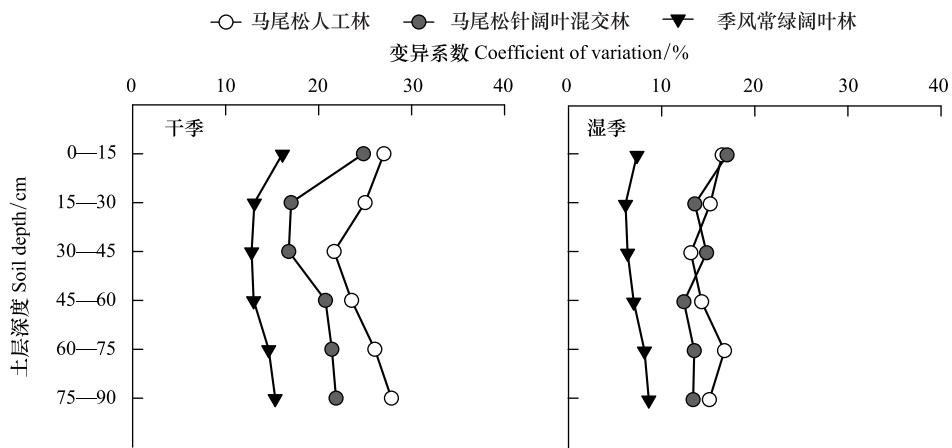


图 6 各林型下土壤体积含水量的垂直变异特征

Fig. 6 Vertical variability of soil volumetric water content under different forest types

3 讨论

对特定研究区而言,土壤储水量主要决定于大气降水量、蒸散、产流以及土壤、凋落物层的水分蓄持能力等水文要素过程间的平衡,与区域水热格局密切相关。土壤水分作为森林生态系统水分蓄库的主体,降雨是土壤水分的主要补给来源^[11,30],植被郁闭度差异、不同季节降雨形态和性质^[31]共同影响降雨入渗量、入渗深度以及土壤层水分含量的季节动态。本研究结果表明,不同演替阶段森林土壤储水量的季节动态对降雨量变化的响应格局相似,且伴随演替进程,森林土壤层调蓄降水、持水能力逐步增强,这与尹光彩等^[32]1999—2002 年在鼎湖山保护区开展的森林土壤水分动态相关研究结果一致。相对于降雨的年际和年内变异,各林型的土壤储水量波动幅度较小。年际、年内不同林型的土壤储水量波幅均为 PF 最大,MEBF 最小,说明随着森林演替正向进行,土壤储水量时间变异程度逐渐降低,MEBF 林内有着更稳定的土壤水热环境。

伴随演替进程,地上植被组成与结构的复杂化、土壤水物理特征的改善,土壤含水量逐步提升,这与紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复中表层土壤蓄水性能变化表现出相同的特征^[33]。植被组成与结构的复杂化通过改变林内水分、热量、养分等循环过程直接或间接影响着土壤理、化、生特征,最终体现为该地区森林自然演替进程中以土壤含水量逐步提升为重要表征的逐步中生化的林内环境。土壤质地作为土壤的基本性质之一,直接影响着水分的保持和下渗以及有机质变化的动态过程^[34-36]。诸多研究表明,植被的恢复过程,伴随着土壤质地细粒化的过程,即土壤粉粒、粘粒含量的增加和砂粒含量的降低,而土壤持水力与粘粒含量高度相关^[10,37]。此外,土壤有机质作为土壤理化性状形成的基础,参与并影响着土壤生态功能的各个过程^[9,38]。邵宜晶等^[24]研究表明,森林土壤有机碳随演替阶段而增加,在土壤剖面上的分布都呈现显著的表层富集现象。土壤有机质深刻影响着土壤的水物理特性,其含量对土壤粘粒含量、土壤孔隙度、土壤含水量等具有关键性调控作用^[39-40],也因此土壤有机质被视为可用来量度土壤水分保持及其有效性的重要常规性观测指标^[41]。因此,处于演替后期的季风常绿阔叶林相较于其他两种林型,虽然复杂的地上植物群落其截留作用减少了降水的净输入,但土壤层对降水的调蓄、持保水能力强,伴随演替进行土壤层含水量尤其是表层土壤含水量增加显著。

土壤含水量的增加可以显著降低其变异程度(图7),本研究地区湿季降水雨量大、降水频率高,土壤含水量相对稳定,湿季时各林型均表现为相对于干季较小的土壤水分变异特征,这与 Jacopo 等^[21]、潘颜霞等^[22]人的研究结果一致。气候、土壤、植被等共同控制着土壤剖面上各层土壤水分的运动过程^[1],影响因子的随机性和空间异质性决定各土层土壤水分变异的复杂程度。Yu 等^[12]的研究表明,表层土壤含水量受降雨、蒸发的影响强烈,加上根系吸收过程增强了表土水分的变异程度;深层次土壤水分输入有限且深根引起水分输出较大,使得深层土壤水分变异增大。Liu 等^[23]在祁连山的研究结果则发现 20 cm 处土层含水量的变异系数显著高于 5 cm 处的相应值,土壤水分最活跃的深度并没有发生在表层。鼎湖山不同演替阶段森林下表层土壤水分的变异程度区别于相邻土层,与受环境因子影响大有关;深层次土壤的水分变异也有增大的趋势,但变化并不连续,可能与各林型根系分布有密切联系。沿演替方向,深层次土壤水分变异减小得益于森林生态系统地上与地下、植物与土壤等之间的协同、响应机制的完善。PF 植被结构单一,土壤蓄、保水能力低,土壤水分尤其表层土壤水分易散失,导致 PF 深层土壤水分变异显著高于其他林型。总体上,演替进程中不同林型间同一土层土壤含水量的变异系数大小关系大致表征为 PF>MF>MEBF;垂直剖面方向上,无论干、湿季 MEBF 各层土壤含水量变异较缓和,充分体现了该顶级群落优越的中生化稳定的土壤水分环境,这主要与森林演替伴随着地上植被群落结构调整、地下根系延展以及土壤物理性质改善有密切关系。

整体上,伴随 PF→MF→MEBF 自然演替进程,土壤水分储量逐步提升、时空稳定性增强,相同水热条件下的水分分配与供给策略趋于完善。土壤水分作为森林生态系统的主要水分蓄库,自然演替进程中其蓄水量的提升及稳定性增强,对保障森林生态系统结构的稳定与提高生态功能的发挥具有重要的意义。

4 结论

在雨热同期、干湿季明显的南亚热带地区,鼎湖山森林土壤储水量及其时间动态受降雨量的影响显著。从降雨量及森林土壤储水量的时间序列动态来看,土壤层对降雨具有强烈的调蓄作用,且伴随 PF→MF→MEBF 自然演替进程,调蓄水分能力逐步增强。且顶极群落 MEBF 相对于初级演替阶段 PF,土壤储水量均呈现为较小的年际与年内变幅,蓄水、保水能力突显。

从土壤水分含量及其空间格局来看,伴随自然演替进程,土壤含水量的规律性变化明显。林型间,由初期阶段 PF 到顶级群落 MEBF,森林生态系统土壤含水量逐渐提高,尤其是森林表层土壤。不同季节下,同一林型的土壤含水量垂直分布格局较为一致。从森林土壤含水量的时空变异性来看,伴随自然演替进程,其规律性变化也较明显。不同季节而言,PF、MF 和 MEBF 各土层土壤含水量的变异系数大小均表现为干季大于湿季;演替进程中的不同林型比较,林型间同一土层土壤含水量的变异系数大小关系表征大致为 PF>MF>MEBF。垂直剖面方向上,无论干湿季 MEBF 各层土壤含水量变异较缓和,充分体现了 MEBF 优越的土壤水分时空调配能力。

整体上,伴随 PF→MF→MEBF 自然演替进程,土壤水分储量、稳定性及水分调配策略趋于完善。

致谢:感谢中国生态系统研究网络鼎湖山森林生态系统定位站的大力支持。

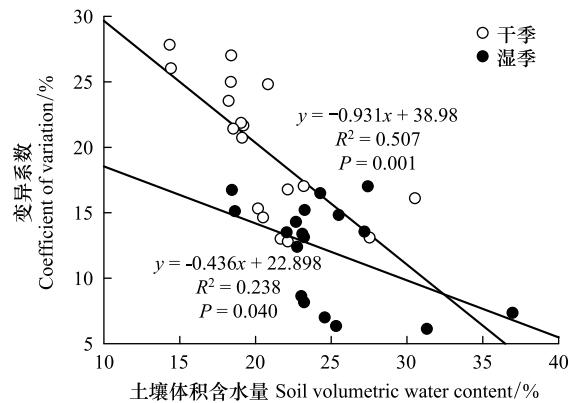


图 7 不同季节土壤体积含水量与变异系数的拟合关系

Fig. 7 The regression of soil volumetric water content and coefficient of variation in different seasons

参考文献(References) :

- [1] Zhang Y W, Deng L, Yan W M, Shangguan Z P. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2016, 137: 52-60.
- [2] 胡健, 吕一河, 张琨, 陶蕴之, 李婷, 任艳娇. 邶连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异. *生态学报*, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [3] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, Hollinger S E, Liu S X, Namkhai A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D9): 11865-11877.
- [4] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 100-107.
- [5] Wei Y J, Wu X L, Xia J W, Zeng R B, Cai C F, Wang T W. Dynamic study of infiltration rate for soils with varying degrees of degradation by water erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7(2): 167-175.
- [6] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 459-469.
- [7] Li X Y, Zhang S Y, Peng H Y, Hu X, Ma Y J. Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: Results from Inner Mongolia steppe ecosystem of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 20-30.
- [8] 徐丽宏, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山典型植被类型土壤水文生态功能研究. *林业科学研究*, 2012, 25(4): 456-463.
- [9] Liu Y L, Zhu G Y, Hai X Y, Li J W, Shangguan Z P, Peng C H, Deng L. Long-term forest succession improves plant diversity and soil quality but not significantly increase soil microbial diversity: Evidence from the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2020, 142: 105631.
- [10] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 78-84.
- [11] Venkatesh B, Lakshman N, Purandara B K, Reddy V B. Analysis of observed soil moisture patterns under different land covers in Western Ghats, India. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(3-4): 281-294.
- [12] Yu X N, Huang Y M, Li E G, Li X Y, Guo W H. Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, Northwest China. *Catena*, 2018, 161: 96-103.
- [13] Sun F X, Lü Y H, Wang J L, Hu J, Fu B J. Soil moisture dynamics of typical ecosystems in response to precipitation: A monitoring-based analysis of hydrological service in the Qilian Mountains. *Catena*, 2015, 129: 63-75.
- [14] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 张海林, 李向富, 杨叶, 王秋月, 黄建武. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响. *生态学报*, 2019, 39(13): 4844-4854.
- [15] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆. 2008-2014年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征. *生态学报*, 2019, 39(5): 1784-1794.
- [16] Lee E, Kim S. Wavelet analysis of soil moisture measurements for hillslope hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 82-93.
- [17] 李新乐, 吴波, 张建平, 辛智鸣, 董雪, 段瑞兵. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应. *生态学报*, 2019, 39(15): 5701-5708.
- [18] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. *水科学进展*, 2012, 23(3): 310-316.
- [19] 刘雅莉, 杜剑卿, 李锋, 高海宁, 胡聃. 微尺度下城市公园人造绿地土壤水分的时空分异格局及其驱动机制. *生态学报*, 2019, 39(18): 6794-6802.
- [20] Li X D, Shao M A, Zhao C L, Jia X X. Spatial variability of soil water content and related factors across the Hexi Corridor of China. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(1): 123-134.
- [21] Dari J, Morbidelli R, Saltalippi C, Massari C, Brocca L. Spatial-temporal variability of soil moisture: Addressing the monitoring at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 436-444.
- [22] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 高艳红. 不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 106-109.
- [23] Liu H, Zhao W Z, He Z B, Zhang L J. Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2389-2394.
- [24] 邵宜晶, 俞梦笑, 江军, 曹楠楠, 褚国伟, 闫俊华. 鼎湖山3种演替阶段森林土壤C、N、P现状及动态. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(6): 523-530.
- [25] Huang Y H, Li Y L, Xiao Y, Wenigmann K O, Zhou G Y, Zhang D Q, Wenigmann M, Tang X L, Liu J X. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1170-1177.
- [26] Li Y L, Yang F F, Ou Y X, Zhang D Q, Liu J X, Chu G W, Zhang Y R, Otieno D, Zhou G Y. Changes in forest soil properties in different successional stages in lower tropical China. *Plos One*, 2013, 8(11): e81359.
- [27] Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, Zhang D Q. Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages

- in South China. *Global Change Biology*, 2006, 12(5): 810-821.
- [28] 刘佩伶, 张倩媚, 刘效东, 刘世忠, 褚国伟, 张德强, 孟泽. 2002-2016年鼎湖山典型森林生态系统土壤含水量数据集. 中国科学数据, 2019, 4(4): 143-152
- [29] 赵永宏, 刘贤德, 张学龙, 牛贊, 赵维俊, 刘炳芳. 祁连山区亚高山灌丛土壤含水量的空间分布与月份变化规律. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 672-681.
- [30] Li L S, Gao X D, Wu P T, Zhao X N, Li H C, Ling Q, Sun W H. Soil water content and root patterns in a rain-fed jujube plantation across stand ages on the Loess Plateau of China. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(1): 207-216.
- [31] Brasil J B, Andrade E M D, Palácio H A D Q, Medeiros P H A, Santos J C N D. Characteristics of precipitation and the process of interception in a seasonally dry tropical forest. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 19: 307-317.
- [32] 尹光彩, 周国逸, 唐旭利, 张倩媚. 鼎湖山不同演替阶段的森林土壤水分动态. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(3): 62-68.
- [33] 廖超林, 傅灵艺, 盛浩, 袁红, 周清, 黄运湘, 张杨珠. 紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 111-119.
- [34] Haddix M L, Gregorich E G, Helgason B L, Janzen H, Ellert B H, Francesca Cotrufo M. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 2020, 363: 114160.
- [35] Razzaghi F, Plauborg F, Jacobsen S, Jensen C R, Andersen M N. Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 20-29.
- [36] 吕贻忠, 李保国. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2006: 15-37.
- [37] Sun C L, Liu G B, Xue S. Natural succession of grassland on the Loess Plateau of China affects multifractal characteristics of soil particle-size distribution and soil nutrients. *Ecological Research*, 2016, 31(6): 891-902.
- [38] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [39] Piaszczyk W, Lasota J, Błońska E. Effect of organic matter released from deadwood at different decomposition stages on physical properties of forest soil. *Forests*, 2020, 11(1): 24.
- [40] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. *生态学报*, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [41] 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. *植物生态学报*, 2011, 35(12): 1209-1218.