

DOI: 10.5846/stxb201305301229

赵从举, 吴喆滢, 康慕谊, 范文斌, 林智, 卓志清. 海南西部桉树人工林土壤水分变化特征及其对林龄的响应. 生态学报, 2015, 35(6): 1734-1742.

Zhao C J, Wu Z Y, Kang M Y, Fan W B, Lin Z, Zhuo Z Q. Variation of soil moisture content for *Eucalyptus* forests and its response to stand ages in Western Hainan. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1734-1742.

海南西部桉树人工林土壤水分变化特征及其对林龄的响应

赵从举¹, 吴喆滢², 康慕谊^{3,*}, 范文斌¹, 林智¹, 卓志清¹

¹ 海南师范大学 地理与旅游学院, 海口 571158

² 海南师范大学 生命科学学院, 海口 571158

³ 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 在海南西部儋州林场选取空间相邻、自然环境相似、不同林龄与连栽代次的桉树林样地和椰树林对照样地, 通过 2010—2012 年连续 3a 定点取样, 研究桉树林土壤水分变化特征及其对林龄的响应, 分析桉树林种植对林地土壤水分的影响。结果表明: (1) 1—4 月土壤含水量持续减少, 5—6 月波动较大, 7—10 月增加到年内极大值, 11—12 月降低, 但处于年内较高水平。(2) 短伐桉树林(二代 5 年桉树林、三代 1 年桉树林、三代 4 年桉树林)、20a 桉树林以及 10a 椰树林 5 个样地的月均土壤含水量存在显著或极显著差异。二代 5 年桉树林与三代 1 年桉树林之间以及 20a 桉树林与 10a 椰树林之间的土壤含水量差异均不显著; 其余各林地之间土壤含水量差异显著或极显著。(3) 随着土壤深度增加, 短伐桉树林与 20a 桉树林、10a 椰树林之间的土壤含水量差异增大。表层 0—30 cm 短伐桉树林年均土壤含水量为 6.08%, 20a 桉树林为 7.53%, 10a 椰树林为 6.93%; 80 cm 以下则分别为 8.10%、11.72% 和 11.95%。与 10a 椰树林、20a 桉树林相比, 短伐桉树林对土壤深层水分有较大负面影响。(4) 短伐桉树林、20a 桉树林和 10a 椰树林土壤含水量的变异系数由表层到深层逐渐递减, 其中林龄较大的短伐桉树林变异系数较大, 且变异系数较大的土层也较深厚。与 20a 桉树林、10a 椰树林相比, 林龄较大的短伐桉树林对深层土壤水分的消耗较多。(5) 连栽代次愈多, 林龄越大, 土壤含水量愈少; 采伐之后 1a 桉树林的土壤含水量明显增加, 有利于桉树后期生长。

关键词: 土壤水分; 短伐连栽; 桉树林; 椰树林; 儋州林场

Variation of soil moisture content for *Eucalyptus* forests and its response to stand ages in Western Hainan

ZHAO Congju¹, WU Zheyang², KANG Muiyi^{3,*}, FAN Wenbin¹, LIN Zhi¹, ZHUO Zhiqing¹

¹ School of Geography and Tourism, Hainan Normal University, Haikou 571158, China

² School of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158, China

³ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Danzhou, which lies in western Hainan and where large-scale *Eucalyptus* plantations are present, was chosen as the target study area. We selected 1-to-5-year-old short-rotation *Eucalyptus* trees, 20-year-old *Eucalyptus* trees and 10-year-old *Cocos* trees with adjacent space and similar natural conditions as our experimental plots. After 3 years of continuous sampling, from 2010 to 2012, in fixed sites, we analyzed the variation of soil moisture content for *Eucalyptus* forests and its response to plantation ages. The results showed that: (1) Soil moisture content decreased continuously from January to April, fluctuated in May and June, increased to the annual maximum between July and October, and descended slightly

基金项目: 国家自然科学基金项目(40961033, 41361006); 国家重点基础研究项目(2007CB106807); 国家科技支撑计划(2012BAC18B04)

收稿日期: 2013-05-30; **网络出版日期:** 2014-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kangmy@bnu.edu.cn

during the remaining months. (2) There were significant or highly significant differences in mean monthly soil moisture content among the short-rotation *Eucalyptus* plantations (including a second-generation 5-year-old short-rotation *Eucalyptus* plantation, a third-generation 1-year-old short-rotation *Eucalyptus* plantation and a third-generation 4-year-old short-rotation *Eucalyptus* plantation), 20-year-old *Eucalyptus* plantation and 10-year-old *Cocos* plantation, except between the second-generation 5-year-old short-rotation *Eucalyptus* plantation and the third-generation 1-year-old short-rotation *Eucalyptus* plantation and between the 20-year-old *Eucalyptus* plantation and the 10-year-old *Cocos* plantation. (3) Differences in soil moisture content increased with soil depth between the short-rotation *Eucalyptus* plantations and 20-year-old *Eucalyptus* plantation, 10-year-old *Cocos* plantation. In the 0—30 cm soil layer, the average moisture contents for the short-rotation *Eucalyptus* plantations, non-short-rotation *Eucalyptus* plantation and *Cocos* plantation were 6.08%, 7.53% and 6.93%, respectively, while, in soil layers deeper than 80 cm, values were 8.10%, 11.72% and 11.95%, respectively. The phenomenon that increases in soil depth enlarge differences in soil moisture content reveals that short-rotation *Eucalyptus* forests consumed more water in the deep soil, compared with the *Cocos* forest and non-short-rotation *Eucalyptus* forest. (4) The variation coefficient of soil moisture content gradually declined from top to deep soil layers for the short-rotation *Eucalyptus* plantations, 20-year-old *Eucalyptus* plantation and 10-year-old *Cocos* plantation. In addition, the coefficient was larger for the elder short-rotation *Eucalyptus* forests and under deeper soil layers, which indicated that compared to the *Cocos* forest and non-short-rotation *Eucalyptus* forest, the elder short-rotation *Eucalyptus* forests consumed more deep soil water. (5) More continuous planting and greater stand age minified soil moisture content. The soil moisture of the 1-year-old *Eucalyptus* plantation was in a recovery phase and exhibited a higher content, which would improve the soil water environment and the growth of *Eucalyptus* trees.

Key Words: soil moisture; short-rotation and continuous planting; *Eucalyptus* forest; *Cocos* forest; Danzhou Forest Farm

桉树(*Eucalyptus* spp.)为联合国粮农组织推荐的三大类速生造林树种之一,也是我国一直以来倚重的主要造林树种^[1-2]。作为外来树种,学术界就其所带来的生态问题一直争论不断^[3-4]。其中,桉树人工林(以下简称桉树林)的水生态问题处于争论的焦点^[5-8]。白嘉雨等研究表明,桉树主要利用 0—2 m 深的土壤水,桉树种植不会影响区域水资源平衡^[9]。Shiva 等认为,随林龄增长,短伐连栽桉树林林地年蒸散量增加,会引起人工林土壤干燥化,流域产流大幅降低,威胁区域用水安全,尤其在半湿润、半干旱和干旱地区^[10-13]。

海南西部季节性干旱严重,为一独特的热带疏林干草原植被类型区^[14]。这里引种桉树已有 90 多年,是我国重要的桉树浆纸林分布地区。超短轮伐、多代连栽对当地桉树林地土壤水分影响研究虽有开展,但长期定点研究还较少,而多代连栽桉树林土壤水分及其与林龄关系的系统研究则更少^[15]。因缺乏长时间序列观测数据,机耕全垦、超短轮伐、连栽种植的桉树林是否会破坏区域水分平衡,导致人工林土壤干燥化强度趋于强化,仍有争议^[16-17]。为此,选取海南西部儋州林场为实验场地,通过 2010—2012 年连续 3a 定点系统观测,对比分析不同林龄桉树林的土壤水分时间变化及其剖面分布,研究林龄对桉树林土壤水分的影响;并选取在海南有大面积分布,栽培历史已经有 2000 多年的椰树(*Cocos nucifera* L.)人工林,作为对照样地,分析桉树林种植对林地土壤水分的影响,为正确认识不同林龄桉树林的土壤水文效应和林业的可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

儋州林场位于海南西北部,面积约 37.68 km²,地形以平原、台地为主,海拔 40—50 m。年均日照时数在 2000 h 以上,年均温 23.8 ℃,≥10 ℃的年积温为 8400—8900 ℃;年均降水量 800—1600 mm,年均蒸发量 1200—2500 mm,属热带季风气候类型。每年进入雨季时间不尽相同,一般 6—10 月为雨季,11 月到次年 5 月为干季。缺少地表径流,大气降水是土壤水分最主要的补给来源。地势较为和缓,以砂质砖红壤为主,土壤肥

力较低,土层厚度一般在 150 cm 以上。研究区以速生桉树林营林为主,20 世纪 60 年代开始引种桉树,连片种植不同林龄的桉树林,包括短伐连栽桉树林、90 年代初桉树林,间有椰子树林和次生疏林灌丛分布。

2 研究方法

2.1 样地选择

按林龄差异与空间环境一致性要求,就近选取 3 块短伐连栽桉树林样地(A、B、C)、1 块 20a 桉树林样地(D)和 1 块 10a 椰树林对照样地(E)。样地地表较为平坦,土壤以砂质砖红壤为主,质地极为相似。各样地位置、人工林类型以及土壤质地等特征见表 1。

表 1 研究样地土壤质地及人工林特征(2010 年)

Table 1 The soil texture and plantation characteristics of sampling plots in 2010

样地编号 Plot No.	A	B	C	D	E
样地位置 Plot location	19°41'59" N, 109°20'2" E	19°41'59" N, 109°19'57" E	19°42'1" N, 109°19'51" E	19°42'13" N, 109°20'28" E	19°42'37" N, 109°21'23" E
人工林 Planted forest *	二代 5 年桉树林	三代 1 年桉树林	三代 4 年桉树林	20a 桉树林	10a 椰树林
黏粒(<0.01 mm) Clay/%	13.120	13.712	12.586	12.448	13.523
粗粉砂(0.01—0.05 mm) Coarse silt/%	5.629	4.933	4.971	6.863	7.002
砂粒(2—0.05 mm) Sand/%	81.245	81.364	82.436	80.676	79.469

* 2010 年样地 A 的林龄为 5a, 2011 年则为 6a, 2012 年则为 7a, 其余样地类推; 为避免混淆, 文中林龄均指 2010 年林龄, 2011 年, 2012 年其实际林龄分别递增 1a

2.2 数据采集与处理

自 2010 年 1 月至 2012 年 12 月于每月中旬监测 5 块研究样地的土壤水分, 每块样地重合取样 3 次, 分别测定土壤含水量; 同时还测定各样地的土壤质地与土壤容重。采样日之前至少 3 d 没有 ≥ 5 mm 降水。监测深度为 0—150 cm, 取样间隔为 10 cm。土壤含水量采用轻型人力土钻、铝盒取样、105 °C 烘干法测定。

利用 5 块样地 2010—2012 年每月土壤水分含量测定数据, 通过方差分析, 判断 5 块样地的土壤含水量是否存在显著差异, 并经多重比较 Bonferroni *t* 检验, 对 5 块样地之间的土壤含水量差异进行显著性检验。

变异系数是观测值的标准差与平均数的比值, 能够反映单位均值上的离散程度。用变异系数来衡量 5 块样地 0—150 cm 深度的不同土层的土壤含水量变化; 变异系数越大, 说明土壤含水量的变化越剧烈, 反之则越小。

3 结果与分析

3.1 桉树和椰树林林地土壤水分年内变化

3.1.1 桉树林和椰树林土壤水分年内变化

从 2010—2012 年 0—150 cm 土层的平均土壤水分含量来看, 桉树林、椰树林 1—6 月土壤含水量较低, 并逐渐减少; 7—10 月土壤含水量较高, 并逐渐增加; 11—12 月土壤含水量降低, 并影响次年年初土壤含水量(图 1)。

2010—2012 年 1—4 月土壤水分含量逐渐减少。就 0—150 cm 土层的平均土壤含水量而言, 样地 A、B、C、D、E 分别从 1 月的 6.94%、7.22%、5.76%、9.61%、9.79% 降为 4 月的 6.19%、6.80%、4.96%、8.84%、8.43%。海南西部旱季、雨季分明, 旱季后期, 土壤水分因地表蒸发与植物生长耗水持续增加而逐渐减少。

2010—2012 年 5—6 月土壤水分含量波动较大。其中, 2010 年 5—6 月土壤含水量持续减少, 6 月土壤含水量达到年内最低, 样地 A、B、C、D、E 的 0—150 cm 土层平均土壤含水量分别降到 5.76%、5.81%、4.81%、8.12%、7.73%。2011 年和 2012 年的 4 月土壤含水量为年内最低; 2011 年 5 月土壤含水量增加较多, 6 月降到年内较低水平, 分别为 6.01%、6.50%、4.87%、9.24%、9.34%; 而 2012 年 5 月、6 月土壤含水量持续增加。5—

6 月土壤水分含量波动主要取决于年内雨季开始时间的早晚及降水量的大小。

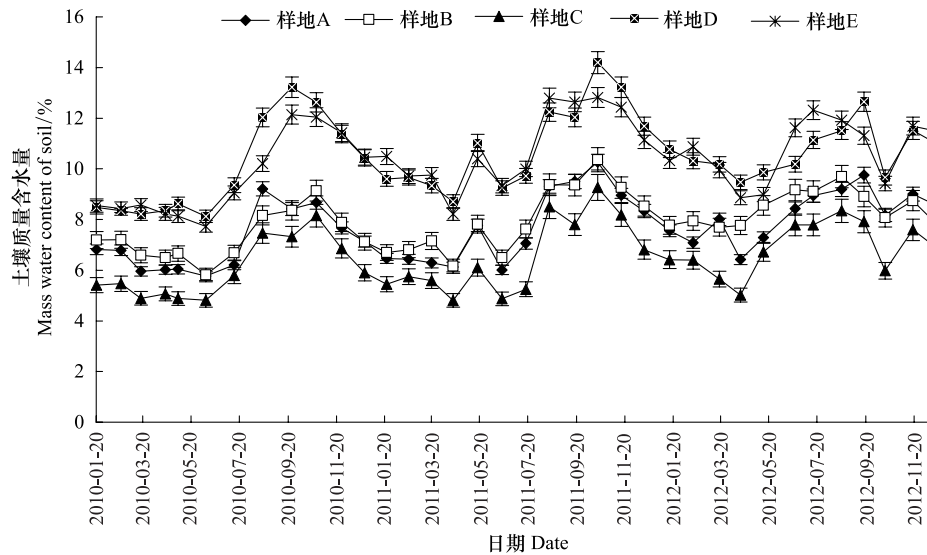


图1 2010—2012 年 0—150 cm 土层的平均土壤含水量 (误差线为标准差)

Fig.1 Changes of soil water content in the 0—150 cm soil depth of the study area from 2010 to 2012 (The error bars represent the SD)

2010—2012 年 7—10 月土壤水分含量增加。就 0—150 cm 土层的平均土壤含水量而言,样地 A、B、C、D、E 分别从 7 月的 7.40%、7.81%、6.27%、10.07%、10.45% 增加到 10 月的 9.03%、9.18%、7.80%、12.16%、11.43%。

2010—2012 年 11—12 月土壤水分含量降低,但 0—150 cm 土层的平均土壤含水量仍然较高。12 月样地 A、B、C、D、E 的土壤含水量分别为 8.02%、7.85%、6.56%、11.05%、11.04%。土壤含水量变化滞后于降水变化,雨季之后的土壤含水量因地表蒸发与植物生长蒸腾耗水而逐渐减少,但因前期土壤蓄积水分较多,故 11—12 月土壤含水量都较高。

3.1.2 桉树和椰树林土壤含水量年内变化与气温、降水量的关系

2010—2012 年研究区年均温分别为 25.1, 23.7, 24.8 °C, 对应的年降水量为 878.5 mm, 1258.5 mm, 1202.1 mm。2010 年为降水偏少年份,2011 年和 2012 年为降水正常年份(图 2)。2010—2012 年研究区林地的月均土壤含水量与月均降水量、月均温度分别进行简单相关分析,林地月均土壤含水量与月均降水量、月均温度之间的相关系数 γ 分别为 0.5970、0.1192。将相关系数 γ 与临界值表 γ_{α} 比较(查相关系数临界值得, $0.3246 < \gamma_{0.05} (36-2=34) < 0.3494$, $0.4182 < \gamma_{0.01} (36-2=34) < 0.4487$),结果显示,林地土壤含水量与降水量之间呈极显著正相关,而林地土壤含水量与月均温度之间关系不显著。表明,大气降水对海南西部人工林林地土壤水分含量及其年内变化影响显著。

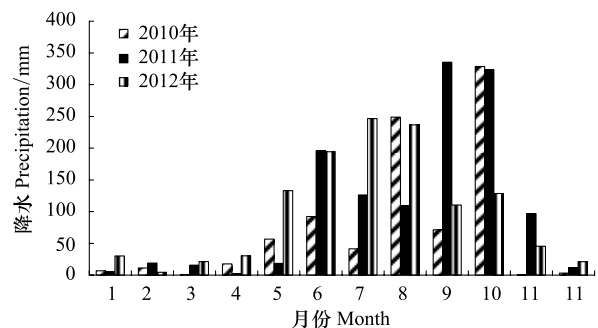


图2 研究区 2010—2012 年各月降水量变化

Fig.2 Monthly changes of precipitation in the study area from 2010 to 2012

3.1.3 不同林龄与连栽代次桉树林和椰树林林地土壤含水量比较

二代 5 年桉树林、三代 1 年桉树林、三代 4 年桉树林、20a 桉树林以及 10a 椰树林 5 个样地年内土壤含水量变化差异显著性检验及多重比较表明,5 个样地年内土壤含水量存在显著或极显著差异;其中二代 5 年桉树林与三代 1 年桉树林之间以及 20a 桉树林与 10a 椰树林之间差异均不显著(表 2,表 3)。

表 2 5 块林地土壤含水量方差分析

Table 2 Analysis of variance of soil moisture content for 5 pieces of woodland

变异来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F
不同林地(处理) Model	456.58	4	114.15	60.23 **
误差 Error	331.64	175	1.90	
总变异 Total	788.22	179		

表 3 5 块林地土壤含水量 Bonferroni *t* 检验的多重比较结果

Table 3 Bonferroni *t* multiple comparison tests for soil moisture content of 5 pieces of woodland

组 Group	平均	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
二代 5 年桉树林 Second-generation and 5-year-old <i>Eucalyptus</i> plantation	7.66	a *	A *
三代 1 年桉树林 Third-generation and 1-year-old <i>Eucalyptus</i> plantation	7.90	a	A
三代 4 年桉树林 Third-generation and 4-year-old <i>Eucalyptus</i> plantation	6.47	b	B
20a 桉树林 20-year-old non-short-rotation <i>Eucalyptus</i> plantation	10.50	c	C
10a 椰树林 10-year-old <i>Cocos</i> plantation	10.37	c	C

a * 不同小写字母表示 5 块样地间土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$); A * 不同大写字母表示 5 块样地间土壤含水量差异极显著 ($P < 0.01$)

3.2 桉树林和椰树林林地土壤水分垂直变化

2010—2012 年短伐桉树林 (A、B、C)、20a 桉树林 (D) 以及椰树林 (E) 的平均土壤含水量随深度的变化趋势不尽相同 (图 3)。

3.2.1 桉树林

样地 D 各土层深度年均含水量最高, 而样地 A、B、C 较低, 其中样地 C 各土层年均含水量最低。样地 A、B 土壤含水量在各深度土层存在差异, 在 0—120 cm 土层样地 B 的土壤水分含量明显高于样地 A, 而 120 cm 以下样地 A 略高于样地 B。

表层 0—10 cm 样地 A、B、C、D 土壤水分差异较小。样地 A、B、C 自表层向下土壤水分逐渐增加, 而样地 D 在土层 20 cm 深度处的土壤水分较 0—10 cm 有显著增加; 这可能与样地 A、B、C 有少量草本植物以及枯枝落叶构成的地被层, 水分下参与土体内传输畅通有关; 而样地 D 则因缺少地被层植被覆盖以及表层与土体内水分运移的毛管因表层土壤萎缩而拉断, 阻隔水分蒸发所致。

3.2.2 椰树林

样地 E 土层 0—70 cm 土壤含水量低于样地 D; 而 80 cm 以下则相反。与样地 A、B、C 相比, 除表层 0—10 cm 外, 样地 E 各土层土壤水分均显著高于样地 A、B、C。

与桉树林一样, 椰树林土壤水分随深度的增加而增加, 100—150 cm 深层的平均含水量最高, 且变化较小, 而表层 0—10 cm 土层的含水量最低, 其变化幅度大。

3.2.3 土壤水分含量垂直变化的幅度

5 块样地 0—150 cm 土层土壤含水量的变异系数变化均较大 (表 4)。土壤含水量的变异系数由表层到深层逐渐递减, 0—10 cm 土层的变异系数最大。样地 A—D 土层 0—10 cm 和样地 E 土层 0—20 cm 的变异系数均在 0.30 以上。样地 E 的表层土壤水分变化剧烈, 且水分波动涉及的深度较大, 这主要与椰树林林地的地被层发育良好, 植物根系发达有关。在水分较多时段, 地被层吸持作用明显, 而在水分不足时段, 植物根系耗水较大, 从而致使 0—20 cm 土层水分的变异系数较大。

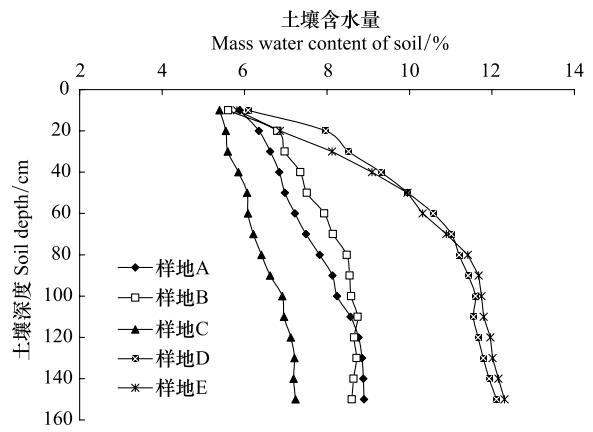


图 3 样地 A—E 土壤含水量随深度的变化

Fig. 3 Changes of soil moisture content with soil depth for sampling plots A to E

表 4 2010—2012 年 5 块样地不同深度土壤含水量的统计特征
Table 4 Statistics of soil moisture content in different soil depths of 5 sampling plots from 2010 to 2012

土层深度 Depth/cm	二代 5 年桉树林样地 A				三代 1 年桉树林样地 B				三代 4 年桉树林样地 C				20a 桉树林样地 D				10a 桉树林样地 E			
	M/%	Min/%	Max/%	Cv	M/%	Min/%	Max/%	Cv	M/%	Min/%	Max/%	Cv	M/%	Min/%	Max/%	Cv	M/%	Min/%	Max/%	Cv
0—10	5.88	3.35	10.14	0.363	5.60	3.54	9.86	0.352	5.39	2.62	7.13	0.322	6.09	2.48	11.24	0.486	5.82	3.14	9.05	0.361
10—20	6.35	4.24	7.94	0.252	6.79	4.46	8.62	0.209	5.55	3.45	6.69	0.243	7.97	6.04	12.58	0.262	6.86	4.33	9.77	0.312
20—30	6.62	4.41	8.62	0.247	6.97	4.62	8.62	0.214	5.59	3.86	7.23	0.253	8.52	6.60	12.28	0.241	8.12	4.98	10.26	0.270
30—40	6.84	4.72	9.08	0.242	7.35	5.11	8.36	0.169	5.85	4.13	7.50	0.233	9.31	6.30	15.48	0.297	9.09	5.55	11.24	0.227
40—50	6.98	5.00	8.21	0.210	7.51	5.40	8.67	0.157	6.06	4.48	7.95	0.219	9.96	6.78	14.72	0.276	9.95	6.90	11.93	0.210
50—60	7.22	5.18	8.82	0.191	7.93	5.47	9.58	0.167	6.08	4.06	7.94	0.200	10.58	7.48	13.53	0.243	10.32	7.76	12.14	0.182
60—70	7.49	5.68	8.86	0.167	8.14	5.72	10.63	0.179	6.21	4.19	8.09	0.213	11.02	7.75	13.33	0.208	10.89	7.82	12.58	0.177
70—80	7.82	5.89	9.22	0.174	8.48	6.10	9.86	0.132	6.41	4.24	8.41	0.231	11.20	8.00	13.74	0.212	11.41	8.45	13.14	0.171
80—90	8.13	6.29	9.02	0.130	8.55	6.11	9.64	0.132	6.62	4.34	8.73	0.236	11.42	8.24	13.95	0.208	11.68	8.37	13.50	0.164
90—100	8.24	6.42	9.17	0.131	8.59	6.45	9.36	0.115	6.92	5.19	8.75	0.212	11.60	8.36	13.58	0.181	11.75	8.75	13.47	0.153
100—110	8.57	6.72	9.85	0.125	8.74	6.26	9.86	0.118	6.96	5.33	8.65	0.183	11.55	8.73	13.97	0.159	11.80	9.42	14.36	0.147
110—120	8.76	6.75	9.80	0.142	8.66	6.48	9.49	0.117	7.12	5.29	8.98	0.193	11.66	9.21	14.49	0.171	11.96	9.38	14.20	0.151
120—130	8.85	6.53	9.76	0.136	8.72	6.28	9.82	0.130	7.21	5.44	9.29	0.182	11.79	9.20	14.42	0.164	12.01	9.90	13.94	0.131
130—140	8.88	6.57	10.23	0.142	8.64	6.28	9.77	0.133	7.19	5.35	9.49	0.193	11.93	9.20	14.62	0.175	12.15	9.63	14.19	0.136
140—150	8.90	6.69	11.09	0.168	8.60	6.25	9.34	0.128	7.23	5.24	9.41	0.192	12.11	9.45	14.65	0.159	12.30	10.35	14.40	0.114
0—150	7.70	5.63	9.32	0.188	7.95	5.64	9.43	0.163	6.43	4.48	8.28	0.220	10.45	7.59	13.77	0.229	10.41	7.65	12.54	0.194

M: 均值 Mean; Min: 最小值 Minimum; Max: 最大值 Maximum; Cv: 变异系数 Coefficient of variation; 二代 5 年桉树林样地 A; Second-generation and 5-year-old *Eucalyptus* plantation/sampling plot A; 三代 1 年桉树林样地 B; Third-generation and 1-year-old *Eucalyptus* plantation/sampling plot B; 三代 4 年桉树林样地 C; Third-generation and 4-year-old *Eucalyptus* plantation/sampling plot C; 20a 桉树林样地 D; 20-year-old *Eucalyptus* plantation/sampling plot D; 10a 桉树林样地 E; 10-year-old *Cocos* plantation/sampling plot E.

样地 C、D 各层土壤水分的变异系数较大,也涉及较深土层,90—100 cm 以内变异系数均在 0.20 以上;样地 B 各层土壤水分的变异系数较小,变异系数 0.20 以上的土层仅在 30 cm 以内;样地 A、E 各层土壤水分的变异系数居中,0—50 cm 土层的变异系数均在 0.20 以上。样地 C、D 土层 90—100 cm 以内的变异系数明显高于其他林地,这可能与 C、D 林龄较大,植物蒸腾耗水多,以及根系需要从更深土层吸水有关;而样地 B 为 2010 年初采伐的萌芽林,缺少地被层,且根系发育不完全,可能是表层 0—10 cm 变异系数较大,而其余土层的变异系数都较小的主要原因。

3 块短伐连栽桉树林样地 A、B、C 中,样地 C 的土壤含水量较低,且变异系数较大,90—100 cm 以内的变异系数均在 0.20 以上,表明其深层土壤水分消耗量高于样地 A、B,土壤蓄积的水分减少。

样地 D 与样地 E 土壤含水量相当,前者为 10.45%,后者是 10.41%;但样地 D 的变异系数高于样地 E,且变异系数较大的土层深度也较样地 E 要大,这意味着 20a 桉树林蒸腾耗水对深层土壤水分的影响可能较 10a 桉树林要大。

3.3 桉树林与椰树林的土壤水分差异

3.3.1 20 年桉树林与椰树林

2010—2012 年 20a 桉树林与 10a 椰树林平均土壤含水量分别为 10.45% 和 10.41%,二者差别不明显。这一结果表明,20a 桉树林土壤蓄积水分并不比椰树林少;也即从土壤蓄积水量来看,与 10a 椰树林相比,20a 桉树林带来的土壤水生态负面影响不明显。

3.3.2 短伐桉树林与椰树林

2010—2012 年短伐桉树林 0—150 cm 土层年均土壤含水量明显低于椰树林。前者为 7.36%,后者为 10.41%。土壤剖面不同深度含水量差异更加明显;0—30 cm 短伐桉树林为 6.08%,椰树林为 6.93%;30—80 cm 差距逐渐拉大,短伐桉树林为 7.09%,椰树林为 10.33%;至 80 cm 以下,短伐桉树林年均土壤含水量为 8.10%,而椰树林为 11.95%。表层受外界影响较大,而深层更多因为人工林类型差异引起的蒸腾耗水差异。因短伐桉树林消耗较多的深层土壤水分,致使其深层土壤含水量较椰树林低得多,表明短伐桉树林对土壤深层水分有较大负面影响。

3.4 桉树林土壤水分对林龄的响应

3.4.1 短伐连栽桉树林的土壤水分响应

2010—2012 年短伐连栽桉树林二代 5 年桉树林、三代 1 年桉树林、三代 4 年桉树林的年均土壤含水量分别为 7.70%、7.95% 和 6.43%。代次相同,林龄越大,土壤含水量愈少。主要因为短伐连栽,林龄较大(5—7 年)的树木往往处在生长的旺盛期,需水量较大的缘故。林龄相近,连栽代次愈多,土壤含水量愈少;二代 5 年桉树林土壤含水量为 7.70%,高于三代 4 年桉树林的 6.43%。与林龄对土壤水分含量的影响相比,代次对土壤水分含量的影响较小,尤其是刚刚采伐之后的 1a 林地,因植物蒸腾耗水较少,土壤水分含量相对增加较多。三代 1 年桉树林的土壤含水量为 7.95%,高于三代 4 年桉树林的 6.43%,也略高于二代 5 年桉树林的 7.70%。可见,桉树林土壤含水量除受降水条件影响外,林龄、代次,尤其是前者的影响也很大。

3.4.2 短伐连栽桉树林与 20a 桉树林对土壤水分的响应

2010—2012 年短伐桉树林 0—150 cm 土层平均土壤水分含量明显低于 20a 桉树林,前者为 7.36%,后者为 10.45%。随着土层深度增加,短伐桉树林与 20 年桉树林土壤含水量均逐渐增多,但 20a 桉树林增加的幅度更大。短伐桉树林 0—30 cm、30—80 cm 以及 80 cm 以下土层土壤含水量分别为 6.08%、7.09% 和 8.10%,而 20a 桉树林则分别为 7.53%、10.41% 和 11.72%。短伐连栽桉树林与 20a 桉树林样地空间相邻,光照、降水等条件相同,其土壤含水量差异可能主要与人工林类型及其特征有关。表层受地表蒸发与植物蒸腾共同影响,而深层更多因为人工林类型差异引起的蒸腾耗水差异;下层土壤含水量差异增大表明,与 20 年桉树林相比,短伐桉树林对土壤深层水分有较大负面影响。

4 结论与讨论

(1)海南西部桉树林和椰树林的土壤季节性缺水严重,大气降水显著地影响土壤水分年内变化。

海南西部桉树林和椰树林的土壤含水量随降水量增加而增加,二者成极显著正相关。其中7—10月土壤含水量较高,而11月至次年6月土壤含水量逐渐减少,并于雨季来临之前,土壤含水量降到最低。雨季前期林地土壤含水量常降到5.0%以下,严重影响人工林正常生长^[18]。

(2)20a桉树林的土壤含水量与当地10a椰树林之间差异不显著,而短伐桉树林的土壤含水量显著低于相邻的10a椰树林的土壤含水量。即与10a椰树林相比,20a桉树林对土壤水生态负面影响较小,而短伐桉树林则对土壤产生较大水生态负面影响。

林龄对土壤含水量影响极大。幼林土壤含水量增加,桉树林砍伐之后1—2a土壤蓄积水分增加、径流也增加^[19-20]。之后,桉树林蒸腾耗水增加,峰值出现在5—7a,此阶段土壤含水量降低也显著^[21]。8—10a以后桉树林蒸腾耗水减少,土壤含水量变化较小^[22]。成熟林蒸腾耗水减少,对土壤水生态环境影响较小,与本研究20a桉树林对土壤水生态负面影响较小结论相一致^[23]。同样,桉树林砍伐之后土壤水分恢复对桉树林后期生长以及土壤水生态环境改善具有重要作用。

(3)桉树林和椰树林土壤剖面上层的含水量较低,而下层较高;林龄较大的短伐桉树林的深层土壤含水量较低,且变幅较大,表明其对深层土壤水分的消耗较多,对土壤深层水分有较大负面影响。

研究表明,地表因容易受蒸发和植物蒸腾耗水的双重影响,表层土壤含水量较低,变化幅度较大;而深层土壤水分受外界降水、气温等环境因子的影响较小,土壤含水量较高,变化幅度较小^[24]。林龄较大的短伐桉树林因受土壤水分胁迫,根系吸收较多深层土壤水分,致使深层土壤水分含量降低,土壤水分变幅增大^[25-26]。

尽管对桉树林的土壤水生态影响存在不同认识,但都不否认桉树林可能直接或间接对当地土壤水生态构成负面影响^[27]。Lane等认为桉树种植破坏区域水分平衡,威胁农业和生活用水安全^[28];Poore等指出,桉树林营林方式以及种植区环境条件是造成桉树林水生态问题的重要原因^[29-30]。因而,开展桉树林土壤水分变化特征其对林龄的响应研究,对优化人工林经营,促进土壤水分恢复,减缓短伐连栽桉树林对海南西部土壤水生态的负面影响及实现林业的持续发展具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 平亮, 谢宗强. 引种桉树对本地生物多样性的影响. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1765-1774.
- [2] 夏体渊, 段昌群, 张彩仙, 付登高, 段宗颜, 达良俊. 桉树人工林与邻近区域群落土壤肥力研究. 云南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(1): 118-123.
- [3] Lomba A, Vicente J, Moreira F, Honrado J. Effects of multiple factors on plant diversity of forest fragments in intensive farmland of Northern Portugal. Forest Ecology and Management, 2011, 262(12): 2219-2228.
- [4] 黄承标. 桉树生态环境问题的研究现状及其可持续发展对策. 桉树科技, 2012, 29(3): 44-47.
- [5] Cornish P M, Vertessy R A. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a *Eucalypt* forest. Journal of Hydrology, 2001, 242(1/2): 43-63.
- [6] Sikka A K, Samra J S, Sharda V N, Samraj P, Lakshmanan V. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. Journal of Hydrology, 2003, 270(1/2): 12-26.
- [7] 徐大平, 张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展. 广西林业科学, 2006, 35(4): 179-187.
- [8] Soares J V, Almeida A C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. Journal of Hydrology, 2001, 253(1/4): 130-147.
- [9] 白嘉雨, 甘四明. 桉树人工林的社会、经济和生态问题. 世界林业研究, 1996, 9(2): 63-68.
- [10] Shiva V, Bandyopadhyay J. *Eucalyptus*-a disastrous tree for India. Ecologist, 1983, 13(5): 184-187.
- [11] Calder I R, Rosier P T W, Prasanna K T, Parameswarappa S. *Eucalyptus* water use greater than rainfall input-a possible explanation from southern India. Hydrology and Earth System Sciences, 1997, 1(2): 249-256.
- [12] Dye P, Versfeld D. Managing the hydrological impacts of South African plantation forests: an overview. Forest Ecology and Management, 2007, 251

- (1/2): 121-128.
- [13] 李军, 陈兵, 李小芳, 赵玉娟, 次仁央金, 蒋斌, 胡伟, 程积民, 邵明安. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应. 生态学报, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [14] 侯宽昭, 徐祥浩. 海南岛的植物和植被与广东大陆植被概况//植物生态学与地植物学资料丛刊, 第4号. 北京: 科学出版社, 1955: 1-52.
- [15] 钟继洪, 廖观荣, 李淑仪, 郭庆荣, 谭军, 蓝佩玲. 雷州半岛桉林——砖红壤水分动态变化特征研究. 土壤与环境, 2001, 10(4): 282-284.
- [16] Davidson J. Ecological aspect of *Eucalyptus* plantation//Regional Expert Consultation on *Eucalyptus*. Bangkok, Thailand: RAPA/FAO, 1995, (1): 35-72.
- [17] Zhao C J, Bi H, Zhang B, Deng Q W. Effects of forest ages on spring soil moisture environment of *Eucalyptus* plantations in the western part of Hainan Island//2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE). Nanjing: RSETE, 2011, (1): 272-274.
- [18] 范文斌, 赵从举, 林智, 陈浩. 海南西部桉树人工林生长特征及其对气候环境的响应. 林业资源管理, 2013, (2): 77-82.
- [19] 李耀林, 郭忠升. 平茬对半干旱黄土丘陵区柠条林地土壤水分的影响. 生态学报, 2011, 31(10): 2727-2736.
- [20] Van Lill W S, Kruger F J, Van Wyk D B. The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. Journal of Hydrology, 1980, 48(1/2): 107-118.
- [21] Forrester D I, Collopy J J, Morris J D. Transpiration along an age series of *Eucalyptus globulus* plantations in southeastern Australia. Forest Ecology and Management, 2010, 259(9): 1754-1760.
- [22] Bren L, Lane P, Hepworth G. Longer-term water use of native *Eucalyptus* forest after logging and regeneration: The Coranderk experiment. Journal of Hydrology, 2010, 384(1/2): 52-64.
- [23] Buckley T N, Turnbull T L, Pfautsch S, Gharun M, Adams M A. Differences in water use between mature and post-fire regrowth stands of subalpine *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. Forest Ecology and Management, 2012, 270: 1-10.
- [24] 余雷, 张一平, 沙丽清, 宋清海, 谭正洪, 周文君, 武传胜. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因子. 生态学杂志, 2013, 32(2): 332-336.
- [25] Boden D I. The relationship between soil water status, rainfall and the growth of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal, 1991, 156(1): 49-55.
- [26] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 邱志军, 徐大平, 高吉喜, 胡哲森. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [27] Kallarackal J, Somen C K. Water use by *Eucalyptus tereticornis* stands of differing density in southern India. Tree Physiology, 1997, 17(3): 195-203.
- [28] Lane P N J, Morris J, Zhang N N, Zhou G Y, Zhou G Y, Xu D P. Water balance of tropical *Eucalyptus* plantations in southeastern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(3/4): 253-267.
- [29] Poore M E D, Fries C. The ecological effects of *Eucalyptus*//FAO, ed. FAO Forestry Paper No. 59. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985: 53-55.
- [30] Calder I R, Hall R L, Prasanna K T. Hydrological impact of *Eucalyptus* plantation in India. Journal of Hydrology, 1993, 150(2/4): 635-648.