

毛竹林持续高温干旱灾害特征及影响因素分析

李迎春, 杨清平, 郭子武, 陈双林*, 胡俊靖

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要:为探讨持续高温干旱灾害天气对毛竹林生长的影响,为毛竹林抗灾减灾及灾后恢复提供参考,调查分析了毛竹林持续高温干旱灾害特征及立地条件、经营水平等对立竹受损程度的影响。结果表明:持续高温干旱天气使毛竹叶片灼伤、枯黄、失绿变白,严重的全株叶片脱落;竹秆脱水、皱缩、枯黄,中下部位出现黑斑,局部表皮灼伤。竹龄越小受损程度越严重,1度竹死亡率显著高于2度及2度以上竹。海拔高度、坡向、坡位、土壤厚度、立竹密度、经营水平等对毛竹林立竹受损程度均有较明显的影响,其中海拔较高毛竹林高于海拔较低毛竹林,阳坡毛竹林显著高于阴坡毛竹林,且上坡>中坡>下坡,土壤厚度<50 cm毛竹林明显高于土壤厚度>100 cm毛竹林,立竹密度3 750~4 500株·hm⁻²和2 250~3 000株·hm⁻²毛竹林高于立竹密度3 000~3 750株·hm⁻²毛竹林,集约经营毛竹林高于粗放经营毛竹林。典范对应分析(CCA)表明,持续高温干旱灾害对毛竹林的影响因子主要为土壤厚度、坡位,其次为海拔高度、坡向和立竹密度。

关键词:高温干旱;毛竹;灾害特征;地形;立地;经营水平

中图分类号:S795.7

文献标识码:A

Damage Characteristics of *Phyllostachys edulis* Stands under Continuous High Temperature and Drought

LI Ying-chun, YANG Qing-ping, GUO Zi-wu, CHEN Shuang-lin, HU Jun-jing

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: The extreme weather of high temperature and drought occurred in 2013 from June to August in south of Yangtze River area. The damage of high temperature and drought stress on Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) stands in Fuyang of Zhejiang Province was investigated. The relationship between environmental factors and damage degree of bamboo stands was analyzed. The result showed that the bamboo leaf was hurt severely with burning appearance and in color of withered and yellow, even lost all leaf. The damage on stems depended on bamboo age. One-year-old bamboo appeared stem dehydration, and black spot occurred in the base part of stem, four-year-old bamboo showed slight black spot but no stem dehydration, six-year-old ones appeared no black spot. The death ratio of two-year-old bamboo was higher than that of the older bamboo under the stress of high temperature and drought. The CCA analysis suggested that the damage ratio of bamboo stands significantly depended on the soil depth, slope direction and slope position. The mortality rate of bamboo was significantly negatively correlated with bamboo age. It can be concluded that the soil depth, slope direction, slope position and bamboo age are the main factors determining the tolerance of bamboo stands to the stress of high temperature and drought.

Key words: high temperature and drought; *Phyllostachys edulis*; damage characteristics; terrain; site; management intensity

收稿日期:2014-12-27

基金项目:浙江省省院合作林业科技项目(2013SY04);浙江省农业科技成果转化重大工程项目(2012T201-02)

作者简介:李迎春(1976—),女,山东高唐人,助理研究员,硕士,主要从事竹林生理生态研究。

* 通讯作者:陈双林(1965—),男,研究员,博士,主要从事竹林生态与培育研究。E-mail:cslbamboo@126.com

近年来,全球气候变化导致极端天气事件(如高温、干旱、雨雪冰冻、强降雨等)发生的频率和强度日趋增加,极端天气事件对生态系统的影响已成为国内外的研究热点^[1-3]。灾害性天气是森林生态系统重要的干扰因子,直接影响着林业生产和经营^[4-7],全球每年有数百万公顷的森林遭受飓风、冰雪灾害、干旱等极端天气的影响^[8]。不同树种因自身特点和立地条件(海拔高度、坡向、坡位等)、林分结构及经营水平的差异在同等灾害条件下受损程度不同^[9-10]。

毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)是我国特有的重要经济竹种,分布区域广,以毛竹为主要原材料的竹产业已成为区域社会经济发展的支柱产业,并在水源涵养、水土保持、固碳排氧、调节气候等方面发挥着巨大作用^[11]。但毛竹林的水分需求基本上依赖于自然降水,易受天气因素造成的水分胁迫影响。毛竹有两个重要的需水季节,一个是秋季的孕笋时期,另一个是春季的出笋及幼竹生长时期^[12]。笋期干旱,竹笋出土缓慢,数量减少,“闷头退笋”增加,残次竹增多。7-9月伏旱时,正是竹子笋芽分化时期,如发生干旱,笋芽分化减少,不仅当年冬笋产量大幅减产,而且使次年度新竹数量下降,进而影响到第3年乃至第4年度砍伐量^[13-15]。毛竹林在春季的抗旱能力一般为25 d左右,夏秋季一般为20 d左右^[16]。2013年6月下旬至8月上旬,长江以南大部分地区出现历史上罕见的持续高温少雨天气,38℃以上的酷热天气持续20 d以上,导致大量新竹死亡、老竹叶片脱落,使竹林综合效益明显下降,对毛竹林生产造成巨大影响^[5,17]。因此,灾后作者对浙江省富阳市灾害发生严重的毛竹林进行了调查,利用典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)方法对毛竹林持续高温干旱灾害特征进行分析,探讨地形、立地条件和经营水平等对毛竹林灾害程度的影响,为高温干旱灾害毛竹林的防灾减灾及灾后恢复提供参考。

1 试验地概况

富阳市毛竹林资源丰富,是浙江省毛竹重点产区之一,毛竹林面积2.9万hm²,90%以上为纯林经营,除留笋长竹外,集约经营毛竹林主要措施为林地劈山、垦复和每年一次的夏季开沟施肥,粗放经营毛竹林仅在夏季进行林地劈山,不进行林地垦复和施肥。据统计,2013年高温干旱受灾毛竹林面积达

1.7万hm²。

试验地位于富阳市新登镇湘溪村(119°41′~119°48′E, 29°57′~30°04′N),属亚热带季风性湿润气候,年平均气温16.3℃,年平均相对湿度68%,年平均降水量1452.5mm,年平均日照时数1899.9h,年平均蒸发量1235.3mm,年平均无霜期248d,主导风向为东南风。土壤类型主要为红壤。

2 研究方法

2.1 样地设置

2013年8月中下旬,对试验地主要毛竹分布区进行初步踏查,按照受灾毛竹林土壤厚度(<50cm、50~100cm、>100cm)、经营水平(粗放经营、集约经营)、海拔高度(150~250m、250~350m)、坡位(上坡、中坡、下坡)、坡向(阳坡、阴坡)、立竹密度(2250~3000株·hm⁻²、3000~3750株·hm⁻²、3750~4500株·hm⁻²)等设置20m×20m样地,每种类型毛竹林分别设置5个样地。对样地中的立竹进行年龄和灾害受损程度的每竹调查。立竹灾害受损程度类型分为4类:Ⅰ类——立竹生长正常,叶片脱落20%以下;Ⅱ类——立竹叶片脱落20%~60%,竹秆正常;Ⅲ类——立竹叶片脱落60%以上,竹秆正常;Ⅳ类——立竹死亡。试验毛竹林为材用林经营类型。

2.2 数据处理

相同年龄和受损程度类型立竹比例(%) = 样地中年龄和受损程度相同的立竹数量 × 100% / 样地中该年龄立竹数量。受损程度类型立竹比例(%) = 样地中受损程度相同的立竹数量 × 100% / 样地中立竹数量。比较毛竹林高温干旱灾害的影响因素时,除比较的影响因子不同外,其它条件基本一致。

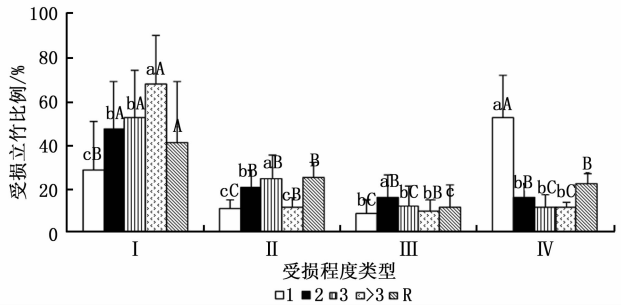
试验数据在Excel 2003统计软件中进行整理和图表制作,在SPSS 16.0统计软件中进行one-way ANOVA分析和0.05水平的LSD多重比较。试验数据均为平均值 ± 标准差。运用Canoco4.5软件,对高温干旱灾害天气所导致的立竹受损程度类型与立地条件、立竹年龄和经营管理水平作典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)^[18]。

3 结果与分析

3.1 持续高温干旱灾害毛竹林立竹受害特征

持续高温干旱灾害天气下,毛竹林立竹叶片和竹秆会出现不同程度的损伤症状。其中,毛竹叶片

灼伤、枯黄、失绿变白,严重的全株叶片脱落;1 度竹竹秆脱水、皱缩,中下部位竹秆出现黑斑,局部表皮灼伤死亡,平均死亡率 52.16%;2 度竹竹秆无皱缩,灼伤发黑程度较轻,死亡率显著低于 1 度竹;3 度及 3 度以上竹竹秆有枯黄症状,但没有出现灼伤和黑斑现象。从图 1 可以看出,随着立竹年龄的增大,立竹受损程度类型 I 类呈显著增加趋势;II、III 类呈先升后降趋势,3 度或 2 度竹显著高于其它年龄立竹;IV 类呈降低趋势,1 度竹显著高于 2 度及 2 度以上竹,而 2 度及 2 度以上竹间差异不显著。除 1 度竹的 IV 类显著高于其它类型,2 度及 2 度以上竹均是 I 类明显高于其它类型。受损程度类型立竹比例(R) I 类显著高于其它类型,II、IV 类显著高于 III 类。

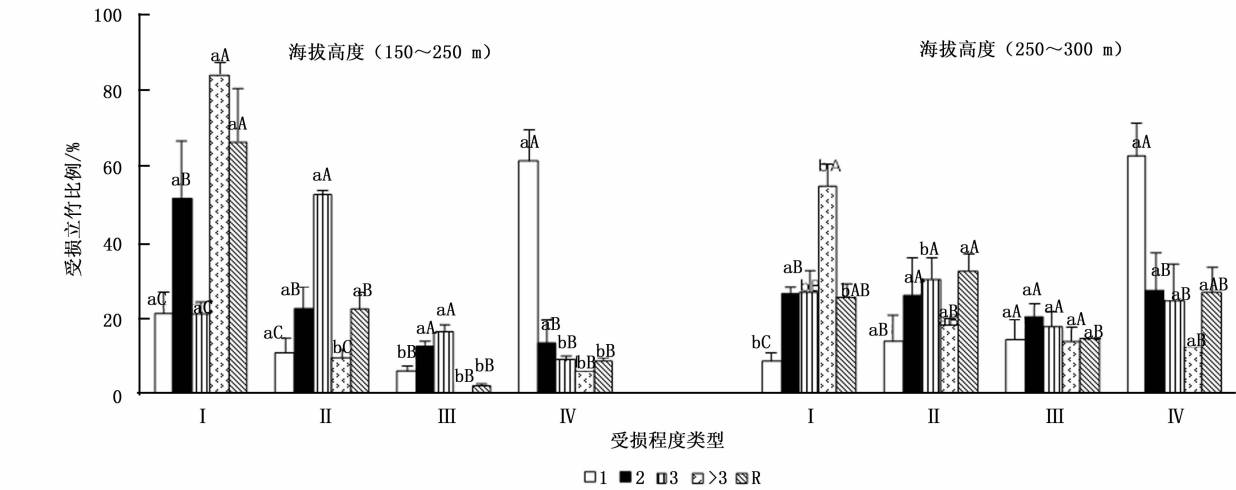


注:1、2、3、>3 为立竹年龄(度),R 为受损程度类型立竹比例(%),下同。小写字母为相同受损程度类型不同年龄立竹间比较,大写字母为不同受损程度类型相同年龄立竹间比较。同一个指标变量的不同字母代表差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 试验区受灾毛竹林立竹受损比例

3.2 地形对毛竹林受灾程度的影响

3.2.1 海拔高度 持续高温干旱对不同海拔高度



注:小写字母为相同年龄相同受损程度类型不同海拔高度间比较,大写字母为相同海拔梯度相同受损程度类型不同年龄立竹间比较。

图 2 不同海拔高度毛竹林持续高温干旱受灾受损立竹比例

毛竹林的损伤程度不同。由图 2 可以看出,海拔升高,立竹受损程度类型 I 类除 3 度竹无显著变化外,其它年龄立竹均显著降低;II 类 1 度、2 度竹无显著变化,3 度竹显著降低,而 3 度以上竹显著升高;III 类 1 度、3 度以上竹显著升高,2 度、3 度竹变化不明显;IV 类 1 度、2 度竹无显著变化,3 度及 3 度以上竹显著升高。同一海拔高度不同立竹年龄受损情况也存在差异。较低海拔时,随着立竹年龄的增大,立竹受损程度类型 I 类呈“N”型变化,1 度、3 度竹显著低于 2 度、3 度以上竹;II、III 类呈倒“V”型变化,3 度竹最高;IV 类呈降低趋势,2 度及 2 度以上竹差异不显著,均显著低于 1 度竹。较高海拔时,随着立竹年龄的增大,立竹受损程度类型 I 类呈显著升高趋势;II 类呈倒“V”型变化,3 度竹显著高于 1 度竹;III 类呈倒“V”型变化,但不同年龄立竹间无显著差异;IV 类呈降低趋势,1 度竹显著高于其它立竹年龄,是 3 度以上竹的 10.1 倍。受损程度类型立竹比例(R) I 类低海拔显著高于高海拔,II 类高海拔和低海拔间差异不显著,III、IV 类高海拔均显著高于低海拔。受损程度类型立竹比例(R)低海拔时 I 类显著高于 II、III 和 IV 类,后三者间差异不显著,高海拔时 II 类显著高于 III 类,I、IV 类间差异不显著。

3.2.2 坡位 由表 1 可以看出,持续高温干旱灾害天气下,随着坡位的下降,相同年龄毛竹林立竹受损程度类型 I 类显著升高,II 类变化不明显,III、IV 类降低,尤其是上坡位和下坡位间差异显著。同一坡位不同年龄立竹的受损情况存在差异。随着立竹年龄的增大,上坡位时,I 类、II 类升高;III 类无显著变

化;Ⅳ类降低,2度及2度以上竹差异不显著,均显著地低于1度竹。中坡位时,Ⅰ类显著升高;Ⅱ类呈倒“V”型变化,3度竹最高;Ⅲ类也呈倒“V”型变化,1度竹显著高于其它年龄立竹;Ⅳ类呈降低趋势,1度竹显著高于其它年龄立竹。下坡位时,Ⅰ类显著升高;Ⅱ类呈倒“V”型变化,3度竹显著高于其它年龄立竹,1度、2度竹居中,3度以上竹最小;Ⅲ类也

呈倒“V”型变化,2度竹最高;Ⅳ类显著降低。同一坡位,各受损程度类型间存在差异。上坡位时,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类间差异不显著;中坡位时,Ⅰ类>Ⅱ、Ⅳ类>Ⅲ类;下坡位时,Ⅰ类显著高于Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类,后三者间差异不显著。同一受损程度类型,不同坡位间存在差异,Ⅰ类为下坡>中坡>上坡,Ⅲ、Ⅳ类则相反;Ⅱ类不同坡位间差异不显著。

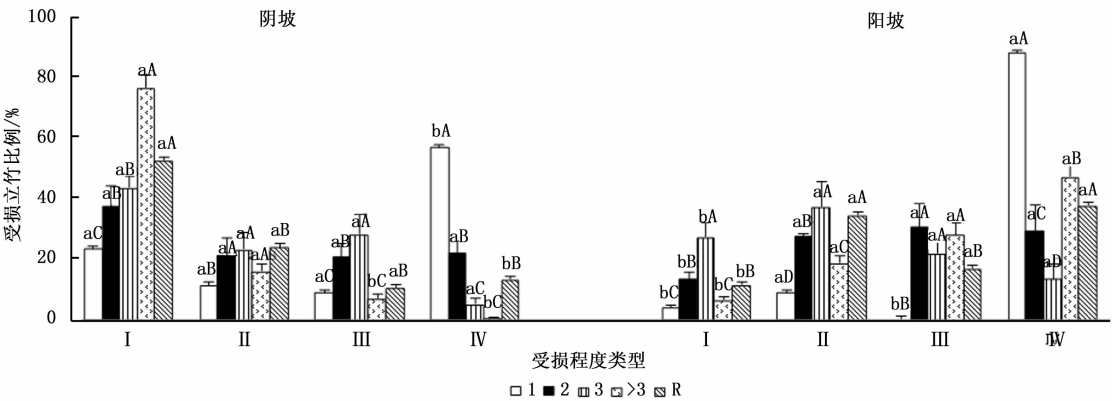
表1 不同坡位毛竹林持续高温干旱灾害受损立竹比例 %

坡位	立竹年龄/度	受损程度类型			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
上坡	1	6.9±4.9cC	12.2±4.1aB	13.7±5.9aA	67.3±10.7aA
	2	29.6±6.3cB	22.6±6.3aAB	20.3±4.6aA	27.5±9.7aB
	3	36.3±9.7bB	23.8±6.3aAB	16.5±4.8aA	23.5±1.8aB
	>3	50.2±4.3cA	27.0±8.4aA	22.8±4.1aA	0.0bB
	R	20.7±3.3bA	23.4±7.1aA	21.9±6.8aA	34.0±6.7aA
中坡	1	24.0±3.1bC	10.0±2.2aB	5.7±1.8bB	60.2±2.9abA
	2	46.3±6.8bB	26.7±7.0aA	13.4±1.9abA	13.7±6.8abB
	3	45.1±13.7aB	30.8±8.6aA	13.9±3.0aA	10.3±2.4bB
	>3	74.0±4.7bA	7.6±2.2bB	11.6±3.464bA	6.9±1.4aB
	R	38.3±9.4bA	22.6±10.9aAB	12.3±5.2bB	26.8±8.6aAB
下坡	1	37.8±3.3aC	14.3±2.6aB	0.0bB	47.9±5.2bA
	2	67.8±4.9aB	14.8±3.8aB	8.3±3.9bA	9.6±3.3bB
	3	74.2±5.5aB	23.9±5.9aA	1.2±0.1bB	0.8±0.3bC
	>3	97.1±5.1aA	2.9±0.4bC	0.0cB	0.0bC
	R	66.6±14.0aA	22.5±7.2aB	2.3±0.4cB	8.6±2.1bB

注:小写字母为相同年龄相同受损程度类型不同坡位间比较,大写字母为相同坡位相同受损程度类型不同年龄立竹间比较。

3.2.3 坡向 由图3可以看出,持续高温干旱灾害天气下,立竹受损程度类型Ⅰ类各年龄立竹均为阴坡显著高于阳坡;Ⅱ类阴坡、阳坡间差异不显著;Ⅲ类1度竹阴坡显著高于阳坡,3度以上竹则相反,其它年龄立竹差异不显著;Ⅳ类1度、3度以上竹阴坡显著低于阳坡,其它年龄立竹差异不显著。同一坡向不同立竹年龄受损情况不同。随着立竹年龄增大,阴坡Ⅰ类呈升高趋势;Ⅱ、Ⅲ类呈倒“V”型变化,3度竹最高;Ⅳ类显著降低。随立竹年龄增大,阳坡

Ⅰ类呈先升后降趋势;Ⅱ类呈倒“V”型变化,3度竹最高;Ⅲ类2度、3度及3度以上竹间差异不显著,均显著高于1度竹;Ⅳ类呈“V”型变化,1度竹最高。同一坡向不同立竹受损程度类型间,阴坡Ⅰ类显著高于Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类,后三者间差异不显著;阳坡Ⅱ、Ⅳ类差异不显著,显著高于Ⅰ、Ⅲ类。不同坡向相同立竹受损程度类型间,Ⅰ类阴坡显著高于阳坡,Ⅳ类则相反,Ⅱ、Ⅲ类阴坡、阳坡间差异不显著。



注:小写字母为相同年龄相同受损程度类型不同坡向间比较,大写字母为相同坡向相同受损程度类型不同年龄立竹间比较。

图3 不同坡向毛竹林持续高温干旱灾害立竹受损比例

3.3 土壤厚度对毛竹林受灾程度的影响

由表 2 可以看出,持续高温干旱灾害天气下,随着土壤厚度的增加,同一年龄立竹受损程度类型 I 类显著升高;Ⅱ、Ⅲ类呈降低趋势;Ⅳ类除 3 度以上竹呈先升高后降低外,其它年龄立竹均呈降低趋势。同一土壤厚度,不同年龄立竹间也存在差异。随着立竹年龄增大,土壤厚度 > 100 cm 毛竹林, I 类呈显著升高趋势;Ⅱ类呈倒“V”型变化,3 度竹最高;Ⅲ类呈 V”型变化,1 度竹显著高于 3 度竹;Ⅳ类呈降低趋势,1 度竹显著高于其它立竹年龄。土壤厚度 50 ~ 100 cm 毛竹林, I 类呈升高趋势,3 度以上竹显著高于其它年龄立竹;Ⅱ类呈倒“V”型变化,2 度、3 度竹显著高于 1 度、3 度以上竹;Ⅲ类也呈倒“V”型变化,3 度竹最高;Ⅳ类呈“V”型变化,1 度竹显著

高于其它年龄立竹。土壤厚度 < 50 cm 毛竹林, I 类呈升高趋势,1 度竹最低;Ⅱ类呈倒“V”型变化,3 度竹显著高于 1 度、3 度以上竹;Ⅲ类各年龄立竹间无显著差异;Ⅳ类呈降低趋势,2 度、3 度竹差异不显著,其它年龄立竹间差异显著。

相同土壤厚度毛竹林立竹受损程度类型间比较,土壤厚度 > 100 cm 毛竹林, I 类显著高于Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类,后三者间差异不显著;土壤厚度 50 ~ 100 cm、50 cm 以下毛竹林,立竹受损程度类型间差异均不显著。不同土壤厚度相同立竹受损程度类型间比较, I 类土壤厚度 > 100 cm 毛竹林显著高于其它两个土壤厚度毛竹林,Ⅱ类不同土壤厚度毛竹林间无显著差异,Ⅲ、Ⅳ类均为土壤厚度 50 ~ 100 cm、< 50 cm 毛竹林显著高于土壤厚度 > 100cm 毛竹林。

表 2 不同土壤厚度毛竹林持续高温干旱灾害立竹受损比例 %

土壤厚度/cm	立竹年龄/度	受损程度类型			
		I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
> 100	1	65.0 ± 2.3aC	8.2 ± 3.7bAB	11.7 ± 2.1aA	15.1 ± 1.1cA
	2	78.5 ± 10.5aB	8.1 ± 1.9bAB	7.7 ± 6.9bAB	5.7 ± 2.4bB
	3	78.5 ± 5.0aB	14.1 ± 6.2bA	2.0 ± 1.9bB	5.4 ± 2.8bB
	> 3	91.0 ± 2.0aA	3.1 ± 2.1cB	5.9 ± 1.7bAB	0.0bC
	R	78.6 ± 22.3aA	15.9 ± 18.4aB	0.3 ± 0.1bB	5.2 ± 2.0bB
50 ~ 100	1	41.7 ± 2.6bB	5.4 ± 1.8bB	10.1 ± 4.2aBC	42.9 ± 3.6bA
	2	48.3 ± 2.8bB	18.5 ± 1.9aA	15.2 ± 2.8abAB	18.0 ± 2.1aBC
	3	48.4 ± 4.3bB	18.3 ± 8.1abA	19.4 ± 4.9aA	13.8 ± 5.1aC
	> 3	60.1 ± 8.8bA	8.3 ± 2.6bB	5.7 ± 4.4baC	25.9 ± 8.4aB
	R	24.4 ± 5.4bA	29.4 ± 11.5aA	19.5 ± 5.2aA	26.7 ± 10.0aA
< 50	1	5.06 ± 1.1cC	13.6 ± 1.6aB	19.4 ± 8.3aA	62.0 ± 9.3aA
	2	32.2 ± 1.5cB	22.4 ± 6.3aAB	23.7 ± 1.4aA	20.9 ± 5.3aB
	3	26.2 ± 4.2cB	31.1 ± 6.4aA	16.1 ± 5.5aA	26.6 ± 7.6aB
	> 3	54.4 ± 6.0bA	19.4 ± 1.9aB	24.6 ± 5.6aA	1.6 ± 0.5bC
	R	23.9 ± 5.3bA	32.2 ± 9.3aA	14.4 ± 4.2aA	29.5 ± 6.7aA

注:小写字母为相同年龄相同受损程度类型不同土层厚度间比较,大写字母为相同土层厚度相同受损程度类型不同年龄立竹间比较。

3.4 立竹密度对毛竹林受灾程度的影响

从表 3 可以看出,持续高温干旱灾害天气下,随着立竹密度的增大,相同年龄立竹受损程度类型 I 类 1 度、2 度竹均为先升高后降低,3 度及 3 度以上竹中密度(3 000 ~ 3 750 株 · hm²)最大;Ⅱ类 1 度、2 度竹间差异不显著,3 度竹为先降低后升高,3 度以上竹中、高密度(3 750 ~ 4 500 株 · hm²)显著高于低密度(2 250 ~ 3 000 株 · hm²);Ⅲ类 1 度竹升高,高密度是低密度的 1.4 倍,2 度竹各密度间差异显著,高密度 > 低密度 > 中密度,3 度及以上竹低密度 > 高密度 > 中密度;Ⅳ类 1 度竹为高密度 > 低密度 > 中密度,高、低密度间差异不显著,2 度竹先显

著降低后显著升高,高密度时显著高于低密度时,3 度竹高密度时显著高于低、中密度,3 度以上竹各密度间差异不显著。相同立竹密度下,随着立竹年龄的增大,低密度时, I 类呈升高趋势,3 度以上竹为 1 度竹的 2.7 倍;Ⅱ、Ⅲ类均呈倒“V”型变化,3 度竹显著高于其它年龄立竹;Ⅳ类呈“V”型变化,1 度竹显著高于其它年龄立竹。中密度时, I 类呈倒“V”型变化,3 度竹显著高于其它年龄立竹;Ⅱ类基本呈倒“V”型变化,2 度竹最高;Ⅲ类呈降低趋势;Ⅳ类各年龄立竹间差异显著,1 度竹 > 3 度以上竹 > 3 度竹 > 2 度竹。高密度时, I 类显著升高,3 度以上竹为 1 度竹的 5.4 倍;Ⅱ、Ⅲ类均呈倒“V”型变化,2 度竹最

高;Ⅳ类降低,1度竹显著高于其它年龄立竹,是3度以上竹的2.9倍。

同一立竹密度不同受损程度类型间比较,低密度时,Ⅲ类显著低于Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ类,后三者间差异不显著;中密度时,Ⅰ类显著高于差异不显著的Ⅱ、Ⅲ

和Ⅳ类;高密度时,Ⅱ和Ⅳ类显著高于Ⅰ、Ⅲ类。相同立竹受损程度类型不同立竹密度间比较,3个密度间差异显著,其中Ⅰ、Ⅲ类为中密度>低密度>高密度,而Ⅱ、Ⅳ类为高密度>中密度>低密度。

表3

不同立竹密度毛竹林持续高温干旱灾害立竹受损比例

%

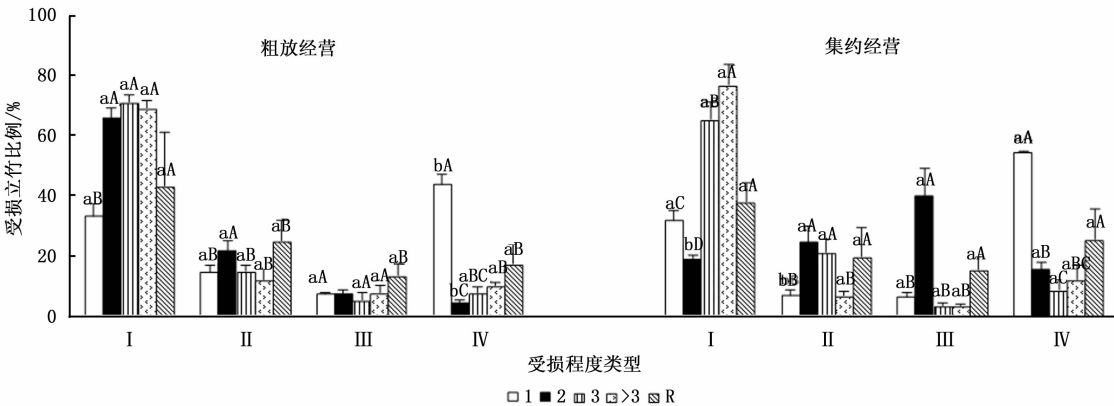
立竹密度/ (株·hm ²)	立竹年龄/度	受损程度类型			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
2 250 ~ 3 000	1	21.8 ± 1.8bC	6.9 ± 1.4aC	11.4 ± 1.6bB	59.9 ± 1.4aA
	2	44.06 ± 3.77bB	23.1 ± 3.2aB	15.2 ± 1.5bB	17.8 ± 1.9bB
	3	40.93 ± 4.0bB	27.8 ± 2.0aA	22.6 ± 4.2aA	8.7 ± 0.9bC
	>3	58.6 ± 5.0abA	7.3 ± 1.8bC	15.0 ± 4.9aB	19.1 ± 2.2aB
	R	28.7 ± 2.4bA	29.2 ± 4.2bA	13.5 ± 6.3abB	28.7 ± 2.1bA
3 000 ~ 3 750	1	31.5 ± 0.7aC	12.6 ± 3.1aB	11.3 ± 1.5bA	44.7 ± 4.8bA
	2	59.3 ± 3.0aB	20.2 ± 1.8aA	10.1 ± 1.0cA	10.4 ± 1.9cC
	3	78.1 ± 1.6aA	13.8 ± 1.5cB	3.9 ± 1.6bB	4.3 ± 1.9bD
	>3	62.3 ± 5.86aB	15.6 ± 3.9aAB	4.8 ± 1.6bB	17.2 ± 1.8aB
	R	40.7 ± 6.0aA	20.8 ± 3.0cB	18.4 ± 5.0aB	20.1 ± 4.5cB
3 750 ~ 4 500	1	9.5 ± 1.9cD	8.8 ± 4.1aB	16.2 ± 3.1aA	65.5 ± 6.3aA
	2	30.4 ± 5.2cC	21.1 ± 5.2aA	20.1 ± 2.7aA	28.5 ± 1.7aB
	3	42.7 ± 4.1bB	20.5 ± 5.0bA	9.8 ± 3.4bB	26.9 ± 7.4aB
	>3	51.4 ± 2.7bA	15.6 ± 4.7aAB	10.6 ± 1.2abB	22.4 ± 5.4aB
	R	10.7 ± 7.1cB	42.4 ± 2.3aA	7.0 ± 3.9bB	39.9 ± 12.9aA

注:小写字母为相同年龄相同受损程度类型不同立竹密度间比较,大写字母为相同立竹密度相同受损程度类型不同年龄立竹间比较。

3.5 经营水平对毛竹林受灾程度的影响

从图4可以看出,持续高温干旱灾害天气下,相同年龄立竹受损程度类型Ⅰ、Ⅲ类除2度竹集约经营、粗放经营毛竹林有显著差异外,其它年龄立竹无显著差异,Ⅱ类1度竹、Ⅳ类1度和2度竹集约经营毛竹林显著高于粗放经营毛竹林,其它年龄立竹差异均不显著;同一经营水平下,随着立竹年龄的

增大,粗放经营毛竹林,Ⅰ类1度竹、Ⅱ类2度竹显著低于其它年龄立竹,Ⅲ类各年龄立竹间差异不显著,Ⅳ类1度竹显著高于其它年龄立竹,2度竹显著低于3度以上竹;集约经营毛竹林,Ⅰ类呈显著升高趋势,Ⅱ类2度、3度竹显著高于1度、3度以上竹,Ⅲ类2度竹显著高于其它年龄立竹,Ⅳ类1度竹>2度竹>3度及3度以上竹。



注:小写字母为相同年龄相同受损程度类型不同经营水平间比较,大写字母为相同经营水平相同受损程度类型不同年龄立竹间比较。

图4 不同经营水平毛竹林持续高温干旱受损立竹比例

相同经营水平毛竹林不同立竹受损程度类型间比较,粗放经营毛竹林 I 类显著高于 II、III 和 IV 类,后三者间无显著差异,而集约经营毛竹林各立竹受损程度类型间差异不显著。不同经营水平毛竹林相同立竹受损程度类型间差异均不显著。

3.6 持续高温干旱灾害毛竹林受灾程度的主要影响因素

从图 5 分析可知,持续高温干旱灾害毛竹林土壤厚度、坡位与第 1 排序轴正相关,坡向与第 1 排序轴负相关,海拔高度、立竹年龄、立竹密度与第 2 排序轴正相关,毛竹林经营水平与第 1、第 2 排序轴均无显著相关关系(表 4),其中第 1 排序轴累积解释量为 34.3%,第 2 排序轴为 38.4%,两轴总体解释量为 72.7%,受损程度类型与影响因子 2 个排序轴相关系数为 0.833 和 0.743,排序轴与影响因子的线性结合程度较好地反映了受损程度类型与各影响因子间的关系,排序结果可靠。因此,根据与排序轴的

相关系数可知,高温干旱灾害毛竹林受灾程度除自身生物学特性外,平均土壤厚度和坡位为主要影响因子,其次为海拔高度、坡向和立竹密度。

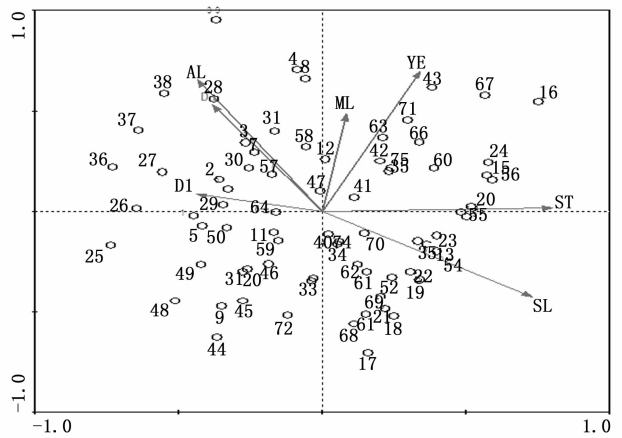


图 5 持续高温干旱灾害毛竹林受损程度主要影响因子典范对应分析

表 4 持续高温干旱毛竹林受灾程度影响因子与典范对应分析 2 个排序轴的相关系数

排序轴	海拔高度 (AL)	坡位 (SL)	坡向 (DI)	土壤厚度 (ST)	立竹年龄 (YE)	立竹密度 (DE)	经营水平 (ML)
第 1 排序轴	-0.434	0.731 **	-0.540 *	0.802 **	0.339	-0.381	0.086
第 2 排序轴	0.652 **	-0.429	0.083	0.016	0.697 **	0.528 *	0.484
排序轴	特征值	变量解释量%		累积解释量/%		受灾程度与因子相关性	
第 1 排序轴	0.051	85.8		34.3		0.833	
第 2 排序轴	0.042	96.1		38.4		0.734	

注: * $p < 0.01$, ** $p < 0.05$ 。

4 结论与讨论

4.1 持续高温干旱灾害毛竹林立竹受害特征

高温干旱是植物重要的非生物干扰因子,会使植物叶绿素破坏和叶绿体膜机构受损,降低植物的光合效率^[19-21],对植物生长发育和功能发挥的破坏力极大,而且高温干旱同时伴随着强光辐射胁迫,会抑制植物根系、枝梢生长,使叶片灼伤,叶面积变小,叶缘枯萎,甚至叶片凋落、植株死亡^[22]。本研究表明,2013 年夏季的持续高温干旱天气给试验区毛竹林生长带来了严重的不利影响,毛竹叶片灼伤、枯黄、失绿变白,严重的全株叶片脱落,竹秆脱水、皱缩、枯黄,表皮灼伤,出现黑斑等。毛竹林高温干旱灾害受损程度与立竹年龄密切相关,其中,1 度竹受损最为严重,平均死亡率达 52.16%,这与 1 度竹竹秆木质化程度低,含水率高,根系尚不发达,高温强光下蒸腾作用增加,植株失水皱缩甚至干枯等有关。

4.2 环境因子对毛竹林受灾程度的影响

持续高温干旱灾害天气下,海拔高度、坡向、坡位、土壤厚度、立竹密度、经营水平等对毛竹林受损程度也有较明显的影响,不同海拔高度毛竹林立竹受损程度类型 I~IV 类随其年龄增加的变化规律基本一致,但海拔相对较高的毛竹林受损程度较高,尤其是死亡和大部落叶立竹的比例显著升高,这与高温下的强光辐射胁迫有关。坡位受损程度为上坡 > 中坡 > 下坡,其中,对上坡位 1 度竹的影响最为严重,阳坡毛竹林高于阴坡毛竹林。随着平均土壤厚度的增大,毛竹林受损程度减轻。立竹密度高(3 750~4 500 株·hm²)时受损程度相对严重,立竹密度较低(2 250~3 000 株·hm²)时也较为严重,立竹密度适中(3 000~3 750 株·hm²)时受损程度轻。经营水平对毛竹林受灾程度的影响主要体现在 1 度、2 度竹死亡率,集约经营毛竹林显著高于粗放经营毛竹林。通过 CCA 分析表明,持续高温干旱天气对毛竹林受灾程度的影响,除毛竹生物学特性外,

其它影响因子主要是土壤厚度、坡位,其次是海拔高度、坡向和立竹密度。因此,提高土壤持水保水能力,降低竹林物理和生理性耗水,提高立竹抗逆性等是增强毛竹林抵御高温干旱灾害能力的主要途径。对于高温干旱灾害严重受损毛竹林,应及时清除枯死竹和严重受损立竹,保留中度、轻度受损立竹,季节性适当补充土壤养分,促进地下鞭系生长,加强留笋养竹,尽快恢复丰产林分结构。

参考文献:

[1] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. *Science*, 2004, 305 (5686): 994 – 997.

[2] 刘杰, 许小峰, 罗慧. 极端天气气候事件影响我国农业经济产出的实证研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(7): 1076 – 1082.

[3] 时明芝. 全球气候变化对中国森林影响的研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 68 – 72.

[4] 葛晓改, 周本智, 王刚, 等. 雪灾干扰下林窗对木荷幼苗更新的影响[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(4): 529 – 535.

[5] 许利群, 蓝晓光, 高智慧, 等. 高温干旱对浙江林业的影响和对策[J]. *浙江林业科技*, 2004, 24(4): 59 – 62.

[6] 薛建辉, 胡海波. 冰雪灾害对森林生态系统的影响与减灾对策[J]. *林业科学*, 2008, 44(4): 1 – 2.

[7] 苏文会, 范少辉, 张文元, 等. 冰冻雪灾对黄山区毛竹林的损害及影响因子[J]. *林业科学*, 2008, 44(11): 42 – 49.

[8] Galik C S, Jackson R B. Risks to forest carbon offset projects in a changing climate [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257 (11): 2209 – 2216.

[9] Jentsch A, Beierkuhnlein C. Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems [J]. *Comptes*

Rendus Geoscience, 2008, 340(9/10): 621 – 628.

[10] 王静, 温学发, 王辉民, 等. 冰雪灾害对中亚热带人工针叶林净初级生产力的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5030 – 5039.

[11] 陈双林. 海拔对毛竹林结构及生理生态学特征的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009: 5 – 7.

[12] 吴继林. 竹林高效经营 200 问 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2005: 25.

[13] 吕玉龙. 高温干旱对毛竹林的危害及抗旱经营措施建议[J]. *林业实用技术*, 2014, (8): 53 – 55.

[14] 李龙有, 张培新. 干旱和高温危害毛竹竹笋一幼竹生长初报[J]. *竹子研究汇刊*, 1987, 6(4): 55 – 58.

[15] 肖本权. 影响楠竹生产的气象灾害及其防御对策[J]. *湖北气象*, 2003, (1): 26 – 28.

[16] 柳丽娜, 董敦义, 李云, 等. 浙江安吉县毛竹林高温干旱灾害调研报告[J]. *世界竹藤通讯*, 2014, 12(1): 24 – 28.

[17] 张培新, 王健锋, 张宏亮. 浙江安吉毛竹林水分管理与提高抗旱能力的措施[J]. *世界竹藤通讯*, 2008, 6(1): 23 – 25.

[18] 李伟成, 王树东, 钟哲科, 等. 毛竹林冰雪灾害与环境、生物学特性和管理的关系[J]. *林业科学*, 2008, 44(11): 128 – 133.

[19] 刘艳, 黄乔乔, 门博英, 等. 高温干旱胁迫下香根草光合特性等生理指标的变化[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(5): 638 – 642.

[20] 叶波, 吴永波, 邵维, 等. 高温干旱复合胁迫及复水对构树幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2343 – 2349.

[21] 王静, 高温. 高光强胁迫对植物离体叶绿素光合色素的降解及沙丘芦苇纯化内含物对其减缓作用的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008: 1 – 10.

[22] Karhu K, Mattila T, Bergstrom I, *et al.* Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2): 309 – 313.