

Study on Forest Soil Moisture Physical Properties and Soil Water Holding Capacity in the Natural Reserve

Liming Huang¹, Tushou Luo^{2*}, Yongzhao Zhu¹, Luqiao Xiong¹, Ruiying Ye¹, Jie Chen², Han Xu², Yide Li²

¹Chenhedong Provincial Natural Reserve of Guangdong, Guangzhou Guangdong

²Jianfengling National Key Field Research Station for Tropical Forest Ecosystem Hainan Island, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou Guangdong
Email: *luots@126.com

Received: May 6th, 2019; accepted: May 24th, 2019; published: Jun. 6th, 2019

Abstract

The Chenhedong Natural Reserve of Guangdong Province is established to protect forest ecosystems, and consequently maintain the capacity of water and soil conservation. In order to clarify the water holding capacity of the forests, we investigated the soil moisture physical properties along a soil depth of 0~100 cm using ring sampler method. Results showed that: soil bulk density of the studied forest was very low, with the average value ranging from 0.94 g·cm⁻³ to 1.38 g·cm⁻³; soil non-capillary porosity fluctuated between 8% and 15%, and soil total porosity ranged from 45% to 56%. The soil statically saturated water holding capacity could be up to 4895 t·hm⁻²; soil non-capillary water holding capacity and soil absorption precipitation was 1105 t·hm⁻² and 2259 t·hm⁻², respectively, indicating a high water holding capacity of the forest ecosystems. Further, a stepwise regression analysis revealed that the water holding capacity was mainly determined by soil total porosity, non-capillary porosity, capillary porosity ratio, bulk density and Shannon-Weiner diversity of vegetation community.

Keywords

Soil Moisture Physical Properties, Soil Water Holding Capacity, Forest, Natural Reserve

保护区森林土壤水分物理性质及土壤涵蓄能力研究

黄力明¹, 骆土寿^{2*}, 朱永钊¹, 熊露桥¹, 叶瑞银¹, 陈洁², 许涵², 李意德²

¹广东从化陈禾洞省级自然保护区管理处, 广东 广州

作者简介: 黄力明(1983-), 男, 工程师; 主要从事自然保护区生态监测与管理。
*通讯作者。

文章引用: 黄力明, 骆土寿, 朱永钊, 熊露桥, 叶瑞银, 陈洁, 许涵, 李意德. 保护区森林土壤水分物理性质及土壤涵蓄能力研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(3): 280-289. DOI: 10.12677/jwrr.2019.83034

²中国林业科学研究院热带林业研究所, 海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广东 广州
Email: *luots@126.com

收稿日期: 2019年5月6日; 录用日期: 2019年5月24日; 发布日期: 2019年6月6日

摘要

广东陈禾洞省级自然保护区的主要保护对象是以涵养水源和保持水土为目的的森林生态系统。为摸清保护区森林土壤涵蓄水分能力, 采取土壤环刀法采集样品并分析了0~100 cm层次的土壤水分物理性质, 研究了土壤涵蓄水分能力。结果表明: 保护区森林土壤容重值较小, 变化在 $0.94\sim 1.38\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间; 非毛管孔隙变化在8%~15%之间, 总孔隙度则变化在45%~56%之间; 静态的土壤饱和持水量可达 $4895\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 非毛管持水量为 $1105\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 土壤涵蓄降水量为 $2259\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。表明陈禾洞保护区森林土壤具有良好的涵蓄水分能力。逐步回归分析表明土壤总孔隙度、非毛管/毛管孔隙度比例、土壤容重和森林群落Shannon-Weiner物种多样性指数, 是反映森林土壤涵蓄水分能力大小的主要因子。

关键词

土壤水分, 物理性质, 涵蓄能力, 森林, 保护区

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

森林生态系统最为重要的生态服务之一是其强大的涵养水源和调蓄水分功能, 它是一种调节服务[1] [2]。根据相关核算研究, 我国森林生态系统服务功能年总价值量达 10.01×10^4 亿元[3], 其中涵养水源价值(包括调蓄水量和净化水质)约占40%, 且南方地区的这个比重要比北方地区高, 如海南的生态公益林服务功能价值中, 涵养水源价值就占总价值量的48.32% [4]。森林土壤层不但是生态系统水分的天然储存和调节器, 也是天然水质净化器[5]。因此, 森林生态系统涵养水源功能特别是其对水分调节能力, 一直是森林生态学研究中的热点之一。近年来, 国内外对森林涵养水源功能的机理及过程研究较多[6], 在此基础上, 森林涵养水源的经济价值核算从定性研究向实物量和价值量的定量研究转变[7], 并开展了水源涵养林效益计量[8]和价值补偿方法的探讨[9]。而林地贮水量作为森林水源涵养的一个重要评价指标则是使用林地土壤非毛管孔隙饱和含水量来计算的[6], 但森林土壤因区域气候、植被和成土母岩等差异, 其土壤水分、密度、孔隙度及毛管持水量有明显的空间异质性[10], 小尺度取样测定原状土壤水分物理性是准确计量涵养水源能力的基础, 也是向大尺度流域计量转换的基础, 已成为21世纪森林水文生态学的重要研究内容[6]。

陈禾洞自然保护区位于广东省中部的广州市从化区吕田镇境内, 地理坐标 $23^{\circ}43'02''\sim 23^{\circ}48'10''\text{N}$, $113^{\circ}49'30''\sim 114^{\circ}01'50''\text{E}$, 面积 7054.36 hm^2 。保护区内建有与中国大亚湾核电站相配套的广州抽水蓄能电厂, 由分布在海拔280 m和820 m处建有蓄水的两个水库组成, 通过对上下水库抽水放水达到保证大亚湾电站的安全经济运行和满足广东电网填谷调峰的需要[11]。成立陈禾洞保护区的主要目的之一, 是为了保护和提升上下水库集雨范围内森林生态系统的涵养水源功能, 减少水土流失, 延长水库使用年限。但自1988年吕田抽水蓄能电站建成以及自2007年陈禾洞自然保护区成立至今, 尚未系统地开展过区内的森林土壤理化性质

及涵养水源能力等方面的研究。本文拟以保护区(特别是上下水库集雨区)内的主要森林为对象,从土壤水分物理性质出发,探讨保护区森林土壤的涵蓄水源能力,为自然保护区和水库的有效管理及生态价值评估及补偿提供科学依据。

2. 研究地概况

研究地位于广东从化陈禾洞省级自然保护区内(E113°49'30"~114°01'50", N23°43'02"~23°48'10"),地处广州市北面,是广州市流溪河的发源地。据陈禾洞保护区科学考察报告,该区属南亚热带季风气候,年平均气温 19.5℃~21.4℃,多年平均降雨量 2000 mm 左右,雨季(4~9 月)占全年降水的 80%以上;土壤类型主要有山地黄壤、山地红壤、赤红壤、灌丛草甸土等,土层深厚;区内的主要植被类型是以壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)等种类为主的南亚热带常绿阔叶林。

3. 研究方法

3.1. 样地设置及调查

于 2017 年 8 月至 2018 年 1 月,根据保护区最新的森林资源二类清查数据成果,在保护区不同地段按照相关标准[12]设立 14 个森林生物多样性长期监测固定样地,其中 2 个面积为 1 hm²的样地各分为 25 个 400 m²的样方;12 个面积为 1600 m²的样地各分为 4 个 400 m²的样方。植物调查起测胸径为≥1.0 cm。对 14 个固定样地调查及计算样地平均胸径、个体密度、胸高断面积和 Shannon-Wiener 物种多样性指数的结果显示,保护区的森林植被大多基本上为南亚热带常绿阔叶林,以樟科、壳斗科、金缕梅科(Hamamelidaceae)等的优势树种为主,只有 1705 号一个样地为针阔混交林,根据其主要物种组成特点,该林分为马尾松(*Pinus massoniana*)纯林向常绿阔叶林演替的过渡阶段。

3.2. 土壤取样与分析方法

在 2017 年 12 月至 2018 年 1 月的少雨季节,用土钻在各样地的每个样方的中心位置(样方面积 400 m²),按照相关标准分 0~10 cm、10~30 cm、30~60 cm 和 60~100 cm 等四个不同层次[13]钻取环刀土样;在固定样地面积为 1 hm²大样地的四周,还按照相同层次标准挖取四个位置的环刀土样。按照林业行业标准(LY/T 1215-1999)的环刀方法进行采样、制样和水分-物理性质的分析测定[14],共采集了 424 份土壤样品,测定的指标包括土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、土壤质量含水量、土壤最大持水量、田间持水量等指标。

3.3. 数据处理

所有数据采用 EXCEL 2016 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行处理。

4. 结果分析

4.1. 土壤物理性质基本特征

4.1.1. 土壤容重

由表 1 可看出,以常绿阔叶林为主的陈禾洞保护区森林土壤容重值均较小,0~100 cm 土层的加权平均值为 1.28 g·cm⁻³,不同样地之间的变化也不大。随土壤层次深度的增加,其容重值也逐渐增加,表层土壤(0~10 cm)的容重平均值最小,仅为 0.92 g·cm⁻³;10~30 cm 层土壤容重均值为 1.16 g·cm⁻³,而 30~60 cm 和 60~100 cm 土层的容重值相当,分别为 1.36 和 1.37 g·cm⁻³。总之,土壤容重较小说明该保护区森林土壤疏松,具有较好的透气性能,有利于土壤水分存留和有机质(有机碳)的积累。

Table 1. Soil bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) of different soil depth at the 14 permanent sample plots and the multiple comparison results by using the Duncan method**表 1.** 14 个样地不同层次土壤容重(单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)及其 Duncan 多重比较

样地号 Plot number	土层深度 Soil depth				0~100cm 加权平均值 Weighted average value (0~100 cm)
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	60~100 cm	
1701	0.93 ± 0.18 ^{bcd}	1.24 ± 0.19 ^{bc}	1.44 ± 0.19 ^{cde}	1.49 ± 0.20 ^e	1.38 ± 0.19
1702	0.95 ± 0.14 ^{bcd}	1.19 ± 0.24 ^{bc}	1.40 ± 0.21 ^{cde}	1.45 ± 0.22 ^e	1.33 ± 0.20
1703	0.88 ± 0.13 ^{abcd}	1.20 ± 0.18 ^{bc}	1.48 ± 0.11 ^{de}	1.49 ± 0.27 ^e	1.37 ± 0.17
1704	1.09 ± 0.11 ^d	1.10 ± 0.14 ^{abc}	1.26 ± 0.38 ^{abcde}	1.33 ± 0.43 ^{bc}	1.24 ± 0.27
1705	0.95 ± 0.20 ^{bcd}	1.20 ± 0.22 ^{bc}	1.17 ± 0.07 ^{a^{bc}}	1.28 ± 0.20 ^{abc}	1.20 ± 0.17
1706	0.76 ± 0.02 ^{ab}	0.79 ± 0.11 ^a	1.08 ± 0.22 ^{ab}	0.95 ± 0.14 ^a	0.94 ± 0.12
1707	1.03 ± 0.26 ^{cd}	0.96 ± 0.28 ^{abc}	1.18 ± 0.15 ^{abcd}	1.17 ± 0.26 ^{abc}	1.12 ± 0.24
1708	0.90 ± 0.14 ^{abcd}	1.27 ± 0.18 ^c	1.27 ± 0.19 ^{abcde}	1.30 ± 0.16 ^{bc}	1.24 ± 0.17
1709	0.82 ± 0.15 ^{abc}	1.24 ± 0.36 ^{bc}	1.40 ± 0.13 ^{cde}	1.33 ± 0.17 ^{bc}	1.28 ± 0.20
1710	0.89 ± 0.08 ^{abcd}	0.84 ± 0.19 ^a	1.00 ± 0.11 ^a	1.00 ± 0.25 ^{ab}	0.96 ± 0.16
1711	0.67 ± 0.10 ^a	0.92 ± 0.31 ^{ab}	1.30 ± 0.15 ^{bcde}	1.26 ± 0.18 ^{abc}	1.15 ± 0.19
1712	0.85 ± 0.14 ^{abcd}	1.27 ± 0.13 ^c	1.34 ± 0.20 ^{bcde}	1.28 ± 0.26 ^{abc}	1.25 ± 0.18
1713	0.90 ± 0.04 ^{abcd}	1.09 ± 0.13 ^{abc}	1.48 ± 0.04 ^e	1.18 ± 0.12 ^{abc}	1.22 ± 0.08
1714	1.01 ± 0.13 ^{cd}	1.19 ± 0.13 ^{bc}	1.44 ± 0.07 ^{cde}	1.40 ± 0.18 ^c	1.33 ± 0.13
平均值	0.92 ± 0.16	1.16 ± 0.24	1.36 ± 0.22	1.37 ± 0.25	1.28

注: 小写字母表示同一层次土壤容重在不同样地之间的差异显著性检验($p < 0.05$)。

4.1.2. 土壤空隙

土壤非毛管孔隙即大孔隙, 经常充满空气, 但在土壤中重力水大量存在时, 会被水填充, 因此有学者将其看作是土壤蓄水能力的指标, 可反映和评价森林水源涵养和调节水分循环能力[15]; 土壤毛管孔隙又称小孔隙, 是土壤水分贮存和水分运动的空间, 也称为“土壤持水孔隙”, 它反映了土壤对有效水分的固持能力[16]; 而总孔隙则是非毛管孔隙和毛管孔隙之和。陈禾洞保护区 14 个森林样地土壤孔隙状况详见表 2。

Table 2. Soil capillary porosity (%) and non-capillary porosity (%) of different soil depth at the 14 permanent sample plots and the multiple comparison results by using the Duncan method**表 2.** 14 个样地不同层次土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度(单位: %)及其 Duncan 多重比较

样地号 Plot number	毛管孔隙度/% Capillary porosity/%				非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity/%			
	土层 Soil depth	土层 Soil depth	土层 Soil depth	土层 Soil depth	土层 Soil depth	土层 Soil depth	土层 Soil depth	土层 Soil depth
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	60~100 cm	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	60~100 cm
1701	44.04 ± 7.91b ^{cd}	43.99 ± 8.04 ^{bc}	35.76 ± 4.31 ^{bc}	33.58 ± 4.77 ^b	14.49 ± 5.67 ^{abc}	7.10 ± 4.65 ^{abc}	6.39 ± 5.84a ^{bc}	6.07 ± 5.84 ^{ab}
1702	42.24 ± 7.90 ^{bcd}	39.86 ± 6.43 ^{bc}	35.89 ± 5.70 ^{bc}	32.67 ± 4.82 ^b	13.28 ± 5.32 ^{ab}	10.39 ± 6.85 ^{abcd}	7.91 ± 6.37a ^{bc}	8.49 ± 6.22 ^{abc}
1703	44.86 ± 6.17 ^{bcd}	43.46 ± 8.89 ^{bc}	37.16 ± 2.21 ^{bcd}	32.78 ± 1.88 ^b	12.16 ± 4.22 ^{ab}	6.43 ± 4.87 ^{ab}	3.56 ± 2.66a ^b	4.33 ± 3.44 ^{ab}
1704	43.27 ± 5.67b ^{cd}	42.10 ± 7.80 ^{bc}	32.34 ± 5.93 ^b	30.06 ± 5.65 ^b	11.99 ± 7.21 ^{ab}	7.87 ± 7.17 ^{abc}	11.12 ± 11.61 ^{abcd}	9.20 ± 8.65 ^{abc}
1705	26.21 ± 1.21 ^a	24.66 ± 7.98 ^a	20.97 ± 4.92 ^a	22.43 ± 6.92 ^a	25.52 ± 3.95 ^d	18.34 ± 8.69 ^d	16.89 ± 1.78 ^d	20.91 ± 12.87 ^d
1706	43.24 ± 2.65 ^{bcd}	45.37 ± 5.82 ^{bc}	41.40 ± 5.93 ^{cde}	33.09 ± 3.83 ^b	14.55 ± 3.05 ^{abc}	16.23 ± 5.89 ^{bcd}	12.04 ± 7.25 ^{bcd}	17.03 ± 2.61 ^{cd}

Continued

1707	39.91 ± 4.78 ^{bcd}	38.94 ± 10.72 ^{bc}	38.37 ± 4.04 ^{bcd}	36.67 ± 6.50 ^{bc}	13.03 ± 8.82 ^{ab}	16.70 ± 13.25 ^{cd}	12.32 ± 5.66 ^{bcd}	13.29 ± 9.21 ^{abcd}
1708	34.79 ± 5.71 ^{ab}	43.81 ± 6.46 ^{bc}	37.97 ± 4.65 ^{bcd}	35.45 ± 3.99 ^{bc}	22.16 ± 3.98 ^{cd}	4.27 ± 1.18 ^a	9.60 ± 5.42 ^{abcd}	9.93 ± 6.54 ^{abc}
1709	43.53 ± 10.16 ^{bcd}	36.74 ± 7.17 ^b	39.72 ± 2.92 ^{cd}	37.55 ± 5.46 ^{bc}	10.51 ± 4.73 ^a	12.11 ± 6.78 ^{abcd}	7.48 ± 3.46 ^{abc}	10.64 ± 7.42 ^{abc}
1710	49.19 ± 6.41 ^d	43.31 ± 10.91 ^{bc}	43.89 ± 5.87 ^{de}	42.07 ± 8.76 ^{cd}	10.18 ± 3.36 ^a	13.24 ± 7.12 ^{abcd}	14.95 ± 6.88 ^{cd}	10.65 ± 7.09 ^{abc}
1711	47.83 ± 1.04 ^{cd}	50.31 ± 10.94 ^{bc}	47.33 ± 4.21 ^e	44.57 ± 2.44 ^d	15.04 ± 1.44 ^{abc}	9.76 ± 9.92 ^{abcd}	2.58 ± 0.77 ^a	3.47 ± 1.72 ^a
1712	36.74 ± 7.79 ^{bc}	45.52 ± 7.21 ^{bc}	38.02 ± 2.06 ^{bcd}	35.44 ± 1.17 ^{bc}	19.70 ± 6.80 ^{bcd}	4.72 ± 2.00 ^a	9.16 ± 4.33 ^{abcd}	11.33 ± 7.56 ^{abc}
1713	37.46 ± 5.64 ^{bc}	38.98 ± 7.78 ^{bc}	38.10 ± 2.71 ^{bcd}	33.87 ± 2.85 ^b	14.86 ± 1.54 ^{abc}	13.32 ± 9.65 ^{abcd}	4.04 ± 1.78 ^{ab}	14.46 ± 6.41 ^{bcd}
1714	37.96 ± 2.89 ^{bc}	42.65 ± 1.82 ^{bc}	42.09 ± 2.48 ^{cde}	36.13 ± 4.62 ^{bc}	12.54 ± 1.58 ^{ab}	7.21 ± 2.99 ^{abc}	4.08 ± 2.34 ^{ab}	7.12 ± 4.36 ^{abc}
平均值	40.80 ± 5.42	41.41 ± 7.71	37.79 ± 4.14	34.74 ± 4.55	15.00 ± 4.41	10.55 ± 6.50	8.72 ± 4.72	10.49 ± 6.42

注：小写字母表示同一层次土壤孔隙度在不同样地之间的差异显著性检验($p < 0.05$)。

由表2可看出,陈禾洞保护区森林土壤各层次的毛管孔隙度变化在34%~42%之间,非毛管孔隙变化在8%~15%之间,总孔隙度则变化在45%~56%之间。各孔隙度结果与同纬度带的广东白盆珠水库水源林土壤的孔隙度相近[17],与北方沙地森林土壤相比,总孔隙度一般要大5~10个百分点[18],说明森林土壤涵蓄土壤水分能力较强。

4.2. 土壤水分涵蓄能力

4.2.1. 自然持水量

由于本研究取样时间为旱季,其土壤自然含水量可认为是在自然状态下土壤含水量的较低值,如果土壤长时间得不到补水,那么土壤自然持水量可能会小于最小田间持水量,对地面上的植物生长产生不利影响。从表3可知,陈禾洞保护区森林土壤在旱季的自然持水量(4个土壤层次之和的静态值,下同)大致变化在1600~3300 t·hm⁻²之间,对照表1样地数据,发现处于马尾松针阔混交林演替阶段的林分(1705号样地),其土壤的自然持水量最小,反映了林地土壤水分下渗或地面蒸发强度大,储蓄在土壤中的水分较少;而在常绿阔叶林样地中,基本上变化在2200~3200 t·hm⁻²之间,其土壤保水能力明显比针阔混交林强。

Table 3. Soil water holding capacity (t·hm⁻²) along the soil depth from 0 cm to 100 cm at the 14 permanent sample plots and the multiple comparison results by using the Duncan method

表 3. 14 个样地 100 cm 厚土壤水分涵蓄能力(t·hm⁻²)及 Duncan 多重比较

样地号 Plot number	自然持水量 Natural water holding capacity	饱和持水量 Saturated water holding capacity	田间持水量 Field water holding capacity	非毛管持水量 Non-capillary water holding capacity	毛管持水量 Capillary water holding capacity	土壤涵蓄降水量 Soil absorption precipitation	土壤有效涵蓄量 Effective soil water storage amount
1701	2801.22 ^{bcd}	4621.07 ^{abc}	3602.31 ^b	802.28 ^{abc}	3818.77 ^b	1819.85	1017.55
1702	2465.58 ^{bc}	4638.18 ^{abc}	3420.62 ^b	971.29 ^{abcd}	3666.89 ^b	2172.60	1201.31
1703	3215.80 ^d	4437.00 ^{ab}	3587.55 ^b	616.30 ^a	3820.70 ^b	1221.20	604.90
1704	3142.85 ^d	4543.95 ^{abc}	3353.35 ^b	987.45 ^{abcd}	3556.50 ^b	1401.10	413.65
1705	1636.61 ^a	4385.05 ^a	2161.90 ^a	2051.20 ^e	2333.85 ^a	2748.44	697.24
1706	2730.55 ^{bcd}	5461.50 ^f	3752.10 ^{bc}	1537.65 ^d	3923.85 ^{bc}	2730.95	1193.30
1707	2598.70 ^{bcd}	5183.85 ^{def}	3566.45 ^b	1372.65 ^{cd}	3811.25 ^b	2585.15	1212.55
1708	2595.13 ^{bcd}	4867.15 ^{abcd}	3549.40 ^b	1118.00 ^{abcd}	3749.15 ^b	2272.02	1154.02
1709	2226.54 ^b	4929.30 ^{bcd}	3664.65 ^b	1027.40 ^{abcd}	3901.90 ^{bc}	2702.76	1675.36
1710	2961.65 ^{cd}	5603.80 ^f	4199.65 ^{cd}	1193.15 ^{abcd}	4410.65 ^{cd}	2642.15	1449.00

Continued

1711	2635.81 ^{bcd}	5387.30 ^{ef}	4513.85 ^d	686.35 ^{ab}	4691.95 ^d	2751.49	2056.14
1712	2669.80 ^{bcd}	4947.95 ^{cde}	3618.35 ^b	1124.75 ^{abcd}	3823.20 ^b	2278.15	1153.40
1713	2455.95 ^{bc}	4868.30 ^{abcd}	3469.95 ^b	1222.85 ^{bcd}	3645.45 ^b	2412.35	1189.50
1714	2765.90 ^{bcd}	4660.55 ^{abc}	3656.20 ^b	761.35 ^{ab}	3899.20 ^{bc}	1894.65	1133.30
平均值	2635.86	4895.35	3579.74	1105.19	3789.52	2259.49	1153.66

注：小写字母表示同一层次土壤水分涵蓄能力在不同样地之间的差异显著性检验($p < 0.05$)。

4.2.2. 非毛管持水量和毛管持水量

陈禾洞保护区森林土壤非毛管持水量值变化较大(表 3), 14 个样地变动在 600~2100 t·hm⁻² 之间, 平均值为 1105.19 t·hm⁻², 其中处在针阔混交林演替阶段的 1705 号样地, 其非毛管持水量达 2051.20 t·hm⁻²。如果将非毛管持水量认为是土壤有效涵养水分的指标[15][19], 那么陈禾洞保护区森林土壤的涵蓄能力是很强的, 要高于同地区流溪河的常绿阔叶林、竹林和荔枝林[20]。

毛管持水量的平均值为 3789.52 t·hm⁻², 最大值可达 4691.95 t·hm⁻², 而最小值只有 2333.85 t·hm⁻², 前者是后者的 2.01 倍, 最小值也是出现在针阔混交林的 1705 号样地, 说明不同林分类型的土壤涵蓄能力有较大的差异[20]。

4.2.3. 饱和持水量和田间持水量

由表 3 可知, 陈禾洞保护区森林土壤的饱和持水量(最大持水能力)较大, 平均达到了 4895.35 t·hm⁻², 最大可达 5461.50 t·hm⁻², 同样, 针阔混交林的最大持水能力也是最小的, 只有 4385.05 t·hm⁻²。田间持水量平均值为 3579.74 t·hm⁻², 同样也是针阔混交林的田间持水量最小, 只有 2161.90 t·hm⁻², 仅为最大田间持水量的 48%。

4.2.4. 土壤涵蓄降水量和土壤有效涵蓄量

土壤非毛管持水量被认为是涵蓄水分能力的指标[15][19], 但也有学者将土壤饱和持水量和自然持水量的差值看作为在当时的测定条件下的“土壤涵蓄降水量”指标, 并将毛管持水量与自然持水量之差值看作为土壤的“有效涵蓄量”指标[11]。陈禾洞保护区森林土壤涵蓄降水量指标平均值为 2259.49 t·hm⁻², 是非毛管持水量平均值的 2.04 倍, 而土壤有效涵蓄量平均值为 1153.66 t·hm⁻², 与非毛管持水量平均值相当, 但各样地之间的变化很大, 没有较为一致的变化规律(表 3)。

4.3. 影响森林土壤涵蓄水分能力因子分析

森林生态系统涵养水源生态功能已成为生态服务功能的主体[3][4], 而森林土壤涵蓄水分的能力大小, 一方面是土壤本身的结构是否有利于水分的涵蓄, 另一方面, 林地上的森林植被对土壤水分的吸收利用以及植物根系对土壤结构的改良, 也深刻影响着森林土壤的涵蓄能力。本文选取对土壤涵蓄能力密切相关的土壤容重(按土层厚度加权)、土壤总孔隙度(百分比数据)和土壤非毛管与毛管孔隙度的比值(百分比数据)等 3 项土壤结构因子, 以及林地上的木本植物平均胸径(胸径 1 cm 及以上的乔灌木种类平均值)、植株个体密度(单位林地面积中胸径 1 cm 及以上乔灌木个体总量)、胸高断面积和(单位林地面积胸径 1 cm 及以上乔灌木胸高断面积之和)和 Shannon-Wiener 物种多样性指数等 4 项森林植被因子, 以土壤涵蓄能力的三项指标为因变量: 土壤涵蓄降水量、土壤有效涵蓄量和非毛管持水量, 进行逐步回归分析, 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 3 项土壤涵蓄水分能力指标中, 均以土壤结构指标的影响最为显著。总孔隙度反映的是土壤中全部孔隙容积与土体容积的比例关系, 直接与土壤水分的存贮、传输有关[20], 因此在 3 项土壤涵蓄水分能力指标的逐步回归分析中, 都入选为重要的影响因子。非毛管孔隙是土壤快速贮水和调蓄水量的场所, 毛管孔隙

Table 4. Stepwise regression analysis explaining the forest soil water holding capacity in the Natural Reserve by using soil physical properties and vegetation features**表 4.** 陈禾洞保护区森林土壤涵蓄能力与土壤物理特性及森林植被因子的逐步回归分析*

土壤涵蓄水分 评价指标 Soil water holding capacity index	模型检验 Model evaluation		常量 Constant		总孔隙度/% Total porosity/%		非毛管/毛管孔隙 度比值 Ratio of non-capillary porosity: capillary porosity		容重加权均值 Weighted average value of soil bulk density		群落 Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index of vegetation community	
	R ²	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P
	涵蓄降水量	0.811	0.001	-11887.68	0.018	188.70	0.002	24.81	0.001	1669.15	0.047	
有效涵蓄量	0.474	0.007	-2112.34	0.056	68.01	0.07						
非毛管持水量	0.985	0.000	-1520.49	0.000	30.43	0.000	22.43	0.000			135.75	0.001

*: R²为模型复相关指数; B为逐步回归模型系数; p为模型常量和各入选因子的显著性检验阈值(p < 0.05)。

则是土壤中水分流通和蒸发的孔道,对植物生长具有重要意义[20],因此,森林土壤非毛管孔隙度与毛管孔隙度的比值,就反映了土壤水分在涵蓄水量和供给植物生理性用水能力之间的一种权衡关系,故这个比值因子就与土壤涵蓄降水量和非毛管持水量这2个指标的关系非常密切。土壤容重是综合反映土壤的透水性、通气性和根系生长阻力的重要因子[20],应当说与土壤涵蓄水分能力是密切相关的,但本研究案例中却只与土壤涵蓄降水量这一个指标有较为紧密的关系,究其原因可能是陈禾洞保护区所设立的14个样地,一是在空间尺度上变化并不大,二是其森林植被类型除一个样地为针阔叶混交林外,其余样地都是常绿阔叶林,林分类型相同,所以土壤容重并没有成为影响土壤涵蓄水分能力的主要因子。在4个植被因子中,乔木灌木植物平均胸径、植株个体数量和胸高断面积之和等指标均没有达到显著影响土壤涵蓄水分能力的程度,但Shannon-Weiner物种多样性指数则是影响非毛管持水量指标的因子,其原因可能是物种多样性指数高的群落,其生态位不同,可能同时存在有深根系和浅根系的植物,可以直接影响非毛管与毛管孔隙度及其比值,从而成为非毛管持水量指标的影响因子之一。另外,从3个涵蓄能力指标的逐步回归模型检验结果来看(表4),非毛管持水量作为评价指标能更好地反映森林植被和土壤的涵蓄水分能力,根据土壤总孔隙度、非毛管/毛管孔隙度比例和森林群落Shannon-Wiener多样性指数等三个因子,即可评价某一个小范围内的森林土壤涵蓄水分能力。

5. 结论与讨论

广东从化陈禾洞省级自然保护区的设立主要有两大功能作用,一是保护广州市的母亲河——流溪河的水量水质,二是保护广州抽水蓄能电站上下水库的安全运行,延长水库使用寿命。因此,保护区的森林植被具有重要的涵养水源和控制水土流失等生态功能作用。本研究结论如下。

1) 自上世纪80年代末广东吕田抽水蓄能电站建立以及陈禾洞省级自然保护区正式成立以来,森林植被得到了有效保护,形成了以地带性常绿阔叶林为主的天然植被生态系统,少量马尾松纯林已演替成为有较多阔叶树成分的针阔混交林,森林涵养水源和保持水土的基础条件良好。

2) 保护区森林土壤具有良好的水分物理性质。土壤容重平均值为1.28 g·cm⁻³ (0~100cm土壤层加权均值),各样地变化在0.94~1.38 g·cm⁻³之间;土壤表层容重最小(0.92 g·cm⁻³),随土层加深其容重值逐渐增大,但30~60cm土层和60~100cm土层相差不大。反映了保护区森林土壤较为疏松。森林土壤各层次的毛管孔隙度变化在34%~42%之间,非毛管孔隙变化在8%~15%之间,总孔隙度则变化在45%~56%之间,与其他研究案例相比,总孔隙度值处在较高水平,表明土壤涵蓄水分能力较好。

3) 保护区森林土壤(100cm厚土层)的饱和持水量较高,平均静态持水量可达4895 t·hm⁻²;田间持水量平均值为3580 t·hm⁻²;非毛管持水量变动在600~2100 t·hm⁻²之间,平均值为1105 t·hm⁻²;森林土壤涵蓄降水量指标

平均值为 $2259 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，是非毛管持水量平均值的 2.04 倍，而土壤有效涵蓄量平均值为 $1153.66 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，与非毛管持水量平均值相当。

4) 逐步回归分析表明，反映保护区森林土壤涵蓄水分能力大小的因子有土壤总孔隙度、非毛管/毛管孔隙度比例、土壤容重加权均值和森林植被(群落)的物种 Shannon-Weiner 多样性指数。

5) 保护区的森林植被，现已大多恢复为次生常绿阔叶林，从样地调查数据来看(另文发表)，群落演替进程良好，径级结构合理，呈倒“J”型，具有与云南亚热带中山湿性常绿阔叶林[21]和海南热带山地雨林[22]等原始森林类型相同的径级结构，但因其树木的最大胸径仅有 62.3 cm， $\geq 50 \text{ cm}$ 的大径级树木株数仅占总株数的 0.036%， $\geq 60 \text{ cm}$ 的仅占 0.012%；与亚热带中山湿性常绿阔叶林(胸径 $\geq 50 \text{ cm}$)的 2.2% [21]和热带山地雨林(胸径 $\geq 60 \text{ cm}$)的 0.323% [22]相比，保护区森林大径级树木要少得多，分别只有这两类原始森林大径级树木的 1.64%和 3.72%。从群落的胸高断面积(Basal Area, BA)来看，保护区的森林群落 BA 为 $25.0 \text{ m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而亚热带中山湿性常绿阔叶林达 $61.0 \text{ m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ ，热带山地雨林则为 $55.0 \text{ m}^2\cdot\text{hm}^{-2}$ ，分别是陈禾洞保护区森林的 2.44 倍和 2.20 倍。由此可以看出，陈禾洞的常绿阔叶林虽然具有良好的径级结构，但群落中大径级树木数量极少，森林群落仍处于演替的早期至中期阶段，群落的生态功能仍在提升之中。因此，应继续加大对陈禾洞保护区森林生态系统的保护力度，这不仅对生物多样性的维持和保育有重要意义，而且对森林土壤涵蓄水分能力的提升也具有重要的促进作用。

致 谢

参与工作的还有中国林业科学研究院热带林业研究所陈德祥副研究员、周璋助理研究员、吴建辉和张霞以及陈禾洞保护区的技术人员。

基金项目

本论文由广东省林业发展及保护专项资金项目(2016)、科技部科技基础性工作专项(2014FY120700)和海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站运行费项目(2017)资助。

参考文献

- [1] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640. OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, ZHAO Jingzhu, et al. Ecosystem services and their economic valuation. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635-640. (in Chinese)
- [2] 赵金龙, 王烁鑫, 韩海荣, 等. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2229-2237. ZHAO Jinlong, WANG Luoxin, HAN Hairong, et al. Research advances and trends in forest ecosystem services value evaluation. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2229-2237. (in Chinese)
- [3] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153. WANG Bing, REN Xiaoxu and HU Wen. Assessment of forest ecosystem services value in China. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(2): 145-153. (in Chinese)
- [4] 李意德, 杨众养, 陈德祥, 等. 海南生态公益林生态服务功能价值评估研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 121-122. LI Yide, YANG Zhongyang, CHEN Dexiang, et al. Evaluation of the ecological service function and value for public welfare forest on Hainan Island, China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [5] 陈步峰, 周光益, 骆士寿, 等. 流溪河水源林流域径流水化学含量及评价[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 21-26. CHEN Bufeng, ZHOU Guangyi, LUO Tushou, et al. Study on the hydrochemistry and appraising of runoff in the forest watershed of Liuxihe. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(4): 18-23. (in Chinese)
- [6] 高甲荣, 肖斌, 张东升, 等. 国外森林水文研究进展述评[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 60-64+75. GAO Jiarong, XIAO Bin, ZHANG Dongsheng, et al. Review on forest hydrology study in world. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5): 60-64+75. (in Chinese)
- [7] 石小亮, 张颖. 森林涵养水源研究综述[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(3): 332-336. SHI Xiaoliang, ZHANG Ying. Review of forest water conservation. Resource Development & Market, 2015, 31(3): 332-336. (in Chinese)

- [8] 陈伟, 李山东, 薛立. 水源涵养林的功能和效益综述[J]. 山西林业科技, 2004(2): 17-20+29.
CHEN Wei, LI Shandong and XUE Li. Reviews on function and advantages of water-conservation forest. Shanxi Forestry Science and Technology, 2004(2): 17-20+29. (in Chinese)
- [9] 王永安, 黄金玲, 李晓明, 等. 广州市流溪河林场公益林涵水能力及其补偿的研究[J]. 中南林业调查规划, 1994(1): 25-30.
WANG Yong'an, HUANG Jinling, LI Xiaoming, et al. Study on water conservation function of public forest and ecological compensation in Liuxihe forest farm, Guangzhou. South-Central Forest Inventory and Planning, 1994(1): 25-30. (in Chinese)
- [10] 时雷雷, 骆土寿, 许涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 285-293.
SHI Leilei, LUO Tushou, XU Han, et al. The fine scale spatial heterogeneity of soil physical properties in a primary tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China. Forest Research, 2012, 25(3): 285-293. (in Chinese)
- [11] 司徒湛. 广州抽水蓄能电站在广东电网中的作用及经济性分析[J]. 水力发电, 1995(8): 15-20+60.
SITU Zhan. Functions of Guangzhou Pumped-Storage Power Plant in Guangdong Power Network and its economic analysis. Water Power, 1995(8): 15-20+60. (in Chinese)
- [12] 李意德, 何克军, 许涵, 等. DB44/T1792-2015, 广东省自然保护区维管束植物多样性调查与监测技术规范. 广州: 广东省质量技术监督局, 2015.
LI Yide, HE Kejun, XU Han, et al. DB44/T1792-2015, technical specification on survey and monitoring vascular plant diversity in nature reserve. Guangzhou: Guangdong Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2015. (in Chinese)
- [13] 李意德, 何克军, 陈德祥, 等. DB44/T1791-2015, 自然保护区主要生态因子监测技术规范. 广州: 广东省质量技术监督局, 2015.
LI Yide, HE Kejun, CHEN Dexiang, et al. DB44/T1791-2015, technical specification on monitoring main ecological factors in nature reserve. Guangzhou: Guangdong Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2015. (in Chinese)
- [14] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. LY/T1215-1999, 森林土壤水分-物理性质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
ZHANG Wanru, YANG Guangying, TU Xingnan, et al. LY/T1215-1999, determination of forest soil water-physical properties. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
- [15] 钟梁, 高友英, 孙浩, 等. 抚河上游生态公益林 4 种森林类型枯落物层和土壤层水文效应[J]. 南方林业科学, 2017, 45(6): 5-8.
LIANG Zhong, GAO Youying, SUN Hao, et al. Hydrological effects of litters layer and soil layer in the four kinds of forest types of ecological forest in the upper reaches of Fuhe River, Jiangxi Province. South China Forestry Science, 2017, 45(6): 5-8. (in Chinese)
- [16] 王贵霞, 李传荣, 许景伟, 等. 沙质海岸 5 种植被类型土壤物理性状及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 142-146.
WANG Guixia, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al. Soil properties and water conservation function of 5 types of vegetation on sandy coast. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 42-46. (in Chinese)
- [17] 骆土寿, 李意德, 陈德祥, 等. 广东白盆珠水库水源林土壤水源涵养能力研究[J]. 生态科学, 2007, 26(2): 159-164.
LUO Tushou, LI Yide, CHEN Dexiang, et al. Study on the soil water conservation capacities of water conservation forest in Baipenzhu reserve of Guangdong Province. Ecologic Science, 2007, 26(2): 159-164. (in Chinese)
- [18] 曹恭祥, 季蒙, 朱静泓, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松林土壤物理性质及其水文功能研究[J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(2): 1-6.
CAO Gongxiang, JI Meng, ZHU Jinghong, et al. Study of soil physical properties and hydrological functions of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Hulun Buir Sandy Land. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2018, 44(2): 1-6. (in Chinese)
- [19] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
Department of Science and Technology, Ministry of Forestry. Long-term research methods of forest ecosystem. Beijing: Science and Technology of China Press, 1994. (in Chinese)
- [20] 邱治军, 曾震军, 周光益, 等. 流溪河小流域 3 种林分的土壤水分物理性质[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 62-66.
QIU Zhijun, ZENG Zhenjun, ZHOU Guangyi, et al. Soil moisture physical characteristics of three types of forest in Liuxihe small water shed. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 34(3): 62-66. (in Chinese)
- [21] 温韩东, 林露湘, 杨洁, 等. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林 20 hm² 动态样地的物种组成与群落结构[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 419-429.
WEN Handong, LIN Luxiang, YANG Jie, et al. Species composition and community structure of a 20 hm² plot of mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest on the Mts. Ailaoshan, Yunnan Province, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(4): 419-429. (in Chinese)

- [22] 许涵, 李意德, 林明献, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 ha 动态监测样地群落结构特征[J]. 生物多样性, 2015, 23(2): 192-201.
XU Han, LI Yide, LI Mingxian, et al. Community characteristics of a 60 ha dynamics plot in the tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island. Biodiversity Science, 2015, 23(2): 192-201. (in Chinese)