

云南松林飞火形成的火环境研究

王秋华^{1,2}, 徐盛基³, 李世友¹, 龚海斌¹, 万春¹, 文灿明¹, 张晓明¹

(1. 西南林业大学 土木工程学院 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224; 2. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026; 3. 国家林业局 西南航空护林总站, 云南 昆明 650021)

摘要: 分析了云南省安宁市 1971 年至 2000 年的气象资料和基础地形数据, 结合 2006 年“3·29”重大森林火灾典型案例, 并调查火烧迹地, 得到云南松 *Pinus yunnanensis* 林飞火发生的火环境特征。结果表明: ①干季的气象条件有利于飞火形成, 特别是 3 月份, 气温逐渐上升, 平均相对湿度、最小相对湿度都达到最小值, 分别为 53% 和 3%; 最大平均风速、平均风速、大风日数都达到一年中的最大值, 分别为 $29.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $16.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 16.3 d, 而降水量不足 20 mm, 蒸发量高达 263 mm; ②地形、地势有利于产生飞火, 全市相对高差为 200~1 000 m 的面积占了总面积的 60.7%, 山高坡陡; ③其他因素, 云南松林区冬、春季受到西风环流南支急流的控制, 又正是云南松及其林下灌丛、草本的休眠期, 燃烧性强, 可燃物丰富。图 5 表 2 参 26

关键词: 森林保护学; 气象条件; 地形; 火环境; 飞火; 云南松; 安宁市

中图分类号: S762.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)02-0263-06

Fire environment of spot fires in a *Pinus yunnanensis* forest

WANG Qiuhsua^{1,2}, XU Shengji³, LI Shiyou¹, QU Haibin¹, WAN Chun¹, WEN Canming¹, ZHANG Xiaoming¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, Faculty of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 3. Southwest Arial Forest Protection Station, State Forestry Administration of China, Kunming 650021, Yunnan, China)

Abstract: By collecting 30 years of meteorological information from 1971 to 2000, by surveying fire sites of spot fires, and by gathering local topographic data, environmental characteristics of spot fires for a *Pinus yunnanensis* forest were gained. Results showed that meteorological factors during the dry season, especially in March, were favorable for spot fires. During March, air temperature increased with relative humidity (53%) and the minimal relative humidity (3%) being lowest for the year; however, average wind speed ($29 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), maximal average wind speed ($16.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), and gale days (16.3 d) reached the annual maximum. In addition, average precipitation in March was less than 20 mm; whereas, evaporation was 263 mm for the second highest monthly rate of the year. Topography and terrain were also beneficial to forming spot fires with the relative elevation between 200 to 1 000 m in the Anning City area being very steep (60.7%). Also, climate increased chances of spot fires. The distribution of *Pinus yunnanensis* was confined to southern branch of western circumfluence during spring and winter, which was the dormant period for *Pinus yunnanensis* trees, shrubs, and herbs. Thus, combustibility was too weak to easily ignite, spread, and form spot fires. [Ch, 5 fig. 2 tab. 26 ref.]

Key words: forest protection; meteorological factor; topography; fire environment; spot fire; *Pinus yunnanensis*

收稿日期: 2012-05-31; 修回日期: 2012-10-09

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD32B05); 火灾科学国家重点实验室开放基金资助项目(HZ2010-KF11); 西南林业大学科研启动金资助项目(111101)

作者简介: 王秋华, 副教授, 博士, 从事森林防火等研究。E-mail: qhwang2010@163.com

nensis; Anning City

飞火是高能量火中最复杂、最危险的现象，是在燃烧过程中，由火焰热对流带出的未燃尽的木屑、炭块等散布在火区外形成新的火点现象^[1]。有人把飞火看成是除了传导、对流和辐射之外的第4种热量传递的方式^[2]。云南松 *Pinus yunnanensis* 林又称“飞松”或“青松”林，是中国西南地区的一个特有、广布森林类型，是云贵高原的主要针叶树种，是地带性植被的主要建群种，也是云南的主要森林类型。云南松林区是森林火灾最严重地区之一，受害面积约占云南全省的70%以上，四川全省的80%^[3]。火环境指气象条件、天气形势以及地形地势，这些因素与火源、可燃物互为环境条件^[4-5]，是影响或改变火的初起、蔓延及火行为的可燃物、地形和气象因素的综合体^[6]。现有研究主要集中于大兴安岭地下火、山地偃松林、呼中林区雷击火发生的火环境^[7-9]，境外火的火环境^[10]，以及云南松林飞火的初步研究^[11-12]。研究方法主要有炭屑法^[13]、气象资料及气象模型^[14]、BP 神经网络法等^[15]。飞火的出现给火头前方和火区外围增加了新的火源^[16]，使扑救森林火灾更困难、更危险。本研究通过2006年“3·29”重大森林火灾典型案例，分析云南省安宁市1971—2000年30 a的气象资料、基础地形数据，并调查火烧迹地，研究云南松林飞火形成的基础属性，为安全扑火提供指导。

1 研究地概况

安宁市隶属于昆明市， $24^{\circ}31' \sim 25^{\circ}06'N$, $102^{\circ}10' \sim 102^{\circ}37'E$ ，南北长66.5 km，东西宽46.4 km，总面积1 321 km²。境内山脉主要为南北走向，为乌蒙山系。属北亚热带湿润低纬度高原山地季风气候，受西南季风影响，冬无严寒，夏无酷暑，四季如春，干湿季分明^[17]。年平均气温为14.0~17.0 ℃， ≥ 10 ℃的年活动积温为4 566.4 ℃。年平均日照时数为2 054.0 h，年平均雾天数为54 d，有霜天数64 d；年平均降水量为900.7 mm，其中，下半年786.6 mm，约为全年的87.3%。防火期长达6~7个月。

现有植被多为次生或人工植被，主要森林植被类型有半湿润常绿阔叶林、暖温性针叶林、暖温性灌木林等3种，其中云南松林分布最广。现有森林面积5.1万 hm²，森林覆盖率为38.5%，主要树种有云南松，华山松 *Pinus armandii*，云南油杉 *Keteleeria evelynian*，地盘松 *Pinus yunnanensis* var. *pygmaea*，旱冬瓜 *Alnus nepalensis*，栓皮栎 *Quercus variabilis*，云南樟 *Cinnamomum glanduliferum*，元江栲 *Castanopsis orthacanth*；灌木主要有南烛 *Lyonia ovalifoli*，光叶石栎 *Lithocarpus maire*，大白花杜鹃 *Rhododendron decorum*，大树杨梅 *Myrica esculenta*等。

安宁市发生的大森林火灾较多，如1986年“3·28”重大森林火灾，1995年“4·17”重大森林火灾，造成的损失都特别大。尤其是2006年“3·29”重大森林火灾，北线火场由于产生飞火，从正北处隔离带突破形成新的火点，过火面积达到了1 695.4 hm²^[18]。

2 研究方法

2.1 历史资料法

通过查阅历史资料，包括森林防火部门的历史档案、中国森林火灾典型案例库的资料，特别是安宁市“3·29”重大森林火灾扑救全过程的录像、文字资料，访问扑救火灾中云南松林飞火的亲历者，记录飞火的相关性状。

2.2 火烧迹地调查

多次实地调查安宁市“3·29”重大森林火灾火烧迹地，详细掌握云南松林发生飞火的地形、地貌特征（坡度、坡向、坡位）以及可燃物、植被特征等，分析飞火形成的最有利地形特征。

2.3 气象资料收集、分析

通过昆明市气象局获得安宁市1971—2000年30 a的气象资料，用SPSS 16.0统计，Excel 2003作图，得到30 a的平均气温、平均相对湿度、平均风速、最大平均风速、平均大风日数、平均降水量和蒸发量等，并对气象资料进行整理、分析，结合“3·29”重大森林火灾飞火发生的气象资料，得到云南松林飞火发生的气象因素特征。

3 结果与讨论

3.1 气象条件

3.1.1 气温 气温与林火发生十分密切,直接影响空气相对湿度和可燃物含水率的变化。气温升高,相对湿度变小,可燃物自身的温度也提高,使达到燃点所需热量大大减少。30 a 资料(图1)表明:3月份开始气温逐渐回升,达到13.2℃,并且升温很明显,比2月升高了3.3℃,为干季的次高温月份(云南从当年11月至翌年4月为干季,降水量仅占全年的15%)。

3.1.2 相对湿度 相对湿度40%是临界值。低于40%,细小可燃物容易燃烧,火的强度基本保持不变,当小于20%时,常使细小可燃物猛烈燃烧,并产生飞火^[19]。超过40%时,火的蔓延速度将显著降低,直立的木质可燃物极不容易点燃,产生飞火的可能性很少,但大于55%时,飞火火源不能使周围的可燃物燃烧。1971–2000年30 a里3月份的平均相对湿度为1年中最低,为58%,最小相对湿度也是全年最低,为3%(图2)。表明林区植被异常干旱,极易发生森林火灾,火灾发生后燃烧迅猛,扑救困难。

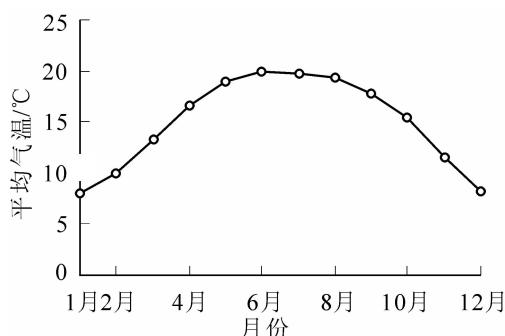


图1 安宁市30 a平均气温图

Figure 1 Average temperature from 1971 to 2000 in Anning

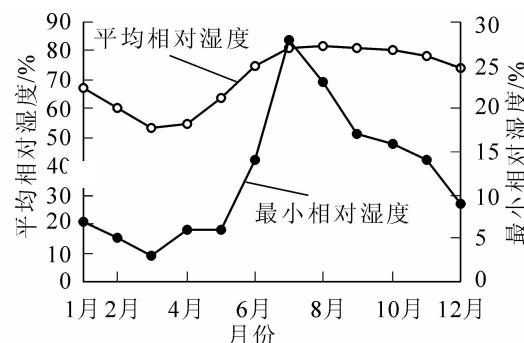


图2 安宁市30 a平均相对湿度和最小相对湿度

Figure 2 Average relative humidity and minimal relative humidity from 1971 to 2000 in Anning

3.1.3 风 风因子很大程度上决定了林火蔓延速度。由于安宁市地形复杂,大气候对林火蔓延的影响较小,小气候反而影响较大。当风速大于8.9 m·min⁻¹时,燃烧的滚草、可燃物碎屑等被卷起,形成飞火。飞火距离随风速和火焰高度的增大而增大,随树高的增大反而减小^[20]。飞火的出现与可燃物类型、火强度、近地层风的状况等密切相关,因为可燃物的形状决定了空气动力学特性,导致在空中漂移的距离不同^[21]。1971–2000年30 a里平均最大风速、平均风速3月份都为最大(图3),分别为29.0 m·min⁻¹和16.3 m·min⁻¹,分别相当于暴风和7级的疾风。3月份的平均大风日数也是全年最多的(图4),达到了22 d·a⁻¹,这都非常有利于飞火的蔓延、传播。安宁“3·29”重大森林火灾火场风非常大,最高瞬时风速达31.0 m·min⁻¹,且风向多变,特别是受火场小气候影响,风无定向导致火无定势,已控制的火场内频繁发生飞火,飞火最远距离达1 000 m,多次突破防火隔离带引发新火点,给扑救和围堵工作增加了很大难度。

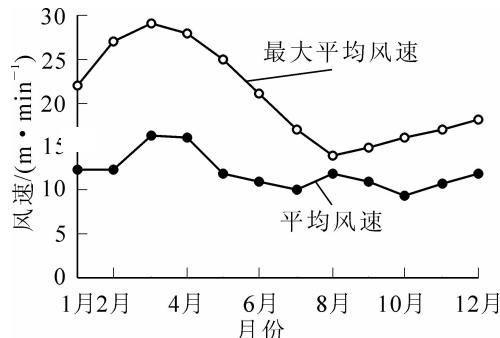


图3 安宁市30 a平均风速和最大平均风速

Figure 3 Average wind speed and maximal average wind speed from 1971 to 2000 in Anning

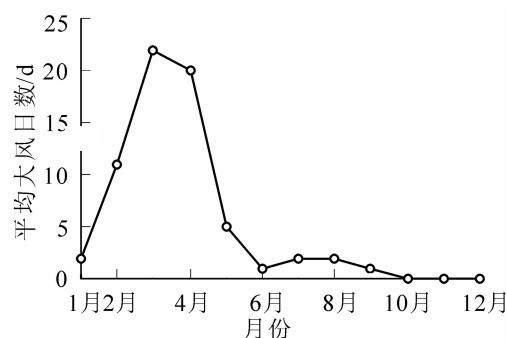


图4 安宁市30 a平均大风日数

Figure 4 Average large wind days from 1971 to 2000 in Anning

3.1.4 降水和蒸发 3月降水量少, 不足20.0 mm; 而蒸发量大, 为全年第2位, 达到了263.0 mm(图5), 仅比4月(全年最大蒸发量)少19.8 mm, 表明3~4月该地区比较干燥。同时, 由于安宁市次生林、灌木林等植被多, 加上飞播林和密集的灌木林集中分布, 因此安宁是云南森林火灾的高发区, 并且重大森林火灾时有发生。

3.1.5 干旱 飞火的发生与长期干旱天气密切相关。干旱首先使深层可燃物及重型可燃物变干, 大大增加有效可燃物量, 增加燃烧速度; 其次, 促使植被过早成熟, 树木和灌木顶部枯萎, 增加了有效可燃物量; 最后, 干旱使已腐朽可燃物的含水量降到最低程度, 增加飞火的着火概率, 使飞火更严重持久^[1]。云南1~3月干旱最严重, 平均每年有约2/3的土地受旱^[2]。越是干旱的月份, 森林火灾越多, 并且越严重。1980~1999年20 a间, 安宁市共出现8次干旱, 1995年的干旱, 从3月1日至4月30日长达61 d, 2个月降水仅为5.6 mm, 持续干旱高温干燥的天气, 直接诱发了4月17日的县街乡的重大森林火灾^[23]。

3.2 地形条件

安宁地形呈东南高、西北低, 有八街、连然、禄脿3个山间盆地, 其余为山区半山区。市内西南部黑风洞为全市最高点, 海拔2 618 m, 最低点在草铺镇王家滩村委会红河流域扒河出安宁的鲁家山河谷、海拔1 690 m。主要地貌类型有螳螂川侵蚀地貌, 八街中山丘陵侵蚀谷盆地貌, 构造地貌和中山浅切割“V”型谷盆地貌以及新生界地层。

相对高差在200~1 000 m的中低山面积占了总面积的60.7%, 主要特征是山高坡陡(表1)。这样的地表形势会影响太阳辐射、气温、风和降水等因子, 对天气、气候、植被以及森林火灾都有重要的影响。“3·29”重大森林火灾火场地形复杂、破碎, 海拔为1 880~2 500 m, 相对高差620 m, 平均坡度为25°, 主体火场的坡度多在60°以上^[18]。当坡度较大时, 上山火的蔓延形态呈跳跃式发展易, 产生飞火, 形成新的火场^[14]。强大的对流柱如果倾斜, 被卷扬起来的燃烧物, 在风力和重力的作用下, 作抛物线运动, 当火线强度超过300~500 kW·m⁻¹时, 也会产生飞火^[24~26]。

表1 安宁市地貌类型面积分布特征

Table 1 Characteristics of landforms proportion of Anning City

地貌特征	相对高度/m	面积/km ²	占总土地面积比例/%	主要特征
高山	>1 000	0	0	
中山	200~1 000	357.26	27.3	山高坡陡
低山	200~500	436.59	33.4	地势起伏变化次于中山
高丘	100~200	153.69	11.7	地形起伏变化一般
中丘	20~100	209.74	16.0	地形起伏变化不大
低丘	<50	151.54	11.6	地势平缓

3.3 可燃物

调查表明: 云南松林发生飞火的可燃物主要是球果, 特别是部分腐朽的球果。云南松球果近似圆柱形, 单个松果特征见表2。在“3·29”森林大火的蔓延区域, 植被覆盖指数大于60%, 可燃物载量超过10 kg·m⁻², 云南松林与地盘松和栎类灌木混交, 林木密度大, 集中连片, 火灾发生后, 燃烧强度大。在所测定的100个云南松球果中, 球果接近圆柱形, 其直径为3.0~8.0 cm, 平均为5.1 cm; 长度为3.5~9.0 cm, 平均为5.4 cm; 含水率为2.78%~13.28%, 平均为10.45%。

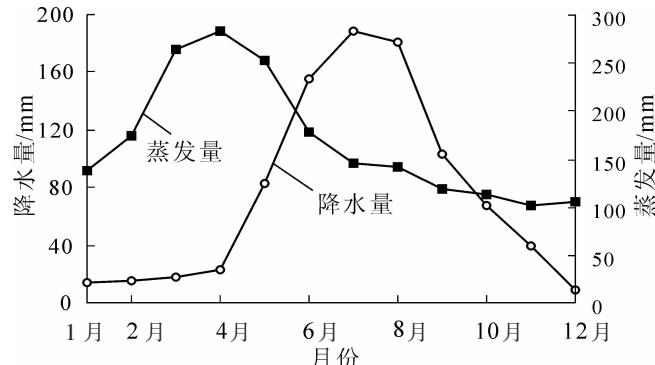


图5 安宁市30 a平均月降水量和蒸发量

Figure 5 Average precipitation and evaporation from 1971 to 2000 in Anning

表2 云南松单个球果特征

Table 2 Characteristics of one cone of *Pinus yunnanensis*

项目	直径/cm	长度/cm	湿质量/g	干质量/g	含水率/%
范围	3.0~8.0	3.5~9.0	4.8~60.2	4.6~54.1	2.78~13.28
平均值	5.1	5.4	21.7	19.6	10.45

4 结论与讨论

结合安宁2006年“3·29”重大森林火灾典型案例, 经过分析1971~2000年30 a气象资料以及基础地形数据并实地调查火烧迹地, 云南松林飞火形成的火环境很复杂, 影响因素很多。首先, 气象因素非常有利于形成飞火: 云南松林区的干季, 特别是3月份, 气温逐渐上升, 平均相对湿度、最小相对湿度分别达到最小值, 分别为53%和3%, 降水量为18.2 mm, 但蒸发量高达263.0 mm, 非常干燥; 最大平均风速、平均风速、大风日数都达到1年中最大, 分别为 $29.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $16.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 和16.3 d, 一旦发生森林火灾, 有利于火的蔓延, 很容易产生飞火。其次, 地形、地势有利于飞火的产生: 全市相对高差为200~1 000 m的面积占了总面积的60.7%, 特征是山高坡陡, 有利于飞火的产生、传播。其他因素: 云南松林区干、湿季分明, 特别是干季气候干暖, 少雨, 此时又正是云南松及其林下灌丛、草本的休眠期, 可燃物非常丰富, 特别是稍腐朽的球果, 燃烧性较强, 很可能发生飞火。

火环境是多因素的综合体, 如何运用数学的方法来进行综合表达并进行量化比较, 需要继续深入研究。可燃物是森林火灾的物质基础, 在研究火环境的同时, 也要更深入的研究可燃物的相关属性。本研究只研究了重大森林火灾多发区的云南松林飞火形成的火环境, 以后还应继续研究其他非典型地区云南松林发生过飞火的火环境, 从而更透彻地把握飞火的形成, 为森林火灾的预防与扑救提供科学的依据。

参考文献:

- [1] 林其钊, 舒立福. 林火概论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 166~168.
- [2] 姚树人, 文定元. 森林消防管理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 53~57.
- [3] 马志贵, 王金锡. 林火生态与计划烧除研究[M]. 成都: 四川民族出版社, 1993: 1~25.
- [4] COUNTRYMAN C M. The concept of fire environment [J]. *Fire Manage Today*, 2004, **64** (1): 49~52.
- [5] 胡海清. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 57~72.
- [6] MORITZ M A, ODION D C. Examining the strength and possible causes of the relationship between fire history and sudden oak death [J]. *Oecologia*, 2005, **144**: 106~114.
- [7] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 大兴安岭林区地下火形成火环境研究[J]. 自然灾害学报, 2003, **12** (4): 62~67.
SHU Lifu, WANG Mingyu, TIAN Xiaorui, et al. Fire environment mechanism of ground fire formation in Daxing' an Mountains [J]. *J Nat Disast*, 2003, **12** (4): 62~67.
- [8] 舒立福, 王明玉, 李忠琦, 等. 大兴安岭山地偃松林火环境研究[J]. 山地学报, 2004, **22** (1): 36~39.
SHU Lifu, WANG Mingyu, LI Zhongqi, et al. Dwarf siberian pine forest fire environment in Daxing'an Mountains [J]. *J Mount Sci*, 2004, **22** (1): 36~39.
- [9] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 我国大兴安岭呼中林区雷击火发生火环境研究[J]. 林业科学, 2003, **39** (6): 94~99.
SHU Lifu, WANG Mingyu, TIAN Xiaorui, et al. The fire environment mechanism of lightning fire formed for Daxing' an Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39** (6): 94~99.
- [10] 田晓瑞, 舒立福. 我国境外火的火环境分析[J]. 森林防火, 2005 (3): 24~26.
TIAN Xiaorui, SHU Lifu. Analysis of fire environment from abroad [J]. *For Fire Prev*, 2005 (3): 24~26.
- [11] 王秋华, 舒立福, 李世友. 云南松林燃烧过程中飞火的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, **7** (1): 48~53.
WANG Qiuhua, SHU Lifu, LI Shiyu. Study on spotting of *Pinus yunnanensis* forest during burning [J]. *J Safety Sci Technol*, 2011, **7** (1): 48~53.

- [12] 王秋华, 舒立福, 俞新水. 云南松林飞火形成机制的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39** (4): 2110–2112.
WANG Qiuhsua, SHU Lifu, YU Xinshui. Study on the formation mechanism of spotting of *Pinus yunnanensis* forest [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2011, **39** (4): 2110–2112.
- [13] 曹艳峰, 黄春长, 韩军青, 等. 黄土高原东西部全新世剖面炭屑记录的火环境变化 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23** (1): 92–96.
CAO Yanfeng, HUANG Chunchang, HAN Junqing, et al. Changes of fire environment recorded by charcoal hided in holocene profiles in the eastern and western Loess Plateau [J]. *Geogr Geo-Inf Sci*, 2007, **23** (1): 92–96.
- [14] 张思玉, 蔡金榜, 陈细目. 杉木幼林地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应模型[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (4): 439–444.
ZHANG Siyu, CAI Jinbang, CHEN Ximu. Response models on the moisture change of surface fuel to fireenvironment in *Cunninghamia lanceolata* young plantation [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (4): 439–444.
- [15] 曾孝平, 刘敬, 刘德, 等. 基于BP神经网络的森林火环境预测方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, **28** (1): 73–76.
ZENG Xiaoping, LIU Jing, LIU De, et al. The research of using BP neural network in prediction of woods fire insurance grade [J]. *J Chongqing Univ Nat Sci Ed*, 2005, **28** (1): 73–76.
- [16] 姚树人. 火场形势预测的研究[J]. 森林防火, 2007 (2): 37–38.
YAO Shuren. Research on prediction of fire during burning [J]. *For Fire Prev*, 2007 (2): 37–38.
- [17] 徐学杰. 安宁市生态公益林效益补偿机制研究[J]. 四川林勘设计, 2004 (2): 11–13.
XU Xuejie. Study on compensation mechanism of ecological commonweal forest [J]. *Sichuan For Explor Des*, 2004 (2): 11–13.
- [18] 段颖, 周汝良, 刘志军. 基于CBERS遥感数据的云南安宁“3·29”火灾面积评估[J]. 云南地理环境研究, 2009, **21** (1): 89–92.
DUAN Ying, ZHOU Ruliang, LIU Zhijun. Disaster area estimation for forest fire on 29 March Anning Yunnan using remotely sensed data from CBERS [J]. *Yunnan Geogr Environ Res*, 2009, **21** (1): 89–92.
- [19] ANTHENIEN A, TSE S D, FERNANDEZ-PELLO A C. On the trajectories of embers initially elevated or lofted by small scale ground fire plumes in high winds [J]. *Fire Safety J*, 2006, **41** (5): 349–363.
- [20] 林其钊. 林火飞过程度模拟计算[J]. 计算力学学报, 1999, **16** (3): 302–306.
LIN Qizhao. Simulative calculation about the spotting fire [J]. *Chin J Comput Mech*, 1999, **16** (3): 302–306.
- [21] 单延龙, 舒立福, 李华, 等. 森林可燃物与火行为[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007: 7–92.
- [22] 彭贵芬, 刘瑜, 张一平. 云南干旱的气候特征及变化趋势研究[J]. 灾害学, 2009, **24** (4): 40–44.
PENG Guifen, LIU Yu, ZHANG Yiping. Research on characteristics of drought and climatic trend in Yunnan Province [J]. *J Catastrophol*, 2009, **24** (4): 40–44.
- [23] 秦剑, 余凌翔. 云南气象灾害史料及评估咨询系统[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 15–163.
- [24] KUTIEL P, INBAR M. Fire impacts on soil nutrients and soil erosion in Mediterranean pine forest plantation [J]. *Catena*, 1993, **20** (1/2): 129–139.
- [25] WEIR J R. Probability of spot fires during prescribed burns [J]. *Fire Manage Today*, 2004, **64** (2): 24–26.
- [26] 戴兴安, 周汝良, 李小川, 等. 森林燃烧中的特殊火行为研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, **21** (1): 47–50.
DAI Xing'an, ZHOU Ruliang, LI Xiaochuan, et al. Special fire behaviors in forest burning [J]. *World For Res*, 2008, **21** (1): 47–50.