

植被净初级生产力对极端寒冷天气事件的响应 ——以 2008 年贵州省凝冻为例

李盼龙¹, 白晓永², 李阳兵^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 5500021;

2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为揭示区域植被净初级生产力(NPP)对极端寒冷天气事件的响应及恢复过程,以 2008 年初发生在中国南方的特大凝冻事件为例,基于 GIS 空间分析技术,以贵州高原为研究对象,利用 MODIS250 m 分辨率 NDVI 生成的 NPP 数据,探讨了不同岩性、地貌、植被类型的 NPP 对极端寒冷天气事件的时空响应特征。结果表明:1)本次凝冻事件导致贵州 NPP 共损失 0.77×10^6 t C, 主要分布黔中、黔南和黔西南等喀斯特集中连片区;2)喀斯特岩性区受损程度较非喀斯特岩性区明显严重,受损率分别为 28.62%、21.92%,恢复程度差,恢复率分别为 91.29%、95.76%;3)在不同喀斯特地貌区内,岩溶高原受损最严重,岩溶槽谷区受损最小,受损率分别为 33.00%、21.40%,岩溶断陷盆地恢复最好,岩溶槽谷恢复最差,恢复率分别为 106.65%、88.41%;4)各植被类型中灌丛损失最大,混交林最小,损失率分别为 28.49%和 21.79%,草丛恢复程度最好,灌丛最差,恢复率分别为 97.63%、91.33%。综上所述,不同植被在不同岩性、地貌条件下,对极端寒冷天气事件的时空响应特征明显不同,其恢复过程也存在巨大差异。

关键词: 植被净初级生产力;极端寒冷天气事件;响应;贵州省;2008 年凝冻

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2015)Z1-0098-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj2015Z1014

随着全球极端天气事件频发,极端天气事件对生态系统的影响逐渐引起学者们的关注,而植被净初级生产力是生态系统功能对气候变化响应的重要指标^[1~3]。极端天气事件对植被的影响不仅体现在植株外部的损害,还会对植物内在的生理活动产生破坏,抑制光合作用,从而降低植被净初级生产力^[4~7]。

2008 年 1 月中旬至 2 月中旬,我国南方遭受了大范围的持续低温雨雪冰冻天气,这场极端天气事件极为罕见,为 50~100 年一遇,植被生态系统损失严重^[8]。不少学者对不同植被的机械损伤面积以及危害程度进行了调查和估算^[9~13],并研究了受损植被的恢复技术和策略^[14~17]。也有学者通过对比灾前灾后的遥感影像,识别和确定了更广范围内植被受灾面积、形态及程度^[18~22]。但对于植被 NPP 在极端事件前、中、后的受损及恢复状态对比评估不

足,且在植被类型方面多侧重于森林植被的受损评估^[7,8,21~22],对不同植被类型受损及恢复的时空差异性的研究较少。

为揭示 NPP 对极端寒冷天气事件的响应过程及其恢复规律,讨论了贵州省 NPP 在不同岩性、地貌、植被类型背景下对极端凝冻灾害响应的时空差异性,对极端寒冷天气事件前后 NPP 状态进行对比研究,以期对极端天气事件对生态系统的影响评估及灾后生态环境恢复提供参考。

1 研究区域、数据和方法

1.1 研究区概况

贵州省地处云贵高原东北侧,总面积 12.7 万 km²,平均海拔 1 100 m,属亚热带湿润季风气候,气

收稿日期:2014-11-06;修回日期:2015-02-07

基金项目:国家 973 项目(2013CB956704),国家科技支撑计划(2014BAB03B02),贵阳市科技局项目(筑合同[2012205]号),贵州省科技计划(黔科合重大专项(2012)6015号),贵州省农业攻关项目(黔科合 NY[2014]3039号),“西部之光”之西部博士专项(科发人教字[2012]179号)。

作者简介:李盼龙(1990~),男,硕士研究生,主要从事自然地理学和景观生态学研究。E-mail:lipanlong306@126.com

* 通讯作者 E-mail:baixiaoyong@126.com

候复杂多变,气象灾害频繁,每年因自然灾害造成的损失占 GDP 的 6%~7%,其中气象灾害占 80%以上,特别是进入 21 世纪以来,旱涝、凝冻等极端天气气候事件频繁发生^[23]。凝冻是贵州省冬季的主要灾害性天气,其发生频次居中国首位^[24,25]。冬季,北方南下的冷空气受到高原的阻挡,在云贵高原形成滇黔准静止锋,由于锋后地区阴雨绵绵,当地地面温度低于 0℃时,降水落地前成为过冷却雨滴,从而形成贵州省常见的气象灾害——凝冻。

1.2 数据来源

气象数据来源于国家气象数据共享服务网提供的贵州省境内 19 个国家气象站 2007~2009 年实测逐日气温资料。NPP 数据来源于中国科学院遥感所提供的利用光能利用率模型(CASA 模型)计算的贵州省 2000~2010 年逐月生态环境十年变化数据,空间分辨率为 250 m×250 m。贵州省 1:100 万植被类型图由中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室提供。贵州省地貌分区图、岩性分区由课题组前期工作材料^[26,27]。

1.3 研究方法

1.3.1 气象、NPP、植被数据处理

利用澳大利亚 ANUSPLIN 3.2 气象插值软件的样条函数插值法(Splina),对贵州省 19 个国家气象基准站和基本站的经纬度、气温信息进行编程内插,获取气象要素栅格图,并在 ArcGIS10.2 软件中加载,转为栅格格式显示;利用 ArcGIS10.2 软件,将贵州省边界图与 NPP 图像进行叠加,通过掩膜方法获取研究区 2007~2009 年逐月 NPP 数据,每幅 NPP 图像中共有像元 2 817 224 个,单位为 g C/m²,所有像元值取平均值为贵州省逐月 NPP 值;在植被类型图原有分类的基础上合并为 6 类,即阔叶林、针叶林、混交林、灌丛、草丛和农业植被;将贵州省的岩性归类为喀斯特岩性和非喀斯特岩性两种类型,地貌类型分区则将贵州省地貌单元划分为岩溶槽谷、岩溶高原、峰丛洼地、岩溶峡谷、岩溶断陷盆地和非岩溶地貌等 6 种地貌^[28]。

1.3.2 植被 NPP 受损和恢复程度分级

为了更好的确定植被 NPP 的受损程度,将植被 NPP 变化率小于 0 的像元值统一取 0 值,并按照表 1 标准进行受损程度分级^[7,22]。

用 NPP 的变化率来表现凝冻的影响,其计算公式为:

$$V = (NPP_{2007} - NPP_{2008}) / NPP_{2007} \quad (1)$$

式中: V 表示植被 NPP 变化率(%); NPP_{2007} ,

NPP_{2008} 表示 2007 年和 2008 年各月植被 NPP。

对 NPP 的恢复评估,采用 2009 与 2007 的比例作为恢复评估的依据,并对其进行分级。NPP 的恢复率计算公式为:

$$V = NPP_{2009} / NPP_{2007} \quad (2)$$

式中: V 表示植被 NPP 恢复程度(%); NPP_{2007} , NPP_{2009} 表示 2007 年和 2009 年各月的植被 NPP 值。

表 1 植被 NPP 受损和恢复程度分级

Tab. 1 Damage and Recovery Classification of Vegetation NPP

受损等级	NPP 变化范围(%)	恢复等级	NPP 变化范围(%)
微度	$0 \leq X < 15$	完全	$\geq 100\%$
轻度	$15 \leq X < 30$	良好	$100 \leq X < 85$
中度	$30 \leq X < 45$	一般	$85 \leq X < 70$
强度	$45 \leq X < 60$	较差	$70 \leq X < 55$
极强	≥ 60	很差	≤ 55

2 结果与分析

2.1 极端凝冻事件的时空特征

正常年份 2007 年和 2009 年 1 月平均气温分别为 4.3℃、5.2℃(图 1),而发生极端凝冻事件的 2008 年 1 月,平均气温为 2.9℃,且在 1 月中旬气温开始明显降低,凝冻灾害开始。2007 年和 2009 年 2 月平均气温均为 12℃,而 2008 年 2 月为 3.9℃,且在中旬开始上升,全省凝冻灾害基本结束。2007~2009 年 3 月平均气温分别为 12.8℃、12.9℃和 12.4℃,彼此相差不大。说明 2008 年 1~3 月份,贵州省平均气温相比正常年份 2007 和 2009 年,其 1 和 2 月气温处于较低水平。

在空间上,2008 年 1 月份,省域的中部、北部大部分地区平均气温均处于 0℃以下,而 2007 和 2009 年同期平均气温在 0℃以下的区域主要集中在省域西北部和中东部的部分高海拔地区,2008 年 1 月平均气温小于 -5℃的区域远多于正常年份 2007 年和 2009 年同期范围;2008 年 2 月份,全省绝大部分区域平均气温均处于 5℃以下,0℃以下的区域主要集中在西部和北部山区,而 2007 和 2009 年同期全省平均气温几乎全部上升到 5℃以上。同样,2008 年 3 月全省平均气温相对于正常年份同期温度仍处于偏低水平,低温区主要分布在省域西部和中北部地区。可见,与 2007 和 2009 年相比,2008 年 1~3 月份,全省平均气温均处于较低水平,且低温区主要分布在“中、西部”,并随着气温的回暖,低温区自南往

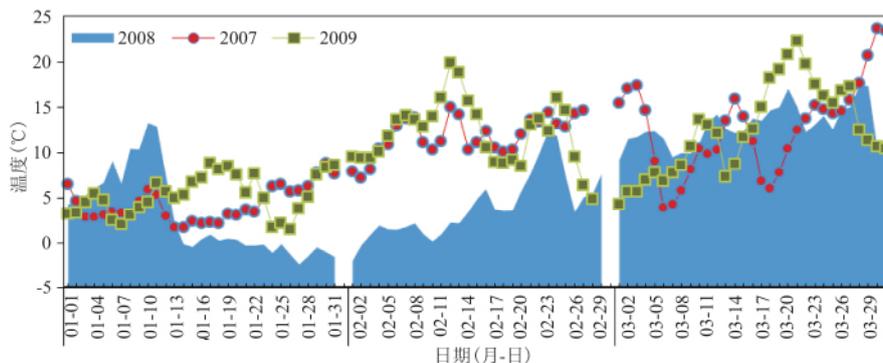


图 1 研究区 2007~2009 年 1~3 月日平均气温变化

Fig. 1 Average Temperature Change in the Study Area Between January and March

北,自东至西不断缩小。上述 2008 年凝冻事件的平均气温的时空变化特征体现出了贵州省凝冻灾害的分布具有区域性和地带性规律,且不同区域的凝冻风险不同^[29]。

由于我国西南地区植被的变化受气温变化的影响明显高于降水量对其影响^[30],因而此处选取贵州省 2007~2009 年 1~3 月份的平均气温与 NPP 进

行相关分析,结果显示相关系数为 0.89, $P < 0.01$, 呈现极显著正相关水平。将植被 NPP 与极端最低气温进行相关分析,结果显示相关系数为 0.76, $P < 0.05$, 呈现显著正相关水平。说明当温度降低,凝冻灾害不断加剧,植被 NPP 受损便相应加重,而当温度升高时,凝冻灾害逐渐减退,植被 NPP 便开始恢复。

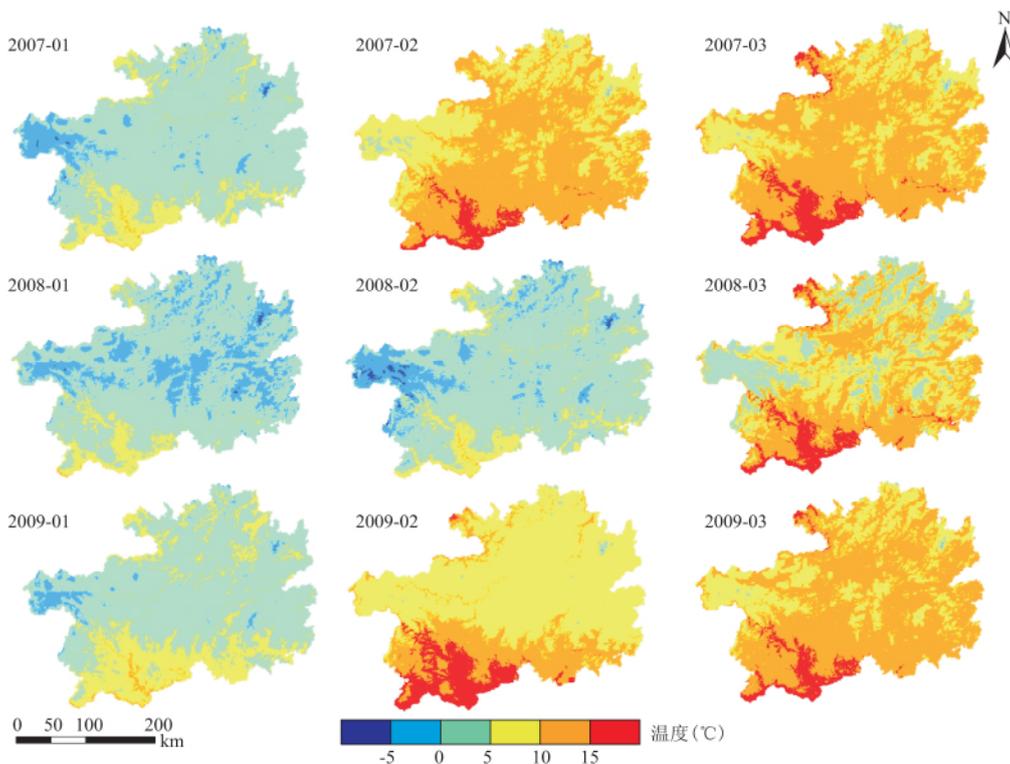


图 2 贵州省 2007~2009 年 1~3 月平均气温空间分布

Fig. 2 Spatial Distribution of Month Average Temperature During the Research Period

2.2 贵州省 NPP 受损和恢复情况

2.2.1 NPP 受损情况

对贵州省 2000~2010 年 1~3 月的 NPP 多年平均值进行计算,结果显示,1~3 月 NPP 分别为

9.34、12.00、17.84 $g C/m^2$ 。可见,NPP 在 1~3 月间呈现持续增长趋势。而在发生特大凝冻灾害事件的 2008 年 1 月 NPP 值为 9.55 $g C/m^2$,略高于多年平均值。2 月和 3 月 NPP 值分别为 9.41 和

14.95 g C/m²,均小于 2000~2010 年的多年平均值,为负距平(图 3b),NPP 呈现“先减后增”的趋势(图 3a)。

2007~2009 年 1~3 月份,贵州省 NPP 在 6.34~25.11 g C/m²之间波动,全省 NPP 总量在 1.66×10⁶~3.61×10⁶t C 之间波动。相比 2007 年 1~3 月,2008 年 1~3 月 NPP 总量分别减少了 0.18×

10⁶、1.15×10⁶、0.97×10⁶t C,NPP 分别减少了 9.48%、41.04%、26.97%,尤其是 2 月份的 NPP 低达 9.41 g C/m²,远小于 2007 年同期的 15.96 g C/m²(表 2)。2 月份的 NPP 总量由 2007 年的 2.81×10¹²t C 减少为 1.66×10⁶t C,损失量均高于 1 月和 3 月,受损率是 1 月份受损率的 4 倍之多,说明在 2008 年 1~3 月份,2 月份全省 NPP 受损最为严重。

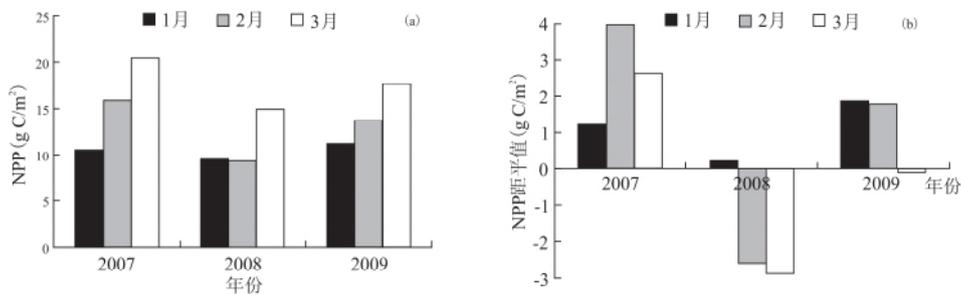


图 3 贵州省 2007~2009 年 1~3 月 NPP 值及距平值变化

Fig. 3 Average and Distance Changes of NPP in Guizhou Province

表 2 贵州省 NPP、总量及年际变率统计

Tab. 2 Total Statistics of NPP Value and Annual Variability of Guizhou Province

	2007 年			2008 年			2009 年		
	1 月	2 月	3 月	1 月	2 月	3 月	1 月	2 月	3 月
NPP(g C/m ²)	10.55	15.96	20.47	9.55	9.41	14.95	11.23	13.79	17.73
NPP 年际变率(%)				-9.48	-41.04	-26.97	17.59	46.55	18.6
							6.45	-13.6	-13.39
NPP 总量(×10 ⁶ t C)	1.86	2.81	3.61	1.68	1.66	2.63	1.98	2.43	3.12
NPP 总量年际变率(%)				-9.53	-41.08	-26.97	17.58	46.59	18.6
							6.39	-13.61	-13.38

2.2.2 NPP 恢复情况

在恢复方面,相比 2007 年 1~3 月,2009 年 1~3 月 NPP 分别增加了 6.45%、减少了 13.60%,减少了 13.39%,2009 年 1 月份的 NPP 总量为 1.98×10⁶t C,显然已超过 2007 年同期的 1.86×10⁶t C,说明经过 1 年的恢复,1 月份的 NPP 已超过 2007 年同期 NPP 水平。而由于 2008 年 2 月份的 NPP 受灾最为严重,3 月份也较为严重,经过一年的恢复,2009 年 2 月份和 3 月份相较于 2007 年同期的 NPP 水平仍相差 13.60%和 13.39%。

2.3 NPP 对极端寒冷事件的时空响应

2.3.1 NPP 受损的总体特征

2008 年 1 月份,NPP 受损程度以微度为主,超过全省面积的一半,强度、极强度受损区域较小,主要集中于贵州省北部及中西部小片区域(图 4),仅占全省面积的 8.45%(表 3)。2 月份,强度和极强度区域逐步向南扩张,主要集中在省域中南部和中

西部,占全省面积的 46.85%,接近全省面积的一半。3 月份,受损范围自西向东,自南向北逐步缩小,强度和极强度区域范围也随之缩小,主要集中于省域中南部,共占省域面积的 18.89%,受损植被开始恢复。可见,2 月份 NPP 受损面积最大,且 NPP 的受损程度显现出 1 月份的“以微度为主”转向 2 月份“以中度和强度为主”,继而 3 月份便呈现出“以微度、中度受损为主”的时空变化特征。

除此之外,2008 年 1~3 月份 NPP 对凝冻事件的时空响应特征与贵州省长期凝冻低温所呈现的“西部及中部早,东北部和南部迟,由西向东、由中部向南北推迟”,终日则表现为“东北部及南部早,西部和中部晚,由东向西、由南北向中部推迟”的时空变化特征相一致^[27~29]。

2.3.2 NPP 恢复的总体特征

如图 4 所示,经过一年的恢复,贵州省 2009 年 1 月份 NPP 超过了 2007 年同期水平,绝大部分区

域 NPP 恢复良好(图 4),完全恢复的面积达到 61.67%(表 3),恢复较差和很差的区域主要集中在中部地区。而在 2~3 月份,除去完全恢复的区域,以良好和较好恢复水平为主,占到省域面积的一半左右,恢复较差的区域占省域面积的 15%左右,恢复很差的区域仅占约 5%,恢复较差和很差的区域主要集中在贵州省中南部和东北部。可见,凝冻灾害发生 1 年后,植被尚未恢复的区域主要分布在省域的中部和东北部。

2.4 不同岩性 NPP 对极端寒冷事件的时空响应

植被的分布受岩性制约,贵州省喀斯特分布面积为 13 万 km²,占全省国土面积的 73.8%^[34]。为了更好地评估植被 NPP 对极端寒冷事件的时空响应特征,将贵州省分为喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区,分析不同岩性背景下 NPP 对极端凝冻天气事件的时空响应特征。

2.4.1 NPP 受损

在受损量方面,2008 年 1~3 月份,喀斯特岩性区的 NPP 总量分别降低了 0.11×10^6 、 0.74×10^6 和 0.67×10^6 t C,而非喀斯特岩性区 0.07×10^6 、 0.41×10^6 和 0.31×10^6 t C,喀斯特岩性区的受损总量超过非喀斯特岩性区,这是由于贵州省喀斯特面积远大于非喀斯特面积,NPP 基数大而导致。在凝冻灾害发生初始的 2008 年 1 月,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区对极端寒冷事件的响应特征基本一致,喀斯特岩性区损失率为 10.24%,非喀斯特岩性区为 8.66%,两者损失率相差较小,其不同灾害等级的面积比例也相近(表 4)。但随着凝冻灾害的等级加重和范围扩张,在植被 NPP 受损最为严重的 2 月份,喀斯特岩性区损失率为 44.59%,非喀斯特岩性区为 36.05%,前者损失率高于后者,其 NPP 强度受损的面积也多于后者,极强度的面积比例接近后者的 2 倍。之后的 3 月份,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区 NPP 损失率为 31.02%、21.04%,两者损失率差距进一步增大,喀斯特岩性区 NPP 以中度为主,而非喀斯特岩性区以微度为主。整体而言,喀斯特岩性区在 2008 年 1~3 月份的 NPP 受损率为 28.62%,而非喀斯特岩性区为 21.92%,喀斯特岩性区较非喀斯特岩性区损失更严重。

结果表明,在凝冻事件发生初始,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区植被 NPP 的受损差异较小,随着凝冻事件的推进,喀斯特岩性区的受损率超过非喀斯特岩性区。非喀斯特岩性区植被 NPP 相较喀斯特岩性区抵御极端寒冷事件的能力更强。同时,由

于巨大部分的非喀斯特地区分布于省域的东南、西南部(图 5),凝冻在此持续的时间较短,且该区域升温较快,非喀斯特岩性区的空间分布特征在一定程度上也导致其受损程度小于喀斯特岩性区。

2.4.2 NPP 恢复

2009 年 1 月份,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区 NPP 恢复率分别为 105.48%、107.49%,不同岩性区相差不大,甚至喀斯特岩性区恢复率略高于非喀斯特岩性区(表 5)。但在空间上,非喀斯特岩性区 65.95%的区域已完全恢复,高于喀斯特岩性区的 59.07%(图 6);2 月份,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区恢复率分别为 84.76%和 88.77%,非喀斯特岩性区的恢复率逐渐超过喀斯特岩性区,非喀斯特岩性区以良好恢复为主,而喀斯特岩性区以一般恢复为主;3 月份,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区恢复率差距进一步加大,分别为 83.62%和 91.01%,非喀斯特岩性区的恢复速度明显加快,恢复完全和良好的比例升高,而喀斯特岩性区相对滞后,恢复较差和很差的区域竟高于 2 月份的比例。整体而言,2009 年 1~3 月份喀斯特区和非喀斯特区的恢复率分别为 91.29%、95.76%。

结果表明,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区受损植被的 NPP 恢复情况随着时间的变化呈现不同特征,1 月份,两者恢复水平无明显差异,但在 2~3 月份,非喀斯特岩性区 NPP 的恢复速度快于喀斯特岩性区。同时,非喀斯特岩性区的完全恢复和良好恢复面积持续大于喀斯特岩性区,这与其强度受损和极强度受损的面积持续小于喀斯特岩性区的特征也相吻合。

2.5 不同地貌单元 NPP 对极端寒冷事件的时空响应

地貌是海拔、坡度、坡向等因素的综合体,不同地貌单元可能会导致 NPP 对极端寒冷事件的时空响应特征存在差异。由上文对岩性和 NPP 的分析得出,同是喀斯特岩性区,其 NPP 对极端寒冷天气事件的响应也存在较大的区域差异性。为了揭示喀斯特岩性区内不同地貌对极端寒冷事件响应的差异性,基于贵州省地貌分区,对 NPP 时空变化特征进行了以下分析。

2.5.1 NPP 受损

在受损方面,相较于 2007 年同期 NPP 水平,2008 年 1 月份各地貌类型 NPP 受损程度均以微度为主(表 6),损失率从大到小依次为:岩溶高原>非岩溶地貌>峰丛洼地>岩溶槽谷>岩溶峡谷>岩溶断陷盆地,其中,岩溶断陷盆地的损失率最小,岩溶高原的损失率最大,但整体相差不大;2 月,各地貌类型 NPP 受损程度呈现轻度、中度、强度 3 个等级,

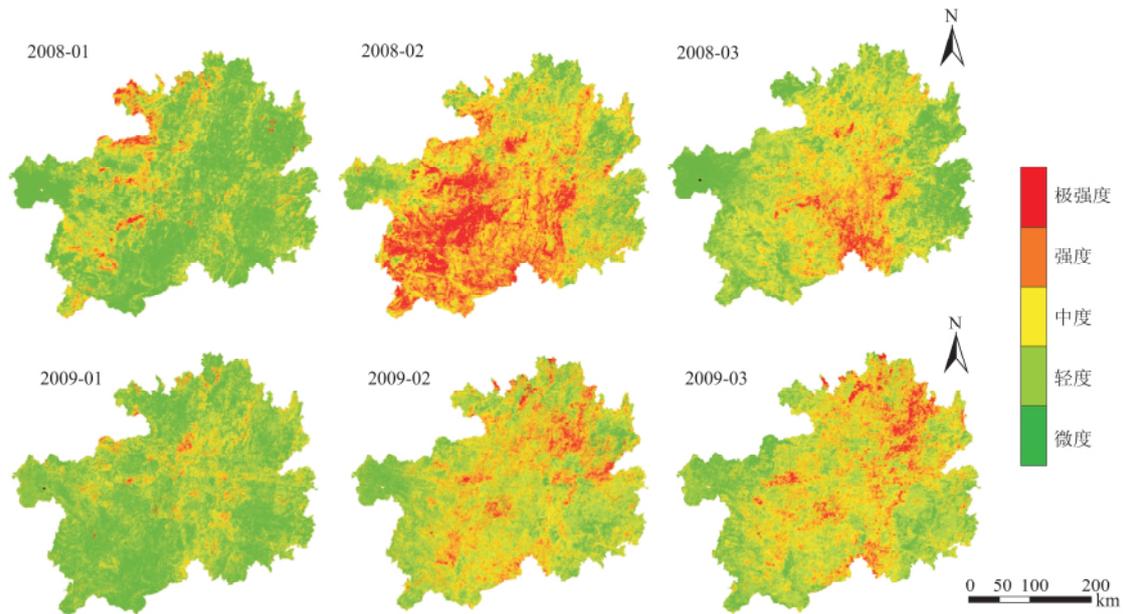


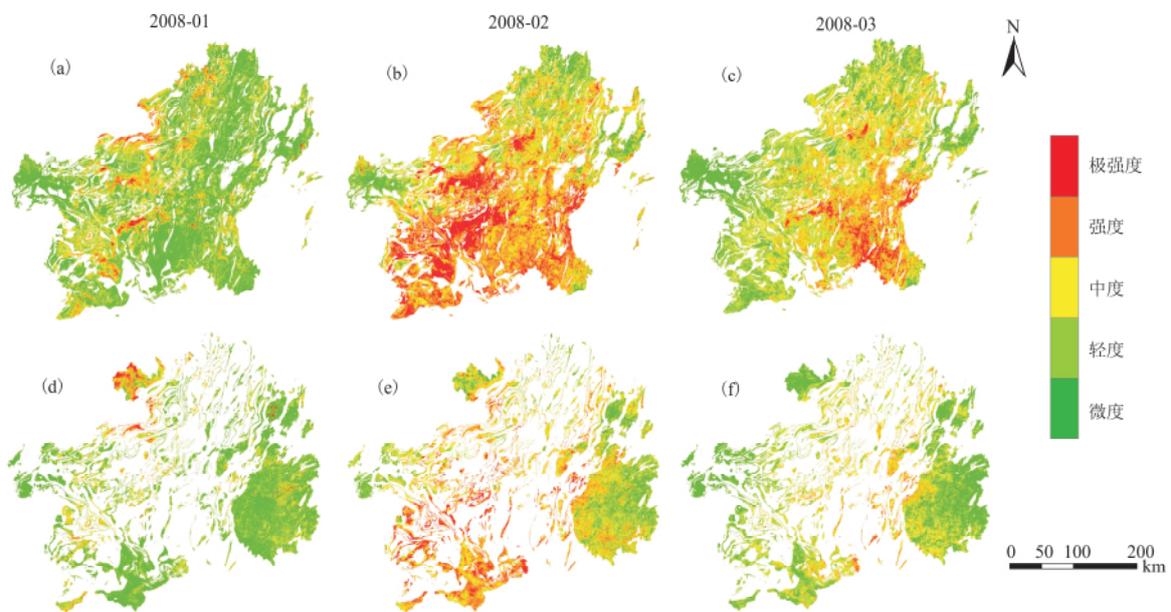
图 4 贵州省 NPP 不同受损和恢复程度空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution for Damage and Recovery Degree in Guizhou Province

表 3 贵州省 NPP 不同受损和恢复等级面积比例(%)

Tab. 3 Proportion of Area of NPP for Different Damage and Recovery Level in Guizhou Province

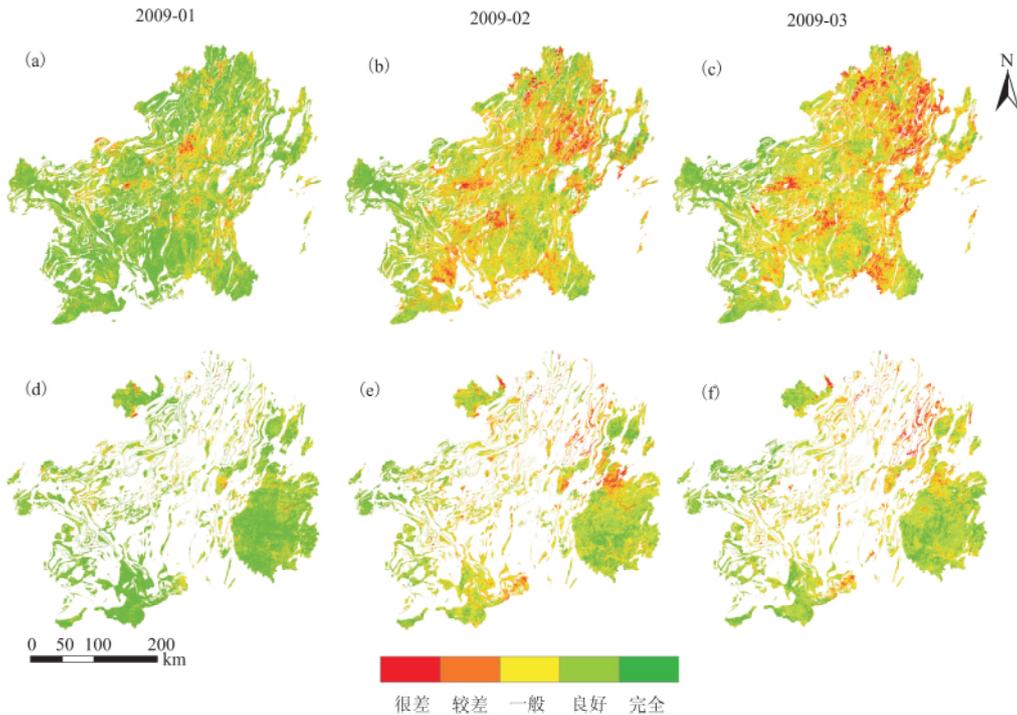
受损等级	面积比例(%)			恢复等级	面积比例(%)		
	2008-01	2008-02	2008-03		2009-01	2009-02	2009-03
微度	59.29	14.56	31.81	完全	61.67	27.44	31.80
轻度	19.16	14.03	23.50	良好	20.83	27.29	23.77
中度	13.10	24.56	25.79	一般	11.88	25.21	24.75
强度	6.57	32.10	15.21	较差	4.59	15.23	14.96
极强度	1.88	14.75	3.68	很差	1.04	4.82	4.73



注:a,b,c为喀斯特岩性区;d,e,f为非喀斯特岩性区。

图 5 不同岩性区植被 NPP 各受损程度空间分布

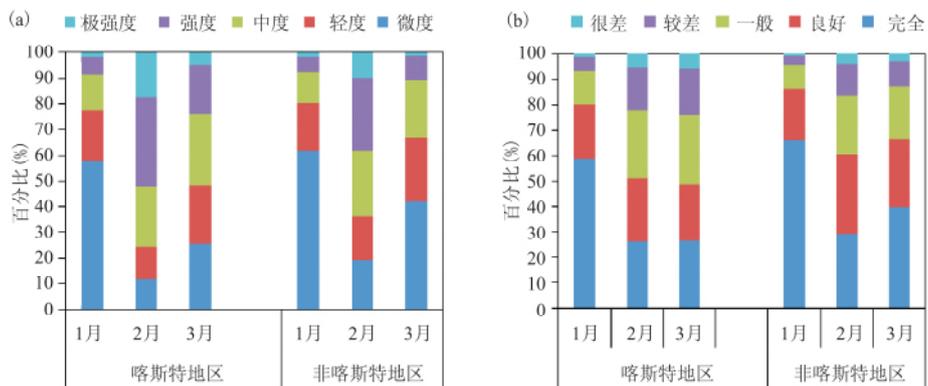
Fig. 5 Area Spatial Distribution of each Damage for Vegetation NPP in Different Lithology



注：a、b、c 为喀斯特岩性区；d、e、f 为非喀斯特岩性区。

图 6 不同岩性区各恢复程度空间分布

Fig. 6 Spatial Distribution for Recovery Degree of Different Lithology Areas



a: 受损比例图; b: 恢复比例图

图 7 不同岩性区植被 NPP 受损和恢复程度面积比例

Fig. 7 Proportion of NPP Damage and Recovery Degree in Different Lithology Zone

受损程度差异性明显,除非岩溶地貌呈现轻度受损,岩溶槽谷呈现中度受损之外,其他地貌类型均为强度受损,受损率从大到小依次为:岩溶断陷盆地>岩溶高原>峰丛洼地>岩溶峡谷>岩溶槽谷>非岩溶地貌,非岩溶地貌的损失率最小,岩溶断陷盆地的损失率最大,高达 52.53%,即受损超过 1/2;3 月,各地貌类型 NPP 损失程度已由 2 月份的“以强度为主”的特征转为“均为中度以下”的特征,损失率从大到小依次为:岩溶高原>峰丛洼地>岩溶槽谷>岩溶断陷盆地>非岩溶地貌>岩溶峡谷,岩溶峡谷的

损失率最小,岩溶高原的损失率最大。

整体而言,2008 年 1~3 月份,岩溶高原 NPP 的损失率最高,非岩溶地貌损失率最低。在喀斯特岩性地貌内部,对极端寒冷事件抵御能力大小排序:岩溶槽谷>岩溶峡谷>岩溶断陷盆地>峰丛洼地>岩溶高原。由此可见,岩溶高原对极端寒冷事件的响应最为敏感和脆弱。

2.5.2 NPP 恢复

在恢复方面,相较于 2007 年同期 NPP 水平,2009 年 1 月份各地貌类型区均处于完全恢复水平

表 6 不同地貌类型受损情况
Tab. 6 Damage and Recovery in Different Physiognomy Types

		非喀斯特地貌	岩溶高原	岩溶峡谷	岩溶槽谷	峰丛洼地	岩溶断陷盆地
受损率(%) 及受损程度	2008-01	10.12	13.76	5.51	7.33	7.67	4.58
		微度	微度	微度	微度	微度	微度
	2008-02	25.47	49.78	45.63	31.66	49.68	52.53
		轻度	强度	强度	中度	强度	强度
	2008-03	14.89	35.46	13.7	25.22	33.57	19.69
		微度	中度	微度	轻度	中度	轻度
平均值	16.83	33	21.61	21.4	30.31	25.6	
	轻度	中度	轻度	轻度	中度	轻度	
恢复率(%) 及恢复程度	2009-01	103.68	103.05	116.54	104.34	112.31	121.34
		完全	完全	完全	完全	完全	完全
	2009-02	91.61	82.94	93.81	83.11	86.58	97.53
		良好	一般	良好	一般	良好	良好
	2009-03	94.66	84.95	96.17	77.79	89.57	101.07
		良好	一般	良好	一般	良好	完全
平均值	96.65	90.31	102.17	88.41	96.15	106.65	
	良好	良好	完全	良好	良好	完全	

(表 6),NPP 恢复率从大到小依次为:岩溶断陷盆地>岩溶峡谷>峰丛洼地>岩溶槽谷>非岩溶地貌>岩溶高原,其中,岩溶高原的恢复率最小,岩溶断陷盆地的恢复率最大,表明岩溶断陷盆地的恢复速度快。2009 年 2 月份,NPP 恢复率从大到小依次为:岩溶断陷盆地>岩溶峡谷>非岩溶地貌>峰丛洼地>岩溶槽谷>岩溶高原,岩溶高原的恢复率最小,岩溶断陷盆地的恢复率最大,恢复率高达 121.34%。2009 年 3 月份,NPP 恢复率从大到小依次为:岩溶断陷盆地>岩溶峡谷>非岩溶地貌>峰丛洼地>岩溶高原>岩溶槽谷,岩溶槽谷的恢复率最小,岩溶断陷盆地的恢复率最大。

整体而言,不同喀斯特地貌区受损植被恢复能力强弱排序:岩溶断陷盆地>岩溶峡谷>峰丛洼地>岩溶高原>岩溶槽谷。岩溶断陷盆地 NPP 的恢复率最高,岩溶槽谷 NPP 的恢复率最低。由此可见,同是喀斯特岩性地貌,岩溶断陷盆地区植被 NPP 相较于其他喀斯特地貌区恢复速度更快,可能是由于岩溶断陷盆地地貌区处于贵州省西南部,正常年份的 1~3 月份温度回升快于其他地区,水热条件较好所致。

2.6 不同植被类型 NPP 对极端寒冷事件的时空啦

2.6.1 NPP 受损

在受损方面,2008 年 1 月相对于 2007 年同期,六种植被类型受损程度均为微度(表 7),其中阔叶林损失比例最高,混交林损失率最低;2 月,各植被类型均呈中度受损,其中,灌丛损失率最高,混交林损失率最低;3 月,灌丛损失率最高,除去灌丛尚处

于中度受损,其他植被类型的损失率均由中度降至轻度。整体而言,损失大小依次为:灌丛>农业植被>阔叶林>草丛>针叶林>混交林。以此表明,在这场特大凝冻灾害事件中,贵州省各植被类型中灌丛损失最为严重,混交林损失最小。这可能是由于混交林群落结构复杂,生物多样性低,抵御自然灾害的能力较强所致。而灌丛面积比重最大,占到省域面积的 34.75%,分布最广,且主要分布在贵州省中部,而贵州省中部喀斯特高原区又是受灾最为敏感和脆弱的地貌区,这些因子的叠加致使灌丛在凝冻灾害中受损最为严重。

2.6.2 NPP 恢复

在恢复方面,2009 年 1 月相对 2007 年同期,各植被类型 NPP 均呈现完全恢复水平(表 7);2 月份,除灌丛和农业植被恢复水平一般,其他类型植被均呈现良好恢复水平,其中以草丛恢复水平最高,达到 91.44%;3 月份,唯独灌丛处于一般恢复水平,其他植被类型均处于良好恢复状态。整体而言,2009 年 1~3 月,各植被类型 NPP 恢复程度从高到低依次为:草丛>阔叶林>针叶林>混交林>农业植被>灌丛。其中,草丛恢复最好,灌丛恢复最差。

3 讨论

关于 NPP 对极端气候事件响应的时段选择,学者们多选取灾害事件当年内发生前和结束后的日期代表灾前灾后的 NPP 水平^[31,32],而本文基于 NPP 受损和恢复两方面的考虑,因此选择了 2007 年

表 7 不同植被类型受损和恢复情况

Tab. 7 Damage and Recovery of Different Vegetation Types

		针叶林	阔叶林	混交林	灌丛	草丛	农业植被
受损率(%) 及受损程度	2008-01	6.40 微度	12.55 微度	5.18 微度	10.59 微度	6.75 微度	12.01 微度
	2008-02	35.80 中度	34.96 中度	35.14 中度	44.20 中度	39.84 中度	42.76 中度
	2008-03	24.36 轻度	24.06 轻度	25.04 轻度	30.69 中度	22.50 轻度	27.37 轻度
	平均值	22.19 轻度	23.86 轻度	21.79 轻度	28.49 轻度	23.03 轻度	27.38 轻度
恢复率(%) 及恢复程度	2009-01	104.76 完全	106.79 完全	103.68 完全	106.10 完全	109.75 完全	105.59 完全
	2009-02	87.64 良好	89.58 良好	87.36 良好	83.95 一般	91.44 良好	84.67 一般
	2009-03	88.04 良好	91.06 良好	85.42 良好	83.94 一般	91.69 良好	85.03 良好
	平均值	93.48 良好	95.81 良好	92.15 良好	91.33 良好	97.63 良好	91.76 良好

1~3 月为特大凝冻灾害发生前正常年份 NPP 的水平,同时选择 2009 年 1~3 月为特大凝冻灾害发生后正常年份 NPP 的水平。研究区在 2007 年和 2009 的 1~3 月未发生重大气象灾害,可代表正常年份贵州省 NPP 的水平,而 2010 年 1~3 月份我国西南地区发生特大旱灾^[37],2011 年贵州省再次发生了严重凝冻事件^[38],为了去除这些因素的干扰,所以将 2009 年定为 2008 年特大寒冷天气事件的恢复年节点,对 NPP 的恢复程度和水平进行分析。而在月份的选用上,基于植被生理特征及外部特征受损对凝冻灾害的响应存在滞后性的事实^[39,40],因此将 2008 年的 3 月也选取为植被受灾破坏期。

对凝冻灾害的受损评估方法,学者多采用图像阈值法,通过对比 2008 年和同期 2000~2011 年的标准差,来确定西南地区植被受损指数^[25],但由于 2000~2011 年贵州省冬季发生了多次凝冻、干旱等气象灾害事件^[37,41~42],植被受损年份较多,会在一定程度上影响对凝冻灾害的受损评估。本文侧重对凝冻灾害前 2007 年 1~3 月和灾害后 2009 年 1~3 月的受损和恢复的状态评估,因此参考学者们对凝冻受损和恢复等级的划分方法,采用不同年份同月份的年际变率来确定凝冻受损和恢复等级^[11,26]。

在选择 NPP 的时空变化影响因素时,学者们多将其与海拔、坡度、坡向^[8,20,21]进行分析。本文在此基础上,采用综合性的“地貌单元”作为 NPP 时空特征变化的影响指标,同时分岩性和植被区对其变化规律进行讨论。将不同岩性、地貌和植被区 NPP 对极端寒冷事件所体现的时空响应特征进行综合性分

析可以得出:(1)岩溶高原区的植被类型以灌丛为主,而灌丛是对极端寒冷事件响应最敏感、最脆弱的植被类型,同时,由于岩溶高原地处贵州省中部,山脉多呈南北走向,地势相对平坦,凝冻易长驱直入,且人工栽培植被较多,极易造成重大损失,这些脆弱性因子的叠加使得岩溶高原 NPP 应对极端寒冷事件的能力很差,生态环境极其脆弱;(2)岩溶断陷盆地区的恢复速度最快,这是由于喀斯特岩溶断陷盆地区的植被类型以草丛为主,而草丛的恢复速度最快,且该区域相对靠南,凝冻持续相对较短程度较轻,温度回升快,因此,其植被受损后自然恢复速度快于其他地区。

综上所述,贵州省 NPP 对极端寒冷事件的时空响应特征受控于岩性、地貌、植被类型以及凝冻天气事件的分布。而当前贵州省的石漠化治理和生态恢复中,多基于岩性和地貌建立不同的治理模式进行恢复研究和示范^[43]。因此,在植被受灾后的人工恢复过程中,更要注重考虑植被所处的不同地貌和岩性背景这些因素,依据不同地貌区、岩性区、植被类型区对极端天气事件不同的响应特征,有针对性地实施补救措施。在植被生态恢复方面,建议对灌丛进行结构调整,并增加其生态安全性,提高其生态服务功能和抵御极端天气事件的能力。受灾林地的恢复要提倡营造混交林,将人工恢复与自然恢复结合起来,提高林分质量,优化植被结构,以提升植被对极端天气事件的抵御能力和恢复能力。

本文对 NPP 与温度的空间相关性分析等方面还存在不足,对 NPP 恢复等级的划分不够精确,今

后需从灾害景观的角度更进一步分析极端灾害事件的时空变化特征,并将极端天气事件与石漠化的演替和生态恢复相结合进行分析。

4 结论

由于受植被、岩性、地貌因子的时空分布特征影响,贵州省不同植被在不同岩性、地貌条件下,对极端寒冷天气事件的时空响应特征明显不同,其恢复过程也存在巨大差异:

(1)在岩性方面,喀斯特岩性区比非喀斯特岩性区对极端寒冷天气事件的敏感性更强,抵抗能力更弱。在凝冻事件发生初始,喀斯特岩性区和非喀斯特岩性区植被 NPP 的受损情况差异较小,但随着凝冻事件的推进,喀斯特岩性区的植被 NPP 受损率超过喀斯特岩性区;

(2)在地貌方面,岩溶高原区植被最为敏感和脆弱,岩溶断陷盆地区受损植被恢复能力较强,而岩溶槽谷区虽受损虽最小,但恢复能力最差;

(3)在植被方面,灌丛受损最为大,混交林受损最小。草丛恢复最好,灌丛恢复最差。可见,混交林和草丛对极端寒冷天气事件的抵御能力最强,而灌丛最为脆弱;

整体而言,经过一年的恢复,贵州省 2009 年 1 月份的 NPP 超过了 2007 年同期水平,绝大部分区域 NPP 恢复良好,但在月际和空间上存在差异:1 月份 NPP 超过 2007 年同期 NPP 水平,而 2、3 月份较 2007 年同期 NPP 水平仍相差 13.60% 和 13.39%。NPP 仍未恢复的区域主要集中在省域的中部和东北部等喀斯特岩性区。

参考文献:

- [1] LIETH H, WHITTAKER R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York: Springer Verlag Press, 1975.
- [2] SHI J, CUI L L. Characteristics of high impact weather and meteorological disaster in Shanghai, China[J]. Nat Hazards, 2012, 60(3): 951-969.
- [3] LUDVIGSEN L, KLEBOE R. Extreme weather impacts on freight railways in Europe[J]. Natural Hazards, 2014, 70(1): 767-787.
- [4] VELDE M V D, TUBIELLO F N, VRIELING A, et al. Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data[J]. Climatic Change, 2012, 113(3/4): 751-765.
- [5] SCHWEIGHOFER J. The impact of extreme weather and climate change on inland waterway transport[J]. Natural Hazards, 2014, 72(1): 23-40.
- [6] 田汉勤,徐小锋,宋 霞.干旱对陆地生态系统生产力的影响[J].植物生态学报,2007,31(2):231-241.
- [7] 胡文秋,张 琨,张金盈,等.低温雪灾后莽山保护区森林植被恢复遥感评价[J].资源开发与市场,2011,27(5):388-390.
- [8] 徐雅雯,吴可可,朱丽蓉,等.中国南方雨雪冰冻灾害受损森林植被研究进展[J].生态环境学报,2010,19(6):1485-1494.
- [9] 赵 霞,沈孝清,黄世能,等.冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区木本植物机械损伤的初步调查[J].林业科学,2008,44(11):164-167.
- [10] 张建国,段爱国,童书振,等.冰冻雪压对杉木人工林近成熟林分危害调查[J].林业科学,2008,44(11):18-22.
- [11] 邵全琴,黄 麟,刘纪远,等.2008年春季中国南方冰雪冻害林木物理折损典型样带分析[J].山地学报,2009,27(2):177-187.
- [12] 温庆忠,魏雪峰,赵元藩,等.雨雪冰冻灾害对滇东南 5 种人工林的影响[J].林业科学,2008,44(11):23-27.
- [13] 黄朝法.福建省长汀县森林 C 库动态变化及雪灾的影响分析[D].福州:福建师范大学,2011.
- [14] 杨锋伟,鲁绍伟,王 兵.南方雨雪冰冻灾害受损森林生态系统生态服务功能价值评估[J].林业科学,2008,44(11):101-110.
- [15] 郭 颖,孙吉慧.雪凝灾害林木损失评估及恢复重建技术初探[J].贵州林业科技,2008,36(3):30-34.
- [16] 田 华,谈建文,黄光体.湖北省低温雨雪冰冻灾害植被恢复与林业重建的思考[J].湖北林业科技,2009(1):65-68.
- [17] 曹 昀,张 聘,卢永聪.南方雨雪冰冻灾后林业生态恢复的措施[J].福建林业科技,2008,35(4):207-209.
- [18] 梁益同,夏智宏,柳晶辉,等.基于 RS 和 GIS 的 2008 年长江中下游雪灾监测—以湖北省为例[J].长江流域资源与环境,2009,18(9):881-884.
- [19] 徐新良,苏富岩,庄大方,等.2008 年南方冰雪过程对生态环境影响的遥感监测—以湖南省资兴市为例[J].地球信息科学学报,2009,11(2):237-242.
- [20] 朱俊凤,钱峻屏,廖广社,等.基于对象方法的南岭山区雨雪冰冻灾害遥感检测与空间分析[J].山地学报,2010,28(4):478-486.
- [21] 吴健生,陈 莎,彭 建.基于图像阈值法的森林雪灾损失遥感估测—以云南省为例[J].地理科学进展,2013,32(6):914-923.
- [22] 张宝雷,胡文秋,冯朝阳,等.低温雪灾对莽山保护区植被 NPP 影响的遥感评价[J].水土保持研究,2011,18(4):97-105.
- [23] 吴战平,许 丹.贵州气候变化的科学事实[J].贵州气象,2007,31(4):3-4.
- [24] 宗志平,马 杰,张恒德,等.近几十年来冻雨时空分布特征分析[J].气象,2013,39(7):813-820.
- [25] 马树庆,李 锋,王 琪,等.寒潮和霜冻[M].北京:气象出版社,2009.
- [26] 李瑞玲,王世杰,周德全,等.贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J].地理学报,2003,58(2):314-320.
- [27] 王世杰,张信宝,白晓永.南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J].山地学报,2013,31(1):18-24.

- [28] 唐延婧, 宋 丹. 2008 年初贵州低温雨雪凝冻灾害天气成因分析[J]. 气象科学, 2008, 28(增刊): 78-83.
- [29] 顾晓平, 于 飞, 汤 泌, 等. 贵州省凝冻灾害风险评估模型[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(14): 6498-6500.
- [30] 蒙古军, 王 钧. 20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J]. 地理研究, 2007, 26(5): 858-864.
- [31] 曾居仁. 贵州冻雨 冬季“常客”[EB/OL]. (2014-02-21)[2014-09-21]. http://www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qxkq/2011qkpd/201202/t20120221_162047.html.
- [32] 杜小玲, 彭 芳, 武文辉. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象, 2010, 36(5): 92-97.
- [33] 严小冬, 吴战平, 古书鸿. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 694-701.
- [34] 白晓永. 贵州喀斯特石漠化综合防治理论与优化设计研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学硕士学位论文, 2007.
- [35] 姚峰峰, 张时煌, 杨 医, 等. 冰冻雨雪灾害对江西林业影响的评估技术探讨[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1657-1666.
- [36] 莫伟华, 王君华, 钟仕全, 等. 基于 MODIS 的冰雪遥感灾害监测与评估技术[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 88-93.
- [37] 汪蛟龙. 贵州 86 个县遇秋冬连旱 正积极开采地下水缓解旱情[EB/OL]. (2014-03-17)[2014-11-01]. <http://news.cntv.cn/china/20100317/102288.shtml>.
- [38] 吴古会, 彭 芳, 崔 庭, 等. 2011 年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 291-299.
- [39] 徐冬梅, 韩 敏. 雨雪冰冻灾害的成因及对策研究[J]. 农技服务, 2010, 27(1): 111-113.
- [40] 郭淑红, 薛 立. 冰雪灾害对森林的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5242-5253.
- [41] 罗喜平, 黄 红, 周成霞. 2004 年冬季贵州省凝冻特征及天气系统分析[J]. 贵州气象, 2005, 29(增刊): 29: 10-12.
- [42] 张润琼, 刘艳雯, 陈 静. 2011 年初贵州低温雨雪冰冻灾害特征及影响分析[J]. 南方农业, 2012, 6(12): 78-82.
- [43] 吴协保, 孙继霖, 林 琼, 等. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨[J]. 中国岩溶, 2009, 28(4): 391-396.

VEGETATION NET PRIMARY PRODUCTIVITY FOR THE EXTREME COLD WEATHER EVENTS

—TAKING THE FREEZING DISASTER OF GUIZHOU PROVINCE
IN 2008 YEAR AS AN EXAMPLE

LI Pan-long¹, BAI Xiao-yong², LI Yang-bing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of geochemistry, Chinese academy of sciences, Guiyang 550002, China;

2. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to reveal the response and recovery process of regional vegetation net primary productivity (NPP) for the cold weather extreme events. Taking the freezing disaster event that occurred in the southern China in early 2008 for example. Using the GIS spatial analysis technology to analysis the NPP data based on the 250m resolution of MODIS data. Discussing the different response characteristics of NPP with landform and vegetation types under the freezing disaster event. Results showed that; 1) The freezing disaster event lead to NPP loss 0.77×10^6 t/C, mainly distributed in the regional of the middle and south area concentrated Karst; 2) The damaged degree of karst rock area is damaged obviously serious more than the non-karst. The damage rate is 28.62% and 21.92%. The recovery of karst rock area is poor and the recovery rate is 91.29%. So the karst rock area is more unstable and weak than the karst rock area for the cold weather extreme events ;3) In different karst areas, karst plateau is the most serious damage area. The karst trough valley area is the minimum one. The damage rate is 33.00% and 21.40%. In addition, the restore of karst faulted basin is the best one. The karst trough valley is the worst one. The recovery rate is 106.65% and 88.41%. These facts imply that the vegetation of karst trough valley is the most sensitive and fragile, and restoration ability of the fault basin karst areas is strong. At the same time, the karst trough valley area is damaged to the minimum, but the ability to restore is the worst one; 4) The loss of brush is the various vegetation types. The mixed forests type is the smallest loss one. The rates are 28.49% and 21.79% respectively. In the aspects of recovery degree, the grass is the best one, and the brush is the worst one. The recovery rates were 97.63% and 91.33%. The ability of the restore of the mixed forest and grass is comparative strong. And bush fragile is the worst one. This research realized that the different vegetation of response characteristics for the extreme cold weather events are obviously different under the condition of different lithology, physiognomy. There exist great differences in the recovery process.

Key words: vegetation net primary productivity; extreme cold weather events; response; Guizhou Province; freezing disaste