

广东流溪河5种林分的枯落物与土壤持水性*

杨 玥 方建波 刘小玲 陈红跃

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要 文章以流溪河林场5种不同林分为研究对象,分析其枯落物和土壤持水特性。结果表明:(1)5种林分枯落物持水能力表现为:荔枝(*Litchi chinensis*)林>针阔混交林>杉木林>阔叶混交林>毛竹林;(2)5种林分0~60 cm土壤容重随土层深度增加而增大,60 cm土层平均容重大小依次为:毛竹林<针阔混交林<阔叶混交林<杉木林<荔枝林;(3)5种林分土壤总孔隙度平均大小依次为毛竹林>针阔混交林>阔叶混交林>杉木林>荔枝林;(4)5种林分土壤贮水量大小为毛竹林>针阔混交林>荔枝林>杉木林>阔叶混交林。总体而言,荔枝林枯落物持水性最好,毛竹林土壤持水性最强。

关键词 流溪河; 枯落物; 土壤物理性质; 持水性

中图分类号: S714 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053(2018)02-0090-06

Water-holding Capacity of Litter and Soil in Five Types of Forests in Liuxihe

YANG Yue FANG Jianbo LIU Xiaoling CHEN Hongyue

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract In this paper, five types of forest stand in Liuxihe forest farm were selected as research objects to analyze the water-holding capacity of litter and soil. The results showed that: (1) The water-holding capacity of litter showed as follows: Litchi forest > coniferous-broadleaved mixed forest > Chinese fir forest > broad-leaved mixed forest > Moso bamboo forest. (2) Soil bulk density in 0 ~ 60 cm depth of five kinds of forest stand increased with the depth of soil layer increasing. The order in 60 cm was: Moso bamboo forest < coniferous-broadleaved mixed forest < broad-leaved mixed forest < Chinese fir forest < Litchi forest. (3) The order of the total soil porosity of five stands was Moso bamboo forest > coniferous-broadleaved mixed forest > broad-leaved mixed forest > Chinese fir forest > Litchi forest. (4) The order of the soil water-holding capacity of five stands was Moso bamboo forest > coniferous-broadleaved mixed forest > Litchi forest > Chinese fir forest > broad-leaved mixed forest. In general, the water-holding capacity of litter in Litchi forest was the best, and the water-holding capacity of Moso bamboo forest was the strongest.

Key words Liuxihe; litter; soil physical characteristics; water-holding capacity

森林是最大的陆地生态系统,由于全球水资源环境不断恶化,森林的水源涵养功能一直以来备受关注^[1]。枯落物层和土壤层作为森林发挥水

文效应的第二、三层次,是森林生态系统最重要、最基础的组成部分^[2-3]。森林枯落物和土壤通过对大气降水进行再分配,将降水由入渗转化为地下

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目“森林高效可持续经营模式研究与示范”(2014KJ CX015、2017KJ CX010)。

第一作者: 杨玥(1994—),女,硕士研究生,研究方向为森林培育, E-mail: 964387201@qq.com。

通信作者: 陈红跃(1964—),男,教授,主要从事森林培育研究, E-mail: chenryue@scau.edu.cn。

水，以减少地表径流，缓解雨季降水的汇集，从而实现其水文生态功能，成为联系地表水与地下水的重要纽带，为陆地植物的生存提供保障。不同林分类型由于树种组成、林分结构等存在差异，枯落物和土壤的物理性质间的也具有差异，直接影响枯落物和土壤水分的贮存量与贮存方式，关系到森林涵养水源能力的强弱^[4-13]。本文以广东流溪河林场为试验地，通过分析 5 种不同林分的枯落物和土壤持水特性，以期为流溪河林地土壤的科学管理、资源保护提供科学依据，同时为研究林分类型与土壤特性的关系提供参考。

1 研究区域概况

流溪河林场是 1959 年建成的库区林场。位于林场内的流溪河国家森林公园是经林业部批准建立的首批国家十大森林公园之一，总面积 8 831 hm²，是集人文景观、森林保健、科普教育、科学研究以及会议和培训等多功能于一体的综合性生态型森林公园^[14-15]。流溪河林场位于广州市从化区北部，距广州市区 99 km，地理坐标为 113°54' E，23°32' ~23°50' N，东邻吕田，南连良口，西与黄龙带水库交界，北与东明镇接壤。林场处于北回归线附近，属于南亚热带季风性气候，气候温和，雨量充沛，年降雨量为 2 143.8 mm，年平均气温为 20.3℃。林场为低山地形，山脉主要为东北、西南走向，东部地势峻峭，山体较为密集，西北部地势较为平缓。本地区的成土母岩多为花岗岩，部分是石英和片状页岩。东南部为轻沙黄壤，土层较为肥厚；西部多为粗砖红壤。

2 调查与分析方法

2.1 标准地建立

通过实地勘察，于 2017 年 10 月，在研究区

内选择了 5 种具有代表性的林分进行调查，分别为杉木林（Ⅰ）、针阔混交林（Ⅱ）、阔叶混交林（Ⅲ）、毛竹林（Ⅳ）和荔枝林（*Litchi chinensis*）（Ⅴ）。在每种类型林地内选择代表性地段建立连续的 3 个 20 m × 20 m 标准地。标准地基本情况见表 1。

2.2 枯落物采样与测定

在每个标准地内中心和四角设置 5 个 0.5 m × 0.5 m 的枯落物样方，测定未分解层、半分解层的枯落物厚度，分层采样，将样本带回实验室称重，后置于 85℃ 烘箱中烘干后再称重。每块样地 5 块样方的枯落物质量的平均值作为该样地的枯落物蓄积量，并计算 5 种林分枯落物层的自然含水率。采用浸水法测定枯落物的最大持水率、最大持水量和有效持水量^[16]。

$$Y_0 = (X_0 - X_d) / X_d \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

$$Y_{\max} = (X_{24} - X_d) / X_d \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

$$Y_{sv} = 0.85 Y_{\max} - Y_0 \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_{\max} = Y_{\max} \times M \dots\dots\dots (4)$$

$$Z_{sv} = Y_{sv} \times M \dots\dots\dots (5)$$

以上式子里， X_0 、 X_d 、 X_{24} 代表枯落物的鲜质量、干质量、浸水 24 h 后的质量； Y_0 、 Y_{\max} 、 Y_{sv} 分别代表枯落物自然含水率、最大持水率、有效持水率； Z_{\max} 、 Z_{sv} 代表最大持水量和有效持水量， M 代表枯落物蓄积量。

2.3 土壤采样与测定

在各标准地的典型地段挖土壤剖面，分别为 0~20 cm，20~40 cm，40~60 cm，自上而下采集小铝盒和环刀样品，每层取 3 个重复，将样品带回实验室分析。采用烘干法测定土壤水分含量，采用环刀法测定土壤物理性质等指标^[17]。

土壤贮水量的计算公式为^[18]：

表 1 流溪河不同林分标准地基本特征

Table 1 The general situation of different forest stands in Liuxihe

林分类型 Stand types	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/°	坡向 Exposure	树高 Height/m	胸径 DBH/cm	郁闭度 Canopy density
I	220	30	北	21.9 ± 4.3	21.0 ± 7.9	0.8
II	183	20	西北	17.5 ± 7.0	18.7 ± 5.2	0.9
III	196	40	西	17.4 ± 7.5	28.7 ± 5.1	0.9
IV	310	19	西	14.0 ± 0.2	7.0 ± 0.1	0.9
V	146	28	南	7.3 ± 0.9	26.7 ± 4.3	0.9

注：表中数据为平均值 ± 标准误。

Note: Data in the table are means ± standard error.

$$S=10000 \times h \times p$$

式中： S —土壤非毛管持水能力 (t/hm^2)； h —土壤厚度 (m)； p —非毛管孔隙度 (%)。

用此公式，同样可以计算出土壤的毛管持水能力。

3 结果与分析

3.1 不同林分枯落物持水能力

3.1.1 不同林分枯落物层厚度和蓄积量 不同林分枯落物厚度和蓄积量结果表明 (表 2)，枯落物层总厚度较大的是荔枝林和阔叶混交林，分别为 5.88 和 4.26 cm，其次为杉木林和针阔混交林，分别为 3.30 和 3.34 cm，毛竹林的枯落物厚度最小，仅为 2.36 cm。5 种林分中，荔枝林的枯落物总蓄积量最大，达 $6.64 t/hm^2$ ，毛竹林的总蓄积量最小，仅为 $2.07 t/hm^2$ 。枯落物总蓄积量大小依次为荔枝林 ($6.64 t/hm^2$) > 针阔混交林 ($3.85 t/hm^2$) > 杉木林 ($2.91 t/hm^2$) > 阔叶混交林 ($2.21 t/hm^2$) > 毛竹林 ($2.07 t/hm^2$)。

分析发现，5 种林分枯落物厚度均表现为未分解层厚度小于半分解层厚度。不同林分类型林地枯落物各分层蓄积量所占的比例不同，杉木林、毛竹林和荔枝林表现为半分解层蓄积量大于未分解层蓄积量，其中荔枝林地各层蓄积量间相差最大，其半分解层蓄积量占 70.52 %；针阔混交林及阔叶混交林表现为未分解层蓄积量略大于半分解层蓄积量。

3.1.2 不同林分枯落物持水能力 枯落物的最大持水率和最大持水量都可以用来表示枯落物的持水能力，但是不同林分枯落物最大持水率间的差

异受多种因素影响，不同林分类型最大持水率间的相对大小比较复杂。一般通过比较枯落物的最大持水量和有效拦截量来比较不同林分枯落物的持水能力^[19]。

从表 3 可以看出，5 种林分枯落物的总最大持水量变化范围为 $4.70 \sim 12.19 t/hm^2$ ，各林分枯落物的最大持水量大小依次为荔枝林 ($12.19 t/hm^2$) > 针阔混交林 ($6.17 t/hm^2$) > 杉木林 ($5.32 t/hm^2$) > 阔叶混交林 ($5.15 t/hm^2$) > 毛竹林 ($4.70 t/hm^2$)。总体上看，半分解层最大持水量所占比例略大于未分解层，其中荔枝林和杉木林枯落物的半分解层的最大持水量大于未分解层的最大持水量，说明这两种林分枯落物的未分解层吸水性能更好，能够截持更多水分，这是因为它们的半分解层的蓄积量在总蓄积量总所占比例较大；而针阔混交林、阔叶混交林及毛竹林则是枯落物的未分解层的最大持水量大于半分解层的最大持水量。

由表 3 可知，各林分枯落物有效持水量与最大持水量表现出一致的规律：荔枝林 ($9.27 t/hm^2$) > 针阔混交林 ($4.18 t/hm^2$) > 杉木林 ($3.92 t/hm^2$) > 阔叶混交林 ($3.87 t/hm^2$) > 毛竹林 ($3.74 t/hm^2$)，综合有效拦截量和最大持水量分析，可以看出，荔枝林的枯落物层具有较好的保水能力，针阔混交林次之，而毛竹林最弱。

3.2 不同林分土壤物理性状及其持水能力

3.2.1 不同林分土壤物理性状 土壤的物理性质主要包括土壤容重、毛管持水量、孔隙度等。土壤容重的大小受质地、结构性和松紧度的影响。土壤愈疏松，则孔隙度大而容重小，反之土壤愈紧实则容重愈大。土壤的孔隙状况直接影响土

表 2 流溪河 5 种林分枯落物蓄积量

Table 2 The litter volume of different forest stands in Liuxihe

林分类型 Stand types	枯落物厚度 Litter depth/cm			总蓄积量 Total accumulation/ ($t \cdot hm^{-2}$)	枯落物蓄积量 Accumulation/($t \cdot hm^{-2}$)	
	总厚度 Total depth	未分解层 Undercomposed litter	半分解层 Half decomposition		未分解层蓄积量 Undercomposed litter	半分解层蓄积量 Half decomposition
I	3.30	0.94	2.36	2.91	1.33 ± 0.15 c	1.58 ± 0.50 b
II	3.34	0.90	2.44	3.85	2.55 ± 0.25 a	1.30 ± 0.29 b
III	4.26	1.22	3.04	2.21	1.20 ± 0.20 c	1.01 ± 0.29 b
IV	2.36	0.92	1.80	2.07	0.96 ± 0.22 c	1.11 ± 0.15 b
V	5.88	2.36	3.52	6.64	1.96 ± 0.11 b	4.68 ± 0.28 a

注：表中数据为平均值 ± 标准误，同列不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

Note: Data in the table are means ± standard error. Values in each line with different lower case represents significant difference ($P < 0.05$); and no marked means no difference.

表 3 流溪河 5 种林分枯落物持水量及持水率
Table 3 The litter water-holding capacity of different stands in Liuxihe

林分 Stand types	枯落物层 Litter layer	最大持水率 MWHR/%	最大持水量 MWHC/ (t · hm ⁻²)	总最大 持水量 MWHC/ (t · hm ⁻²)	有效拦截率 Effective water holding rate/%	有效拦截量 Effective water capacity/(t · hm ⁻²)	总有效拦截 量 Effective water capac- ity/(t · hm ⁻²)
I	未分解层	196.44 ± 17.83 bc	2.64 ± 0.40 b	5.32	148.75 ± 15.15 bc	2.00 ± 0.32 b	3.92
	半分解层	174.17 ± 7.92 b	2.68 ± 0.64 b		125.40 ± 6.73 bc	1.92 ± 0.44 b	
II	未分解层	162.11 ± 5.38 c	4.11 ± 0.41 a	6.17	112.15 ± 4.57 c	2.84 ± 0.29 ab	4.18
	半分解层	159.65 ± 5.92 b	2.06 ± 0.44 b		104.09 ± 5.03 c	1.34 ± 0.28 b	
III	未分解层	230.51 ± 27.48 ab	2.62 ± 0.38 b	5.15	176.68 ± 23.36 ab	2.00 ± 0.31 b	3.87
	半分解层	258.35 ± 12.91 a	2.53 ± 0.68 b		191.73 ± 10.97 a	1.87 ± 0.50 b	
IV	未分解层	257.52 ± 20.75 a	2.44 ± 0.51 b	4.70	207.54 ± 17.64 a	1.96 ± 0.41 b	3.74
	半分解层	196.76 ± 14.32 b	2.26 ± 0.44 b		154.53 ± 12.17 b	1.78 ± 0.35 b	
V	未分解层	236.22 ± 8.13 ab	4.65 ± 0.43 a	12.19	188.54 ± 6.91 ab	3.71 ± 0.35 a	9.27
	半分解层	174.51 ± 22.52 b	7.54 ± 1.39 a		130.21 ± 19.14 bc	5.56 ± 1.01 a	

注：表中数据为平均值 ± 标准误，同列不同小写字母表示在 α=0.05 水平差异显著。

Note: Data in the table are means ± standard error. Values in each line with different lower case represents significant difference (P<0.05), and no marked means no difference.

表 4 流溪河不同林分土壤物理性质
Table 4 The soil physical properties of different forest stands in LiuXihe

林分 Stand types	土层 Soil layer/cm	容重 Soil bulk density/ (g · cm ⁻³)	总孔隙度 Soil total porosity /%	毛管孔隙度 Soil capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Soil non-capillary porosity/%	通气孔隙度 Soil aeration po- rosity/%
I	0~20	1.14 ± 0.05	57.19 ± 2.06	40.21 ± 1.42	16.99 ± 3.37	35.97 ± 3.08
	20~40	1.37 ± 0.09	48.47 ± 3.26	38.75 ± 3.64	9.72 ± 2.90	24.09 ± 4.80
	40~60	1.48 ± 0.06	44.25 ± 2.30	38.56 ± 1.13	5.69 ± 1.33	20.04 ± 3.30
	0~60	1.33	49.97	39.17	10.80	26.70
II	0~20	1.20 ± 0.02	54.64 ± 0.66	39.61 ± 0.38	15.03 ± 0.97	29.18 ± 1.02
	20~40	1.24 ± 0.03	53.34 ± 1.07	39.39 ± 1.46	13.95 ± 1.06	27.34 ± 1.67
	40~60	1.25 ± 0.03	52.67 ± 1.17	43.57 ± 0.44	9.10 ± 0.85	25.85 ± 1.83
	0~60	1.23	53.55	40.86	12.69	27.46
III	0~20	1.20 ± 0.04	54.94 ± 1.33	47.52 ± 0.97	7.42 ± 2.30	21.70 ± 2.31
	20~40	1.22 ± 0.02	53.96 ± 0.77	38.49 ± 0.64	15.47 ± 0.33	27.88 ± 1.20
	40~60	1.38 ± 0.03	47.92 ± 1.14	42.88 ± 1.07	5.04 ± 1.90	13.84 ± 1.88
	0~60	1.27	52.27	42.96	9.31	21.14
IV	0~20	1.01 ± 0.05	62.04 ± 1.75	39.29 ± 1.36	22.76 ± 2.98	44.58 ± 2.56
	20~40	1.25 ± 0.02	53.00 ± 0.68	44.99 ± 1.13	8.01 ± 1.35	20.12 ± 1.10
	40~60	1.28 ± 0.03	51.75 ± 0.98	43.65 ± 0.90	8.10 ± 1.87	21.74 ± 1.66
	0~60	1.18	55.60	42.64	12.96	28.81
V	0~20	1.32 ± 0.01	50.17 ± 0.41	38.30 ± 0.38	11.87 ± 0.78	22.71 ± 0.56
	20~40	1.38 ± 0.01	47.94 ± 0.30	39.00 ± 0.36	8.94 ± 0.66	22.60 ± 0.45
	40~60	1.39 ± 0.05	47.55 ± 1.77	33.34 ± 1.26	14.21 ± 2.98	27.22 ± 2.75
	0~60	1.36	48.55	36.88	11.67	24.18

注：表中数据为平均值 ± 标准误。Note: Data in the table are means ± standard error.

壤通气、透水性，是决定土壤持水能力的重要因素^[20]。

从表 4 可以看出，在 5 种林分中，随着土层

深度的增加，土壤容重逐渐增大，而总孔隙度逐渐减小，说明随着土层的加深，土壤变得越来越紧实，土壤的结构性变差。各林分的土壤容重均

表5 流溪河不同林分土壤蓄水能力
Table 5 The soil water storage capacity of different stands in LiuXihe

林分 Stand types	土层厚度 Soil thickness/cm	饱和贮水量 Saturation storage/(t · hm ⁻²)	吸持贮水量 Holding capacity/(t · hm ⁻²)	滞留贮水量 Retained capacity/(t · hm ⁻²)
I	60	2998.17	2350.40	647.83
II	60	3212.93	2451.40	761.60
III	60	3136.47	2577.80	558.67
IV	60	3335.93	2558.60	777.40
V	60	2913.13	2212.80	700.40

值排序为毛竹林 (1.18 g/cm³) < 针阔混交林 (1.23 g/cm³) < 阔叶混交林 (1.27 g/cm³) < 杉木林 (1.33 g/cm³) < 荔枝林 (1.36 g/cm³); 总孔隙度均值排序为毛竹林 (55.60%) > 针阔混交林 (53.55%) > 阔叶混交林 (52.27%) > 杉木林 (49.97%) > 荔枝林 (48.55%)。说明毛竹林土壤疏松, 结构性较好, 而荔枝林土壤比较紧实, 结构性差。

毛管孔隙是土壤中水分流通和蒸发的孔道, 毛管孔隙中保存的水是提供给植物最为有效的水分。表4显示阔叶混交林和毛竹林的毛管孔隙度较大, 杉木林和针阔混交林次之, 荔枝林最小。非毛管孔隙度是土壤快速贮存水分的场所, 非毛管孔隙度越大, 表明土壤中有效水的贮存量越大, 越有利于地表径流的减少。从表4中可看出, 各林分间的非毛管孔隙度均值大小依次为毛竹林 (12.96%) > 针阔混交林 (12.69%) > 荔枝林 (11.67%) > 杉木林 (10.8%) > 阔叶混交林 (9.31%)。各林分间的通气孔隙度均值大小依次为毛竹林 (28.81%) > 针阔混交林 (27.46%) > 杉木林 (26.7%) > 荔枝林 (24.18%) > 阔叶混交林 (21.14%), 而随着土层加深, 土壤的通气孔隙度大致呈下降的趋势。

3.2.2 不同林分土壤贮水性能 林地土壤层是水分贮存的主要场所, 其贮水量是评价土壤涵养水源及调节水分循环的一个重要指标, 它反映了土壤调蓄水分的能力, 能够较好的评价土壤层的水文功能。土壤贮水量是用各种孔隙度及土层厚度来表征的, 一般来说, 土壤饱和贮水量分为由毛管孔隙度表征的吸持贮水量以及由非毛管孔隙度表征的滞留贮水量。由表5可知, 土壤0~60 cm 累计饱和贮水量依次为毛竹林 (3 335.93 t/hm²) > 针阔混交林 (3 212.93 t/hm²) > 阔叶混交林 (3 136.47 t/hm²) > 杉木林 (2 998.17 t/hm²) > 荔枝林 (2 913.13 t/hm²); 吸持贮水量为阔叶混交林

(2 577.80 t/hm²) > 毛竹林 (2 558.60 t/hm²) > 针阔混交林 (2 451.40 t/hm²) > 杉木林 (2 350.40 t/hm²) > 荔枝林 (2 212.80 t/hm²); 滞留贮水量为毛竹林 (777.40 t/hm²) > 针阔混交林 (761.60 t/hm²) > 荔枝林 (700.40 t/hm²) > 杉木林 (647.83 t/hm²) > 阔叶混交林 (558.67 t/hm²)。在森林生态系统中, 林地的贮水能力通常是由土壤非毛管孔隙度结合土层厚度来决定的, 因此毛竹林及针阔混交林土壤贮水能力较强, 而阔叶混交林土壤吸收、贮存降水的能力较强。

4 结论与讨论

4.1 流溪河5种林分枯落物层厚度均表现为未分解层厚度小于半分解层厚度。5种林分枯落物蓄积量大小依次为荔枝林 > 针阔混交林 > 杉木林 > 阔叶混交林 > 毛竹林, 毛竹林枯落物储量最小, 由于竹叶较小较薄, 少有枯枝, 枯落物层较为紧实, 厚度较薄, 储量也小, 这与邱治军等人^[4]的研究结果一致。

4.2 5种林分枯落物的最大持水量大小依次为荔枝林 > 针阔混交林 > 杉木林 > 阔叶混交林 > 毛竹林。尽管阔叶林的最大持水率最大, 但其蓄积量较小, 因此最大持水量较小。各林分枯落物有效持水量与最大持水量表现出一致的规律。荔枝林的蓄积量及最大持水量均最大, 因为荔枝林落叶多, 叶大呈革质, 在地面形成孔隙大, 枯落物层较厚, 而更深层原因还有待进一步分析。

4.3 5种林分土壤容重均随着土层深度的增加逐渐增大, 总孔隙度逐渐减小。总的来说, 在5种林分中, 毛竹林土壤容重最小, 孔隙度最大, 土壤疏松, 结构性较好, 而荔枝林土壤容重最大, 孔隙度最小, 土壤比较紧实, 结构性差, 与杨海菊等^[21]对广西荔枝林土壤的研究结果一致, 究其原因可能是荔枝林受人为影响较大, 耕作层浅且

长期单一偏施化肥, 导致土壤板结。

4.4 5 种林分土壤 0~60 cm 饱和贮水量、吸持贮水量以及滞留贮水量分别介于 2 913.13 ~3 335.93、2 212.80~2 577.80 和 558.67 ~777.40 t/hm² 之间。通过分析可知毛竹林和阔叶混交林饱和贮水量较大, 土壤吸持水能力较强, 而阔叶混交林则是吸持贮水量较大, 土壤吸收、贮存降水的能力较强。

4.5 在 5 种林分中, 毛竹林土壤物理性质明显优于其他 4 种林分, 王燕等^[22]的研究认为是由于毛竹林根系较浅, 主要根系基本分布在 0~40 cm 范围内。阔叶林是涵养水源的主体, 而研究结果表明阔叶林枯落物及土壤持水性均处于较低水平, 因此应加强对现有阔叶林的保护及抚育; 同时, 对针阔林、残次针叶林以及山地果林进行林分改造, 提高林分质量, 充分发挥流溪河森林的水源涵养功能, 为流溪河林地土壤的科学管理、资源保护提供科学依据。

参考文献

- [1] ZHANG B, LI W, XIE G, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2008, 69(7): 1416-1426.
- [2] 杨俊生, 陈应彪, 王俊林, 等. 马尾松林 4 种林分改造树种枯落物持水特性[J]. 广东林业科技, 2014, 30(4): 37-41.
- [3] 黄华蓉, 董奇好, 杨亚慧, 等. 广东翁源青云森林公园 6 种林分土壤理化特性分析[J]. 亚热带植物科学, 2015, 44(2): 135-139.
- [4] 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.
- [5] 赵江宁, 冯嘉仪, 刘露, 等. 长岗山不同林分类型对土壤理化性质的影响[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(3): 48-52.
- [6] 刘敏, 王玉杰, 赵洋毅, 等. 重庆缙云山水源涵养林地土壤水文效应[J]. 中国水土保持, 2010, 27(5): 41-44; 68.
- [7] DEMIE M, STANLEY K, THOMAS B, et al. The effect of soil surfactants on soil hydrological behavior, the plant growth environment, irrigation efficiency and water conservation[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2010, 58(3): 142-148.
- [8] 申卫军, 彭少麟, 周国逸, 等. 马占相思 (*Acacia mangium*) 与湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林枯落物层的水文生态功能[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 846-850.
- [9] 薛立, 何跃君, 屈明, 等. 华南典型人工林凋落物的持水特性[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 415-421.
- [10] 彭耀强, 薛立, 曹鹤, 等. 三种阔叶林凋落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 189-191; 200.
- [11] 任向荣, 薛立, 曹鹤, 等. 3 种人工林凋落物的持水特性[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(3): 47-51.
- [12] 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.
- [13] 王冬云, 张卓文, 苏开君, 等. 广州流溪河流域毛竹林的水文生态效应[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(1): 37-41.
- [14] 曾震军, 吴汉. 流溪河林场森林资源调查与分析[J]. 广东林业科技, 2009, 25(1): 77-82.
- [15] 肖化顺, 付春风, 张贵. 流溪河国家森林公园森林景观稳定性评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(1): 88-92.
- [16] 蒋伟伟. 北京山区 4 种典型林分枯落物持水特性的定量分析[J]. 广东农业科学, 2016, 43(12): 30-35.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [18] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-130; 137.
- [19] 陈红跃, 刘钱, 康敏明, 等. 东江水源林不同混交组合林地枯落物和土壤持水能力研究[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 796-801.
- [20] REZAEI S A, GILKES R J. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands[J]. Geoderma, 2005, 125(1): 145-154.
- [21] 杨海菊, 韦树根, 闫志刚, 等. 广西荔枝林下土壤元素分析[J]. 农业研究与应用, 2016(1): 12-16.
- [22] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 151-153; 173.