

文章编号: 1008-2786-(2017)6-790-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000279

元江干热河谷土壤温湿度变化 及其对干旱的响应

刘运通¹ 金艳强^{1,4} 李 敬^{1,4} 张一平^{1,2*} 李培广^{1,3}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223;

2. 中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南 景东 676209;

3. 中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态系统生态站, 云南 元江 653300; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 随着全球变暖, 干旱发生的频率和强度不断上升, 但生态系统对干旱的响应机理尚不清楚。为把握生态系统整体对干旱的响应, 以元江稀树冠草丛生态系统为研究对象, 搭建了冠层上方的整体截雨试验平台, 共设 4 个处理: 空白 (CK), 截雨 30% (PE3), 截雨 50% (PE5) 和截雨 70% (PE7), 每个处理 3 个重复。主要通过土壤水分、土壤温度对不同截雨处理的响应评估该控雨平台的控水效应, 为研究稀树冠草丛生态系统整体对干旱的响应提供试验基础。结果表明: 元江年均气温逐年升高 ($P < 0.05$), 降雨逐年降低 ($P > 0.05$), 年均最高气温上升最快 ($P < 0.05$); CK、PE3、PE5 和 PE7 处理下土壤 10 cm 水分含量年均值分别为 17.2%、12.9%、10.3% 和 9.1%, 各处理土壤 10 cm 水分含量在干季、雨季和全年尺度上均差异极显著 ($P < 0.01$); 10 cm 土壤温度在各截雨处理下依次升高分别为 25.1 °C (CK)、25.2 °C (PE3)、25.8 °C (PE5) 和 26.5 °C (PE7), 且无论在干季、雨季还是全年尺度上 PE7 处理与 PE3 和 CK 处理差异显著 ($P < 0.05$), 其它处理间无差异 ($P > 0.05$); 该冠层上方截雨平台对生态系统整体控水的控水效果 (EPE, 70.0% ~ 84.0%) 优于国内外冠层下方控穿透雨试验平台 (EPE $\leq 35.0\%$)。该平台为研究生态系统整体对干旱响应提供了良好的方法。

关键词: 干旱; 截雨试验; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: P467

文献标志码: A

在气候变化和人类活动的双重作用下中国的干旱呈现出发生频率和损失不断增加的特点^[1]。干旱是元江干热河谷和世界萨王纳地区普遍面临的问题, 近 60 年中国大陆的气象干旱面积百分率出现增加趋势^[2]。自二十一世纪以来, 云南极端干旱事件频繁发生, 尤其 2009—2011 年的连旱是有气象记录以来最严重的干旱^[3-5]。干旱导致干热河谷的边界向更高的海拔和上下游发展, 干热河谷支流的林线

较快上移或者森林植被直接消失, 干热河谷的干旱化不断加剧^[6]。据预测干旱将会导致我国西南地区干热河谷地区的面积进一步扩大^[7]。

干旱发生后首先影响的是土壤水分和土壤温度。干旱后土壤水分的降低增加了土壤水向植物根系运输的阻力, 限制了土壤水向根系的运输, 降低了蒸腾和树干液流^[8], 这直接影响到地上作物的代谢甚至生死^[9], 造成植物在大尺度上的变化^[10]。土壤

收稿日期 (Received date): 2016-5-24; 改回日期 (Accepted date): 2017-08-14

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金-青年基金项目 (41405143); 国家自然科学基金-云南省基金联合项目 (U1202234); 云南省科技厅面上项目 (2015FB186); 中国科学院战略性先导专项 (XDA05050601; XDA05050206) [National Nature Science Foundation of China (41405143; U1202234); Natural Science Foundation of Yunnan Province (2015FB186); The "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050601; XDA05050206)].

作者简介 (Biography): 刘运通 (1979-), 男, 河北沧州人, 助理研究员, 主要从事温室气体与全球变暖方面的研究 [Liu Yuntong (1979-), male, born in Cangzhou, Hebei Province, assistant professor, research on the relationship between GHGs emission and global warming]. E-mail: liuyuntong@xtbg.ac.cn

* 通信作者 (Corresponding author): 张一平 (1957-), 男, 研究员, 主要从事森林生态系统碳循环方面的研究 [Zhang Yiping (1957-), male, professor, research on carbon cycle in forest ecosystems]. E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

温度和水分的变化对土壤微生物群体的数量与活力产生影响^[11],进而对土壤物理化学过程产生影响,从而影响到全球都在关注的土壤温室气体的排放或吸收^[12],进而对全球变化造成一定的影响。因此土壤温、湿度的对干旱的响应,是研究生态系统对干旱响应的基础。但是目前的干旱试验研究中,主要集中在生态系统对干旱的响应^[13-14],反而对土壤温、湿度等基本参数对干旱响应的专项研究较少,在研究中进行了少量的提及^[15]。因此本文将对土壤温、湿度对干旱的响应开展研究。

前人在研究干旱对生态系统的影响方面做了大量的工作。在中国元江^[16-17]和美国的栋树草原^[15]科学家利用自然干旱条件研究了干旱对植物生理生态的影响;在中国长白山^[18]、鼎湖山^[19]印度尼西亚^[20]和亚马逊地区^[8-9,14]等森林地区,科学家们利用林下截森林穿透雨的试验平台来研究干旱对森林生态系统的影响。然而以上介绍的森林干旱试验截的均是林下穿透雨,未考虑冠层的影响,缺乏林冠上层的整体截雨试验研究。因此这些试验不能真实的反映干旱对生态系统的整体影响。为了更好的把握干旱对生态系统的影响,本研究根据前人模拟干旱的方法^[8-9,14,20],在元江稀树灌木丛生态系统中搭建了植被冠层上方的整体截雨试验平台,模拟不同程度的截雨对土壤水分、土壤温度的影响,评估该平台截雨的效果,为研究干旱对生态系统整体影响提供原位试验基础。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验样地位于云南省元江县东南26 km的普漂村中国科学院西双版纳热带植物园元江生态站(图1,23°28′30″N、102°10′38″E,海拔580 m)。属热带半干旱河谷气候类型,以干热为主要特点^[21]。年平均气温23.9℃,最热月(6月)平均气温29℃,最冷月(1月)平均气温16.8℃。干季、雨季明显,年平均年降雨量802 mm,雨季(5—10月)为634 mm,占全年的79.2%,干季(11至次年4月)为166 mm,占全年的20.8%(图2,50年气象数据)。土壤为燥红壤,呈中性偏碱($\text{pH} = 7.6$)。植被主要有扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、厚皮树(*Lanneacoromandelic*)、疏序黄荆(*Vitex negundo*)和霸王鞭(*Euphorbia neriifolia*)。

1.2 试验设计

本研究共设4个处理分别为:对照(CK)、截雨30%(Rainfall Interception 30%,PE3)、截雨50%(Rainfall Interception 30%,PE5)和截雨70%(Rainfall Interception 70%,PE7)4种处理,每个处理3个重复,空白处理与3个截雨处理在同一保护区的两块围封样地中,两块样地间距离150 m,两块样地的植被、土壤无差别。其中每个重复样地的大小为10×10 m,重复小区间有1 m的隔离带。

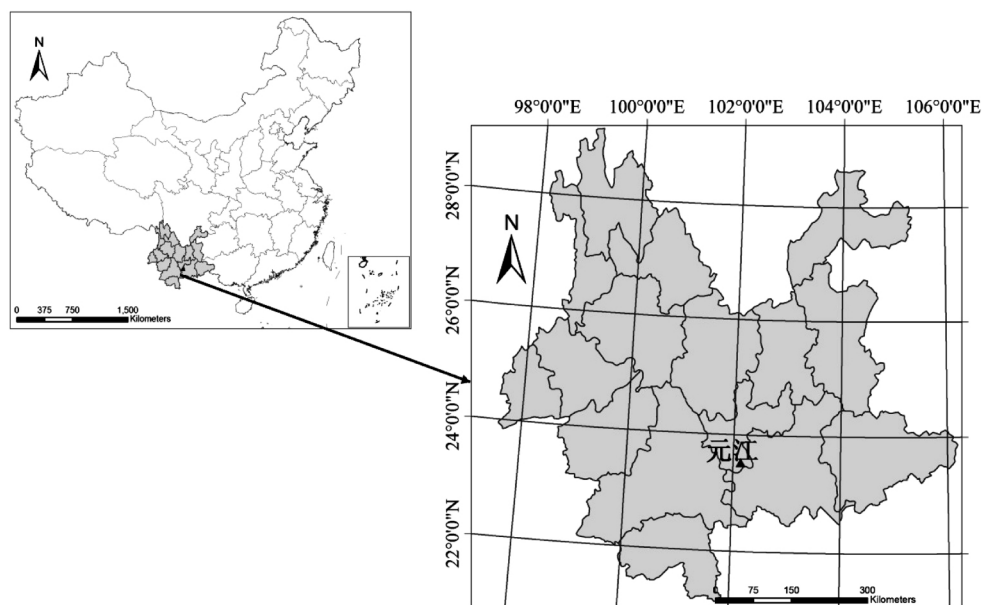


图1 试验点元江地理信息图

Fig.1 Geographical location in Yuanjiang

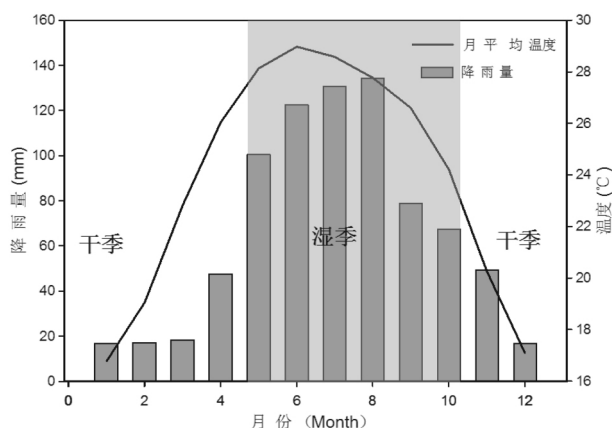


图2 1965—2014年元江月均温度与月均降雨量

Fig. 2 Monthly mean rainfall and temperature from 1965 to 2014

3个截雨处理的隔离带两侧及试验区外围均挖有深至岩石层(~50 cm深)的隔水沟,隔水沟中铺设双层的聚乙烯塑料布,防止雨水在试验小区串流和小区外的雨水流入试验区(图3)。截雨处理均采用透明的PC板(polycarbonate,透光率90%)进行隔水,PC板按照截雨面积30%、50%和70%安装在7 m高的钢管架上。每个重复截留的降雨分别通过各重复小区的导流槽流出试验区,该平台建成于2014年3月份,经过稳定、调试后于2014年6月份开展生物量调查等相关研究,土壤温度、水分探头2014年5月安装,本研究中采用的数据是2015年1月1日至2015年12月31日一整年的试验。

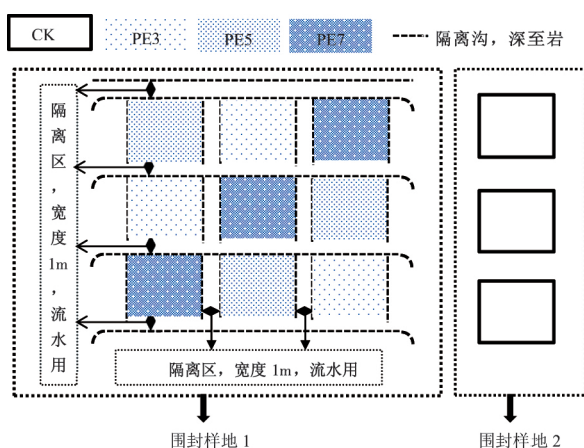


图3 试验处理示意图

Fig. 3 Layout of the experiment site

1.3 土壤水分、土壤温度测定

试验中土壤温度、土壤水分均采用CS616(Campbell Scientific Inc., USA)传感器,研究中共4个处理CK、PE3、PE5和PE7,每个处理3个重复,每

个重复样地埋设一个传感器,共12个,埋设深度为10 cm,采用CR800(Campbell Scientific Inc., USA)进行数据采集,采集频率为0.5 h,采集的数据进行日平均,采用时间段为2015年1月1日至2015年12月31日,主要分析干季、雨季和全年各处理间土壤水分、土壤温度的差异。

1.4 气象数据

2015年气象数据来自元江生态站的观测数据,主要用于与试验处理CK、PE3、PE5和PE7间土壤湿度的相关分析。历史(1965—2014)气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),主要用于分析元江的气温与降雨的变化趋势。

1.5 数据分析

为了便于与其它学者的控雨平台的整体控雨效果比较,研究中把控雨平台下土壤含水量较空白处理土壤含水量的降低幅度(PW,%)与控雨面积(ES,%)的比值作为衡量控雨效果(EPE,%)的指标。

$$EPE = PW/ES \times 100 \quad (1)$$

数据分析采用Person线性相关法分析土壤水分与降雨的关系,通过单因素方差分析,分析各处理间是否有差异,分析软件采用SPSS 16.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA),画图采用sigmaplot12.5(Systat Software, Inc., Point Richmond, CA, USA)。

2 结果与分析

2.1 元江近50年气候变化

目前全球变暖与干旱已经成为一个不可忽视的问题,1901—2012年全球温度上升0.89(0.69 to 1.08) °C,湿润地区将有更多降水,而干旱地区的降水将变得更少^[22]。那么元江的温度与降水的变化趋势如何呢,我们采用中国气象数据网元江气象站50(1965—2014)年的降雨、最高温、最低温和气温进行了分析,结果如图4所示。

年均平均气温50年平均值为23.9(图4a, 22.8~24.9) °C,年均最高气温50年平均值为30.7(图4b 29.6~32.8) °C,年均最低气温50年平均值为19.4(图4c 18.4~20.0) °C,年降雨量50年平均值为802(图4d 517~1211) mm。经过对最高气温、最低气温、平均气温和降雨量50年数据分别做线性拟合得出,最高气温($P < 0.05$)、最低气温($P < 0.05$)、平均气温($P < 0.05$)的变化趋势是上升的,

且最高温上升最快,降雨量($P > 0.05$)是降低的。那么进入本世纪后,元江气候的变率是加快了还是减缓了呢?因此以2000年为起点,对进入21世纪后的元江气候进行了再分析,经过对2000(2000—2014)年以来的数据进行线性拟合得出,最高温($P < 0.05$)、最低气温($P < 0.05$)、平均气温($P < 0.05$)

的上升趋势更快约是50年拟合趋势的5倍,降雨量($P > 0.05$)的下降趋势也更加明显,约是50年降雨拟合数据的6倍。2009—2012年降雨连续较低的4年(图4d),这4年的平均降雨量为633(517~705)mm,较50年平均降雨量降低21.1%,其中极其干旱的2012年(507mm)较平均降雨量降低36.8%。

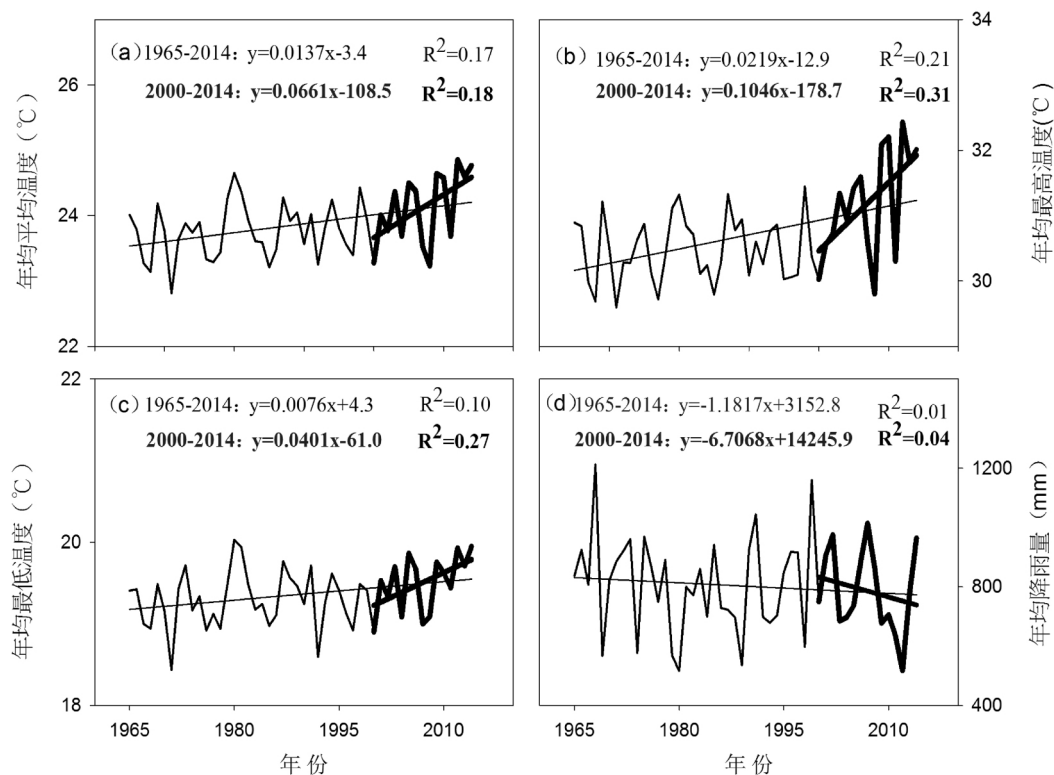


图4 1965—2014年元江年均最高温、最低温、平均温度和降雨年际变化

Fig. 4 Annual variation of average maximum, minimum, mean air temperature and rainfall from 1965 to 2014 at Yuanjiang

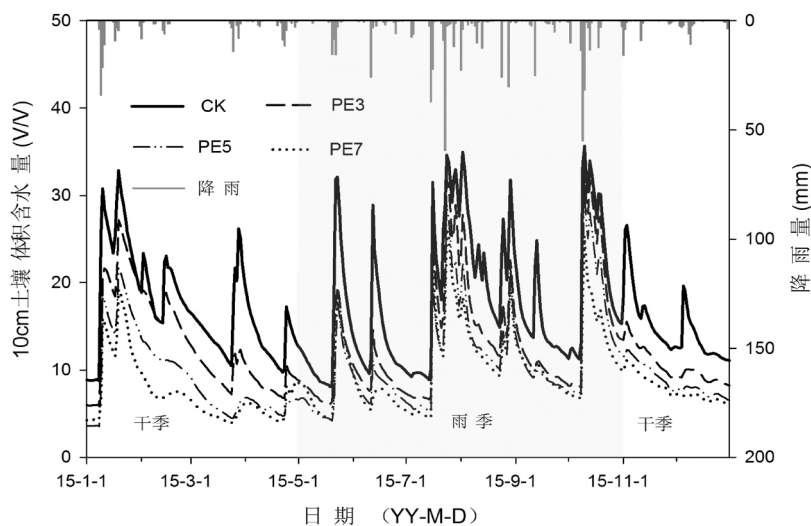


图5 2015年降雨及各处理下10 cm土壤含水量季节动态,阴影部分表示雨季

Fig. 5 Seasonal variations of daily rainfall and soil moisture at 10 cm for each rainfall interception condition in 2005; The shaded area denotes the rain season

以上结果表明元江的气温有升高的趋势,降雨有降低的趋势,尤其2000年以来更加明显。

2.2 各处理下土壤湿度变化情况

2015年各处理下土壤含水量及降雨量的季节动态如图5所示,2015年元江站的降雨量为798 mm,与50年均值802 mm基本持平,雨季降雨量为552 mm,占全年降雨量的69.2%,较50年平均79.2%降低了10%。每次降雨或连续降雨均引起土壤水分的上升(图5)。经Person相关分析得出,各处理下土壤含水量与降水量均显著相关($P < 0.05$)。

在季节尺度上CK、PE3、PE5和PE7各处理下土壤含水量均表现出了干季较雨季低,最高值均出现在雨季,最低值均出现在干季的特征(图5),且各处理下土壤含水量在干季和雨季均差异极显著($P < 0.01$,表1)。CK、PE3、PE5和PE7各处理下土壤含水量日均值在干季和雨季的差有所不同,根据表1得出CK、PE3、PE5和PE7处理下干季较雨季土壤含水量日均值分别降低7.8%、9.6%、20.9%和28.3%,即按截雨程度的增加而增加。经方差分析,均表现为极显著降低($P < 0.01$),表明截雨程度越高,对干季、雨季土壤含水量的差异影响越大。同时相对空白处理,各截雨处理下土壤含水量在干季、雨季均显著降低,其中干季降低最高,在PE3、PE5和

PE7处理下分别降低25.8%、45.4%和58.0%,雨季最低,在PE3、PE5和PE7处理下分别降低24.7%、35.9%和40.8%(表1)。以上结果表明,干旱对土壤水分在干季的影响最大。

在全年尺度上土壤水分空白处理下最高,年均值为17.2(8.1~35.7)%,其次是PE3处理12.9(5.9~33.5)%,PE5处理10.3(4.2~30.9)%和PE7处理9.1(4.0~26.2)%,且各处理间土壤含水量年差异极显著($P < 0.01$,表1)。相对空白处理,各截雨处理下土壤含水量均显著降低,在PE3、PE5和PE7处理下分别降低25.2%、40.4%和49.0%,表明截雨程度越高,对土壤含水量的影响越大,达到了试验设计的要求。

2.3 各处理下土壤温度变化情况

在季节尺度上各处理下土壤10 cm温度均表现为雨季高于干季,最高值出现在雨季,最低值出现在干季的特征(图6),结合2.2部分的降雨结果表明元江气候表现为雨热同季。根据表1得出CK、PE3、PE5和PE7处理下干季较雨季土壤含水量日均值分别降低22.0%、20%、22.1%和20.3%,且达到极显著水平($P < 0.01$)。但与雨季相比,各处理下土壤10 cm温度在干季降低的幅度没有表现出和土壤含水量相似的按截雨程度增加而增的规律,且处理间数值大小相差不大,表明截雨处理对土壤

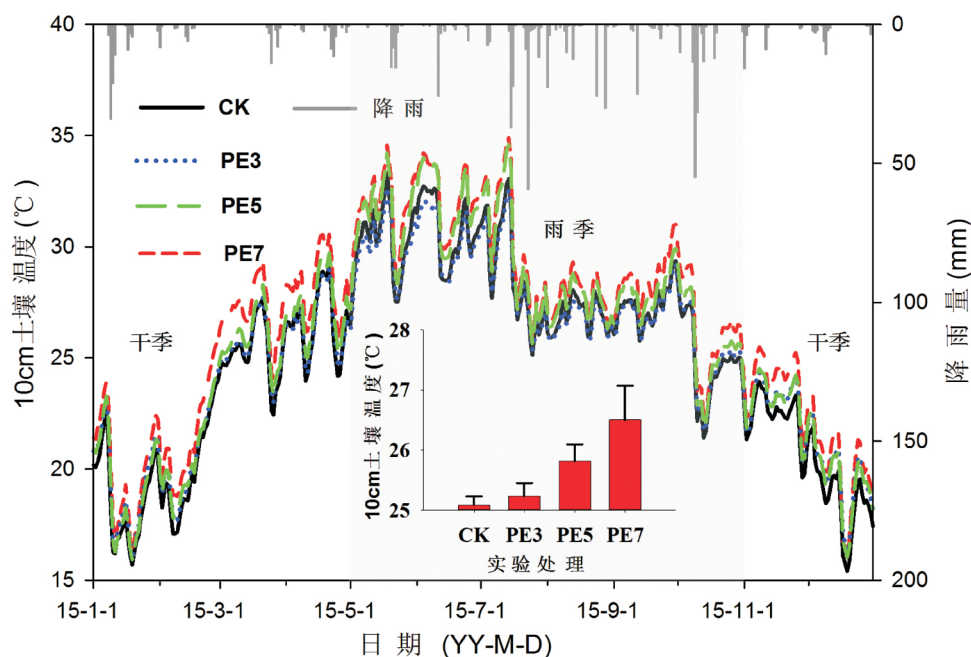


图6 2015年降雨及各处理下10 cm土壤温度季节动态 阴影部分表示雨季 红色柱图表示各处理的年均值和标准差

Fig. 6 Seasonal variation of daily rainfall and soil temperature at 10 cm of each treatment in 2005, the shaded area denotes the rain season, the bar chart was the average annual temperature at 10 cm and stand errors for different rainfall interception conditions

表 1 各处理下土壤水分、温度在干季、雨季及全年的日均值及其相对空白的增幅

Tab. 1 Daily mean value and the percentage increase in soil moisture and soil temperature for each treatment in the dry season, the rain season and a whole year respectively

土壤指标	处理	日均值			截雨处理相对空白的增幅(PW, %)		
		干季	雨季	全年	干季	雨季	全年
10 cm 土壤水分(V/V)	CK	16.5A	17.9A	17.2A			
	PE3	12.2B	13.5B	12.9B	-25.8	-24.7	-25.2
	PE5	9.1C	11.5C	10.3C	-45.4	-35.9	-40.4
	PE7	7.6D	10.6D	9.1D	-58.0	-40.8	-49.0
10 cm 土壤温度(°C)	CK	22.0b	28.2b	25.1b			
	PE3	22.4b	28.0b	25.2b	2.0	-0.5	0.6
	PE5	22.6ab	29.0ab	25.8ab	2.8	3.0	2.9
	PE7	23.5a	29.5a	26.5a	7.0	4.6	5.6

注: 小写字母的不同表示 0.05 水平差异显著, 大写字母不同表示 0.01 水平差异显著 Note: The mean values with different lowercase letters are significantly different at $P=0.05$. The mean values with different uppercase letters are significantly different at $P=0.01$

10 cm 温度在干季和雨季的差异影响不大, 远不如对土壤水分在干季和雨季差异的影响。同时相对空白处理, 各截雨处理下土壤 10 cm 温度在干季、雨季均有降低, 其中干季降低最高, 在 PE3、PE5 和 PE7 处理下分别降低 2.0%、2.8% 和 7.0%, 雨季最低, 在 PE3、PE5 和 PE7 处理下分别降低 -0.5%、3.0% 和 4.6% (表 1)。以上结果表明, 相对于雨季, 干旱土壤温度在干季影响较大, 但是不如土壤水分显著。

在 CK、PE3、PE5 和 PE7 处理下, 土壤 10 cm 温度在 PE7 处理下最高, 年均值为 26.5 (16.1 ~ 34.9) °C, 其次是 PE5 处理 25.8 (15.9 ~ 34.6) °C, PE3 处理 25.2 (15.9 ~ 32.7) °C 和 CK 处理 25.1 (15.4 ~ 32.6) °C (图 6, 表 1)。在全年尺度上经过方差分析得出, 处理 PE7 与处理 PE5 差异不显著 ($P>0.05$), 与其它两个处理 PE3 和 CK 差异均显著, PE5 与 PE3 和 CK 处理差异不显著 ($P<0.05$, 表 1)。相对空白处理, 各截雨处理下土壤 10 cm 温度在全年尺度上均有降低, 在 PE3、PE5 和 PE7 处理下分别降低 0.6%、2.9% 和 5.6% (表 1), 表明在全年尺度上, 截雨对土壤温度是有影响的, 但不如对土壤水分的影响显著。

3 讨论

3.1 元江气候变化

研究中得出元江年均最高气温、年均最低气温和年均平均气温均有升高趋势, 这与 IPCC 报告的全球温度升高的结论一致^[22]。但是元江的年均最高气温升温速率较年均最低气温和年均平均气温是

最高的, 这与其它学者得出的最低气温的升温速率最快的结论不一致^[23-24]。分析其中的原因可能是: 元江的生态系统是河谷型萨王纳生态系统^[25], 地面植被稀疏且多沙漠植被如霸王鞭、仙人掌、芦荟等^[26], 太阳辐射易直射裸露的表土, 造成年蒸发量较大^[17]; 元江的辐射较强, 尤其净辐射很高^[27], 容易形成高温; 元江的表土以沙性土壤为主, 热容比较壤土和水均低, 温度上升比较快。

3.2 土壤水分对截雨平台的响应

元江各处理的截雨效果均较好, 在全年尺度上截雨处理 PE3、PE5 和 PE7 较 CK 空白处理土壤水分年均分别降低 25.2%、40.4% 和 49.0%, 处理间土壤水分含量差异极显著 ($P<0.01$), 其中干季高于雨季 (表 1)。与西双版纳热带雨林截雨试验中得出的: 截雨效果雨季高于干季的结论^[28]相反, 分析其原因主要是因为 2015 年干季不干, 降雨量较 50 年平均值高提高了 10%, 使得干季各处理下土壤含水量的峰值与雨季相比并不低, 但是由于干季降雨频率低, 降雨间隔长, 因此截雨处理下土壤水分的差异就会变大, 导致干季的截雨效果显著 (图 5), 雨季的降雨量虽然不高, 但是降雨频率较高, 使得土壤含水量在一段时间内维持一个较高的水平, 导致雨季不同截雨处理间土壤水分含量差异较小, 尤其在 7 月底 8 月初和 10 月初这两个时间段 (图 5)。

PE3、PE5 和 PE7 处理下控雨面积分别为 30%、50% 和 70%, 根据方程 (1) 得出, PE3、PE5 和 PE7 下截雨效果 EPE 分别为 84.0%、80.8% 和 70.0%。然而其它学者在森林中的截雨试验效果并没有这么好, 如 Zhang 等在中国西双版纳热带雨林截雨面积

50% ,较空白土壤含水量在干季降低 14.9% ,雨季降低 17.5% ,截雨效果 EPE 在干季和雨季分别为 30.0% 和 35.0%^[28]; Fisher 等在亚马逊热带雨林做的截穿透雨面积 80% ,土壤含水量较空白降低 24% ,截雨效果 EPE 值 30.0%^[8]; Moser 等印度尼西亚截穿透雨面积 60% 和 80% ,土壤含水量的较空白分别降低 17.3% 和 26.2% ,截雨效果 EPE 值分别为 28.8% 和 32.8%^[20]。这些研究的截雨效果均较本研究差,主要原因估计是本研究的截雨平台是在树冠层上方 7 m 高的地方搭建的整体降雨平台,而世界上其它森林的截雨平台都是在林下搭建的截穿透雨的试验平台,不能考虑雨水顺着树干流到地面的部分和冠层的影响,因此其截雨效果不如本研究平台显著。表明冠层上方截雨试验平台为研究干旱对生态系统的整体影响提供了良好的试验平台。

3.3 土壤温度对截雨平台的响应

土壤温度在各截雨处理下均较空白处理高,且无论干季、雨季还是全年尺度上均按截雨的大小依次升高 $PE_7 > PE_5 > PE_3 > CK$,其中 PE_7 处理显著高于 PE_3 和 CK 处理($P < 0.05$,表 1), PE_5 与其它各处理差异均不显著($P > 0.05$,表 1)。分析其原因可能是截雨造成的土壤水分产生了显著差异,土壤水分的改变,导致土壤整体热容比的改变,因此土壤表层的 10 cm 温度也会随之变化,这种变化与土壤水的变化大小相反。世界上其它森林的截雨研究结果显示,截雨不能改变土壤温度,如 Zhang 等的结果显示,截雨 50% 土壤温度没有差异^[28]; Jiang 等在中国广州鼎湖山的结果显示,截雨 100% ,土壤温度没有差异^[19]; Nina 等在澳大利亚墨尔本的桉树林中的研究结果显示,截雨 40% 土壤温度没有差异^[8]。分析其原因是其他的截雨试验的截雨效果并不如本研究,土壤水分的差异没有本研究显著,且均在密闭的森林中进行^[8,28],太阳辐射对土壤温度的影响较小,因此对土壤温度的影响不大。

4 结论与展望

本研究通过对元江稀树灌草丛生态系统顶部截雨,研究不同程度的干旱对土壤水分、土壤温度的影响,得出以下结论:(1)元江的气温在逐年上升,降雨逐年下降;(2)各截雨处理下土壤 10 cm 水分含量在干季、雨季和全年尺度上均差异极显著($P < 0.01$),土壤温度随着截雨强度的增加而增加;(3)本研究中整体控雨平台的控水效果(EPE 70.0% ~

84.0%)明显优于其它研究中的穿透雨控制平台($EPE \leq 35.0\%$),为研究生态系统整体对干旱的响应提供了原位试验基础。

由于研究中未涉及到植物生理、物候、土壤物理性质、生态系统养分(C、N)循环等更深入的研究,且控雨时间较短,因此对于该控雨平台的整体效果有待于进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] 邱海军,曹明明,郝俊卿,等. 1950—2010 年中国干旱灾情频率—规模关系分析[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 576—580 [QIU Haijun, CAO Mingming, HAO Junqing, et al. Relationship between frequency and magnitude of drought damage in China in 1950—2010 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 576—580]
- [2] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2013 91—96. [National Development and Reform Commission. People's Republic of China second national communication on climate change [M]. Beijing: China planning press, 2013, 91—96]
- [3] 彭贵芬,刘盈曦. 云南降水多周期叠加与连续特大气象干旱关系及趋势预估研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(4): 530—537 [PENG Guifen, LIU Yingxi. A study on relationship between annual precipitation multi-cycle superposition and continuous severe drought in Yunnan with trend prediction [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2014, 36(4): 530—537]
- [4] 陶云,张万诚,段长春,等. 云南 2009—2012 年 4 年连旱的气候成因研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(6): 866—874 [TAO Yun, ZHANG Wancheng, DUAN Changchun, et al. Climate causes of continuous drought over Yunnan Province from 2009 to 2012 [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2014, 36(6): 866—874]
- [5] 据建华,吕俊梅,谢国清,等. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 401—406 [JU Jianhua, LV Junmei, XIE Guoqing, et al. Studies on the influences of persistent anomalies of MJO and AO on drought appeared in Yunnan [J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(4): 401—406]
- [6] 杨兆平,常禹. 我国西南主要干旱河谷生态及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 90—93 [YANG Zhaoping, ChANG Yu. Study on influence of arid climate change to drought disaster in Gansu and technique of preventing drought and reducing disaster [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(4): 90—93]
- [7] 孙辉,唐亚,黄雪菊,等. 横断山区干旱河谷研究现状和发展方向[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(3): 54—61 [SUN Hui, TANG Ya, HUANG Xueju, et al. Recent situations and its R&D of dry valleys in the Hengduan Mountains of SW China [J]. World Sci-tech R & D, 2005, 27(3): 54—61]
- [8] FISHER R A, WILLIAMS M, COSTA A L D, et al. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and

- modeling analyses from a throughfall exclusion experiment [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 2361–2378
- [9] NEPPSTAD D C, TOHVER I M, RAY D, et al. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an amazon forest [J]. *Ecology*, 2007, **88**(9): 2259–2269
- [10] HOFFMANN W A, MARCHIN R M, ABIT P, et al. Hydraulic failure and tree dieback are associated with high wood density in a temperate forest under extreme drought [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 2731–2742.
- [11] UNGERA S, MAGUAS C, PEREIRA J S, et al. Interpreting post-drought rewetting effects on soil and ecosystem carbon dynamics in a Mediterranean oak savannah [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, (154–155): 9–18
- [12] WOOD T E, DETTO M, SILVER W L. Sensitivity of soil respiration to variability in soil moisture and temperature in a humid tropical forest [J]. *PLoS ONE*, 2013, **8**(12): e80965
- [13] BALDOCCHI D D, XU L K, KIANG N. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **123**: 13–39
- [14] GATTI L V, GLOOR M, MILLER J B, et al. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements [J]. *Nature*, 2014, **506**(6): 76–80
- [15] NAJERA N H, FEST B, LIVESLEY S J, et al. Reduced throughfall decreases autotrophic respiration, but not heterotrophic respiration in a dry temperate broadleaved evergreen forest [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2015, 66–77.
- [16] 李伟 曹坤芳. 干旱胁迫对不同光环境下的三叶漆幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *西北植物学报* 2006 **26**(2): 266–275 [LI Wei, CAO Kunfang. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of *terminthia paniculata* grown under different light level [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(2): 266–275]
- [17] ZHANG S B, HUANG W, ZHANG J L, et al. Differential responses of photosystems I and II to seasonal drought in two *Ficus* species [J]. *Acta Oecologica*, 2016, **73**: 53–60
- [18] 程徐冰 吴军 韩士杰 等. 减少降水对长白山蒙古栎叶片生理生态特性的影响 [J]. *生态学杂志* 2011, **30**(9): 1908–1914 [CHENG Xubing, WU Jun, HAN Shijie, et al. Effects of decreased rainfall on *Quercus Mongolia* leaf eco-physiological characteristics [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(9): 1908–1914]
- [19] JIANG H, DENG Q, ZHOU G, Et al. Responses of soil respiration and its temperature/moisture sensitivity to precipitation in three subtropical forests in southern China [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**: 3963–3982
- [20] MOSER G, SCHULDT B, HERTEL D, et al. Replicated throughfall exclusion experiment in an Indonesian perhumid rainforest: wood production, litterfall and fine root growth under simulated drought [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**: 1481–1497
- [21] 喻赞仁. 元江河谷热带坝区自然优势及其开发[J]. *自然资源学报*, 1992, **7**(3): 235–239 [YU Zanren. On the natural superiority and exploitation of the tropical level land of the Yuanjiang river valley of Yunnan Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 1992, **7**(3): 235–239]
- [22] IPCC. Summary for policymakers//Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2013, 5–8
- [23] 陈铁喜 陈星. 近50年中国气温日较差的变化趋势分析[J]. *高原气象*, 2007, **26**(1): 150–157 [CHEN Tiexi, CHEN Xing. Variation of diurnal temperature range in China in the past 50 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2007, **26**(1): 150–157]
- [24] 董丹宏 黄刚. 中国最高、最低温度及日较差在海拔高度上变化的初步分析[J]. *大气科学* 2015 **39**(5): 1011–1024 [HUANG Danhong, HUANG Gang. Relationship between altitude and variation characteristics of the maximum temperature, minimum temperature, and diurnal temperature range in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **39**(5): 1011–1024]
- [25] 金振洲. 云南元江干热河谷半萨瓦纳植被的植物群落学研究[J]. *广西植物*, 1999, **19**(4): 289–302 [JIN Zhenzhou. A phytosociological study on the semi-savanna vegetation in the dry-hot valleys of Yuanjiang River, Yunnan [J]. *Guihaia*, 1999, **19**(4): 289–302]
- [26] ZHANG Jiaolin, ZHU Junjie, CAO Kunfang. Seasonal variation in photosynthesis in six woody species with different leaf phenology in a valley savanna in southwestern China [J]. *Tress*, 2007, **21**: 631–643
- [27] 费学海 张一平 宋清海 等. 元江干热河谷太阳辐射各分量及反照率变化特征 [J] *北京林业大学学报* 2016 **38**(3): 1–10 [FEI Xuehai, ZHANG Yiping, SONG Qinghai, et al. Characteristics of solar radiation distribution and albedo in Yuanjiang dry-hot valley, Southwest China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, **38**(3): 1–10]
- [28] Zhang X, Zhang Y P, Sha L Q, et al. Effects of continuous drought stress on soil respiration in a tropical rainforest in southwest China [J]. *Plant and Soil*, 2015, **394**(1): 343–353

Variation Characteristic of Soil Moisture and Soil Temperature in Yuanjiang Savanna Ecosystem and Its Response to Drought

LIU Yuntong¹, JIN Yanqiang^{1 4}, LI Jing^{1 4}, ZHANG Yiping^{1 2*}, LI Peiguang^{1 3}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China;

2. Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Jingdong 676209, Yunnan, China;

3. Yuanjiang Research Station for Savanna Ecosystems, Yuanjiang 653300, Yunnan, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Although the frequency and intensity of drought has been increased with global warming, the response mechanism of ecosystem to drought remains unknown. In order to investigate the global responses of the eco-system to drought, the crown canopy ecosystem in Yuanjiang savanna was targeted as a case study. A integrated rainfall interception experiment platform was designed and placed over the crown for performance testing at 4 selected scenarios: blank (CK), 30% interception (PE3), 50% interception (PE5) and 70% interception (PE7), each of them with 3 repeated trials. By examinations of the responses of soil moisture and temperature to the given rainfall under each of the four interception conditions, an evaluation was performed on the water control effects of the platform, whereby it provide new insight into the response of canopy ecosystem in savanna to drought. Results found that annual temperature average in Yuanjiang had increased for years ($P < 0.05$) along with a gradual decrease in precipitation ($P > 0.05$) and the annual maximum temperature disclosed the fastest ascending rate ($P < 0.05$). In the four testing scenarios of CK, PE3, PE5 and PE7, the annual average of soil moisture contents at 10cm were 17.2%, 12.9%, 10.3% and 9.1%, respectively, and they presented significant difference in dry season, rainy season and a year basis ($P < 0.01$). Soil temperature at 10cm deep in each of the four scenarios increased accordingly at 25.1 °C (CK), 25.2 °C (PE3), 25.8 °C (PE5) and 26.5 °C (PE7). Regardless of the dry season, rainy season or a whole year, in PE7 the temperature of soil was found an great difference as compared with values to be observed in PE3, CK ($P < 0.05$), whereas at other scenarios they exhibited less. The integrated water controlling efficiency achieved by rainfall interception platform installed above the crown (EPE, 70% ~ 84%) was proved to be better than those of the regular platforms to be seated under crown canopy ($EPE \leq 35.0\%$). In conclusion, our suggested platform could provide an acceptable approach to investigation of the response of entire ecosystem to drought.

Key words: drought; rainfall exclusion experiment; soil temperature; soil moisture