林业科学研究 2012,25(5):576～581
Forest Research

文章编号:1001-1498(2012)05-0576-06

基于 Kira 指标的云南松气候适宜性分析

陈 飞[1], 王健敏[1], 陈晓鸣[1*], 孙宝刚[1], 杨子祥[1], 段兆尧[2]

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所,国家林业局资源昆虫培育与利用重点实验室,云南 昆明 650224;
2. 云南省林业科学院,云南 昆明 650201)

摘要:基于云南省气象数据与云南松空间分布数据,结合国际上应用较广的 Kira 指标,通过统计方法和 GIS 软件,分析了云南省气候资源时空变化特征以及云南松未来适生区域的变化。结果表明:云南松的温暖指数为 32.1～204.3 ℃·月,最适范围为 86.1～160.0 ℃·月,平均值 122.9 ℃·月;云南省 WI 年际变化曲线呈明显升高,从 1970 年的 121.30 ℃·月升至 2002 年的 133.57 ℃·月;HI 年际变化曲线呈下降趋势,从 1970 年的 10.97 mm·(℃·月)$^{-1}$降至 2002 年的 8.92 mm·(℃·月)$^{-1}$,WI 波动较 HI 显著,最高值出现在 1998 年,为 136.63 ℃·月,最低值为 1976 年的 117.13 ℃·月,但均在云南松最适分布范围内。基于 Kira 温暖指数预测:未来气候变化下,云南松分布仍集中于滇中地区,但分布面积发生了较大变化,云南松分布北界移动不明显,但云南松总体适生面积将逐步减少。

关键词:云南松 ;气候变化:Kira 指标:气候适宜性

中图分类号:S791.257 **文献标识码**:A

Analyzing Climate Suitability of *Pinus yunnanensis* Based on Kira's Indices

CHEN Fei[1], *WANG Jian-min*[1], *CHEN Xiao-ming*[1], *SUN Bao-gang*[1], *YANG Zi-xiang*[1], *DUAN Zhao-yao*[2]

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Cultivation and Utilization of Resource Insects of State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201, Yunnan, China)

Abstract: Based on the meteorological data of Yunnan Province and the space distribution data of *Pinus yunnanensis*, with Kira's indices, and by using statistical methods and GIS software, the spatiotemporal change characteristics of climate resources and the suitable area's changes of *P. yunnanensis* were analyzed. The results indicated that the mean value of *P. Yunnanensis'* warmth index was 122.9 ℃·month, ranging from 32.1 – 204.3 ℃·month, and it's optimum range was 86.1 – 160.0 ℃·month. The interannual variation curve of Warmth Index (WI) in Yunnan Province was significantly elevated, from 121.30 ℃·month (1970) to 133.57 ℃·month (2002), and the interannual variation curve of Humidity Index (HI) followed a downward trend, from 10.97 mm·(℃·month)$^{-1}$ (1970) to 8.92 mm·(℃·month)$^{-1}$(2002). The WI fluctuation was more significant than HI fluctuation. The maximum value occurred during 1998 (136.63 ℃·month), and the minimum value for the 1976 (117.13 ℃·month). However, both the maximum and minimum values belong to the optimal range of *P. yunnanensis*. Under the condition of climate changing in the future, *P. yunnanensis* will be centralized in areas of middle Yunnan, but the distribution area will change. The north distributing limitation will not move obviously but the south boundary will atrophy obviously, and the suitable area will decrease stage by stage.

Key word: *Pinus yunnanensis*; climate change; Kira's indices; climate suitability

收稿日期: 2012-06-28
基金项目: 国家林业局"948"项目(2009-4-37);国家林业局林业公益性行业专项(200904052;200804001)
作者简介: 陈 飞(1987—),男,湖北人,硕士研究生,主要研究方向:森林健康.
*通讯作者: Email: xmchen@vip.km169.net

气候是决定植被类型和分布的主要因素之一,气候的变化将会导致植物分布区发生变化。气候变化已成为当今国际社会共同关注的全球问题,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第 4 次评估报告指出,1906 至 2005 年全球平均气温升高 0.56～0.92 ℃,1956 年至 2005 年全球气温以 0.13 ℃·(10 a)$^{-1}$的速率上升。代姝玮等[1]基于 1961—2007 年中国西南地区 88 个气象台站的地面观测资料,结合统计方法和 GIS 软件分析发现:西南地区年平均气温呈上升趋势,平均增速为 0.18 ℃·(10 a)$^{-1}$,全区降水资源总体减少,年降水量的平均下降速率为 10 mm·(10 a)$^{-1}$,程建刚等研究发现:云南近 50 年气温变化与全球、北半球、中国变化趋势基本一致,气温变化幅度略大于全球,弱于北半球和全国变化[2]。关于气候变化对植被分布的影响已通过一些研究实例证明,有研究者通过对 1 700 多个物种在 20～140 年时间内分布区的变化研究发现[3]:物种分布区迁移与气候变化相关,对部分物种进行定量分析得出,气候变化导致物种分布区北界平均向北移动速率为 6.1 km·(10 a)$^{-1}$,最高分布海拔平均上升速率 6.1 m·(10 a)$^{-1}$。贺庆棠等[4]通过 Holdridge 生命地带分类模型和生态信息系统分别预测了马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)和云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)的地理位移趋势。另外,也有气候-植被指标体系被应用到对气候与植被关系的研究中,Kira 温暖指数(WI)和寒冷指数(CI)是目前国际应用较广的气候-植被相关研究的方法和指标之一[5],有许多学者应用 Kira 指数研究了我国青藏高原、内蒙古等地的地带性树种的气候-植被指标和植被区划[6-7]。

云南松是我国西南地区的特有树种,具有生态适应性广,天然更新能力强的特点[8]。关于云南松生物特性及分布状况,曾有许多学者进行讨论,早期研究得出:气候变暖将会导致云南松面积到 2050 年减少 50% 左右[4],该结果基于气候包络模型得出,而该模型通常会使结果过度估计[9]。目前,地理信息技术已广泛应用于物种适宜性评价[10-13],将 GIS 与 Kira 指标应用到云南松分布预测中的相关研究尚未见报道。本文分析了云南省气候-植被指标时空变化特征与云南松气候适宜性,并对未来云南松分布进行预测,可以利用这些研究结果从森林经营要求的角度出发,采取相应的措施,调整森林的组成结构,控制云南松林分布变化的方向和走势,有助于森林发挥最大的经济效益和生态效益,为正确的森林经验管理方案提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　云南松空间分布数据

云南省森林资源连续清查第 4 次复查于 2002 年对全云南省范围按 6 km×8 km 的距离布设 7 975 块 0.8 hm^2 的正方形样地进行全面调查,本研究从中提取云南松的空间分布数据,以云南松为优势树种的样地达 798 个,占全省有林地 22.75%,云南松分布受纬度影响明显,主要集中分布在云南省中间纬度地带(23°30′～26°30′N),滇西北如丽江、滇东北如昭通等地亦有分布,具体如图 1 所示。

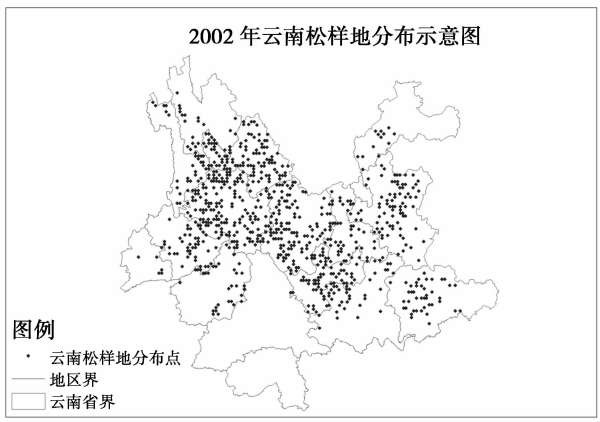


图 1　2002 年云南松样地分布

1.2　气候数据

气候数据从 Climate China v 4.40 中提取,Climate China 是基于 PRISM(parameter-elevation regressions on independent slopes model)建立起来的气候模型[14-15]。PRISM 采用了 2 600 多个气象站数据,为我国产生了 4 km×4 km 的网格气候数据。由于山区地形复杂,这样的分辨率仍会带来相当大的误差。Climate China 采用双向插值法和偏导海拔调整方程相结合的方法[16],解决了 PRISM 数据低分辨率的不足,可为任一样点产生气候数据,Climate China 的输出结果在云南省已经得到 135 个气象站点数据的验证。

1.3　研究方法

1.3.1　气候-植被指标　目前国际上较流行的研究植被与气候关系的指标和方法如下:

Kira[17-18]热量指数,包括温暖指数(WI)和寒冷指数(CI)。温暖指数采用月平均气温高于 5 ℃的差值总和作为植物生长的热量条件,同样,寒冷指数是

采用月平均气温低于5 ℃的差值总和来表示,计算公式为:

$$WI = \sum (t-5)\ ;CI = -\sum (5-t)$$

单位为 ℃ × 月,式中:t 为月平均气温

徐文铎湿润指数[19](HI):

$HI = P/WI$(mm·(℃·月)$^{-1}$)

式中:P 为年降水量;

本文热量指数分布范围采用半峰宽计算法,计算如下:

最适范围:$X - 0.5PWH \sim X + 0.5PWH$

式中:$PWH = 2.354 \times S$

其中:S 为树种热量指数的标准差,X 为热量指数的平均值。Yim[20]认为用半峰宽作图法来确定树种的热量分布最适宜范围,国内专家认为可用半峰宽计算法来确定树种热量分布最适范围[21]。

1.3.2 数据处理 根据云南省第4次连续清查数据7 975个样地的海拔与经纬度从 Climate China v 4.4 软件中调取每个样地的1970—2002气候指标以及2020、2050和2080年预测气候指标,每个样地气候指标包含1—12月均气温、年均气温以及年均降水量,通过上述公式计算出每个样地的 *WI*、*CI* 和 *HI* 值。利用 ArcGIS9.3 分析,通过空间分析模块克吕格插值对7 975个样地的 Kira 温暖指数进行插值,设定的 cell size 参数均为0.003,生成空间栅格数据,最后输出不同年代云南省温暖指数分布特征图。

2 结果与分析

2.1 云南松分布的气候指标范围

通过对云南松样地的气候数据进行分析处理,计算云南松分布区的各种气候指标(表1),如 Kira 的温暖指数(*WI*)、寒冷指数(*CI*)、徐文铎湿度指数(*HI*)。

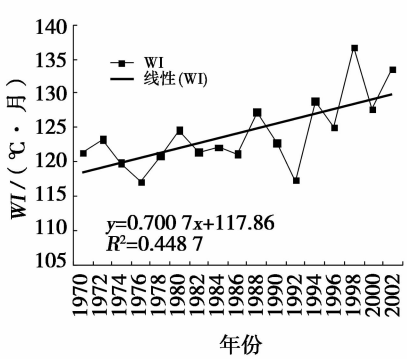
表1 云南松分布的气候指标

指标	平均值	标准差	最小值	最大值	最适范围
Kira 温暖指数(*WI*)/(℃·月)	122.885	31.283	32.100	204.300	86.065～159.705
Kira 寒冷指数(*CI*)/(℃·月)	-0.398	1.558	-20.700	0.000	
年均降水量(*MAP*)/mm	1 009.319	197.961	478.000	1 870.000	
徐文铎湿润指数(*HI*)/(mm·(℃·月)$^{-1}$	8.920	3.561	3.431	32.616	

由表1可知:云南松的温暖指数为32.1～204.3 ℃·月,最适范围为86.065～159.705 ℃·月,平均值122.885 ℃·月,极限范围(最小值～最大值)和最适范围都较宽,其它几个指标亦如此,这表明云南松分布的气候范围较广。Root 等[22]对143个研究中的1 473个物种进行了整合分析,发现有80%的物种的迁移与温度变化高度相关。由于云南省地处低纬度高原地带,气候总的来说属于亚热带高原季风气候,四季温度差异不明显,计算得出大部分样地寒冷指数为0,不存在差异,故选择温暖指数的极限范围与最适范围作为云南松适生性范围值作分析。

2.2 云南省气候植被指标时间变化特征

图2所示:云南省 WI 年际变化曲线呈明显升高趋势,从1970年121.30 ℃·月升至2002年133.57 ℃·月;HI 年际变化曲线呈下降趋势,从1970年10.97 mm·(℃·月)$^{-1}$降至2002年的8.92 mm·(℃·月)$^{-1}$,WI 波动较 HI 显著,WI 最高值(136.63 ℃·月)出现在1998年,最低值为1976年的117.13 ℃·月,但均在云南松最适分布范围内。



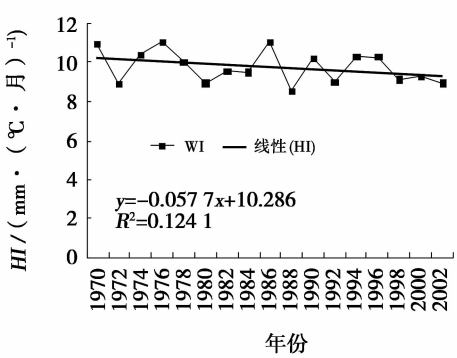


图2 云南省1970—2002年 WI、HI 区域平均值年际变化曲线

2.3　云南省区域 WI 空间变化特征

图 3 显示出云南省温暖指数 1970 年、1980 年、1990 年和 2000 年的分布特征,分级以云南松的温暖指数(WI)为标准,分别为:最佳适生范围取值 86 ～ 160、亚适生范围取值 32 ～ 86 和 160 ～ 204、非适生范围取值 <32 和 >204。总体显示,从南向北 WI 明显降低,东西方向差异不明显。

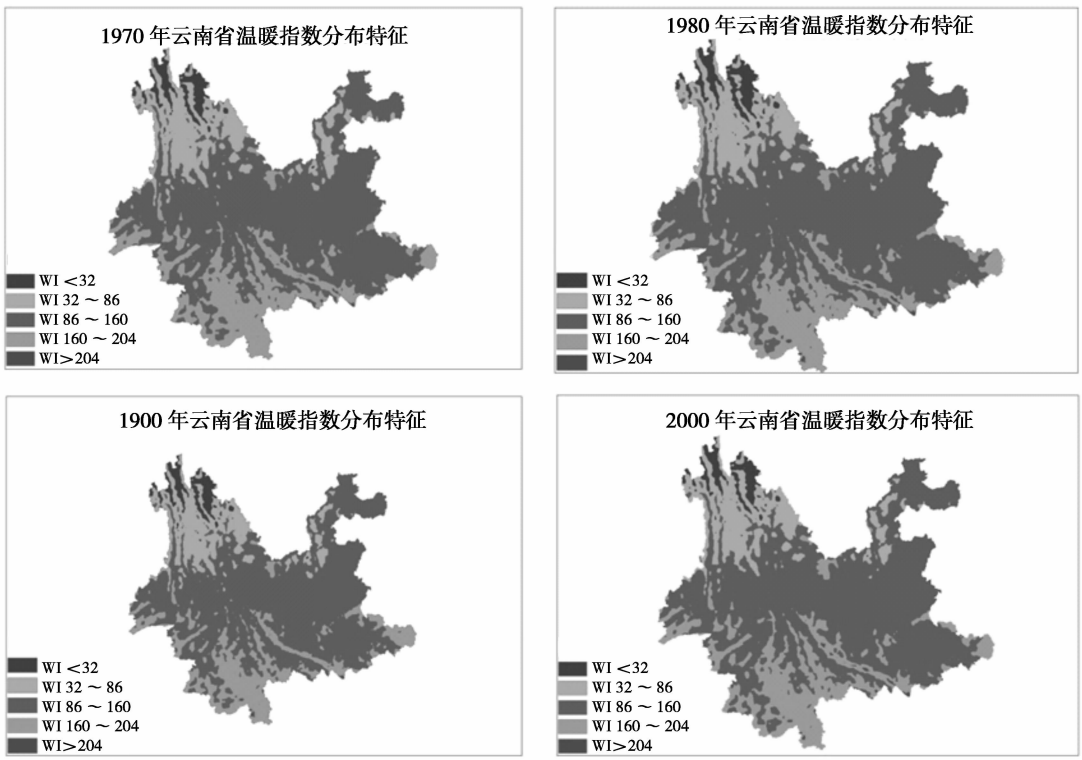


图 3　云南省 WI 时空分布特征

与图 1 对比得出:淡灰色区域虽然是云南松亚适生区即潜在分布范围,但实际分布点很少分布其中,北部地区淡灰色区域同样为亚适生区却实际分布有大量云南松,原因可能是气候变暖将使病虫害发生期提前、害虫死亡率降低、繁殖代数增加,从而使森林病虫害危害加重,使得该区域相对于纬度更高的地带不适宜云南松长期生存发展。对每 10 年做时间尺度分析发现整体变化并不明显,对具体分布于各区域的样地数量对比作图 4,不同时间各区域呈小幅变化,非适生区呈上升趋势,而其他则为不规律波动。

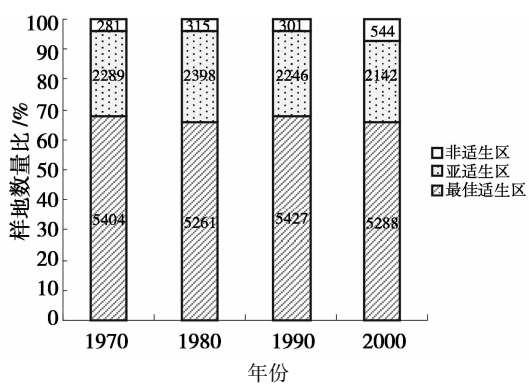


图 4　分布于不同区域的样地数量对比图

2.4　气候变化条件下云南松潜在分布预测

气候变化条件下物种分布区的变化由两方面原因造成,一方面是由于原分布区的消失,另一方面由新适宜的分布区增加。分别对 2020 年、2050 年和 2080 年 WI 分布预测作图 5,未来气候变化下,云南松分布仍集中于云南中间纬度地带,但分布面积发生了较大变化。2020 年至 2050 年,北部非适生区德钦、中甸区域面积出现较大萎缩。最佳适生区也出现大面积萎缩,消失区域主要集中在文山马关、丘北、砚山、弥勒、建水和开远一带。高温非适生区扩大,主要体现在景洪、勐腊以及元谋县。2050 年至 2080 年,上述变化继续扩大,红河州、文山州基本演变为云南松亚适生区,华坪县也出现非适生区。总体来说,云南松分布区北向移动不太明显而由南向北消失比较剧烈,具体面积增减百分比见表 2。

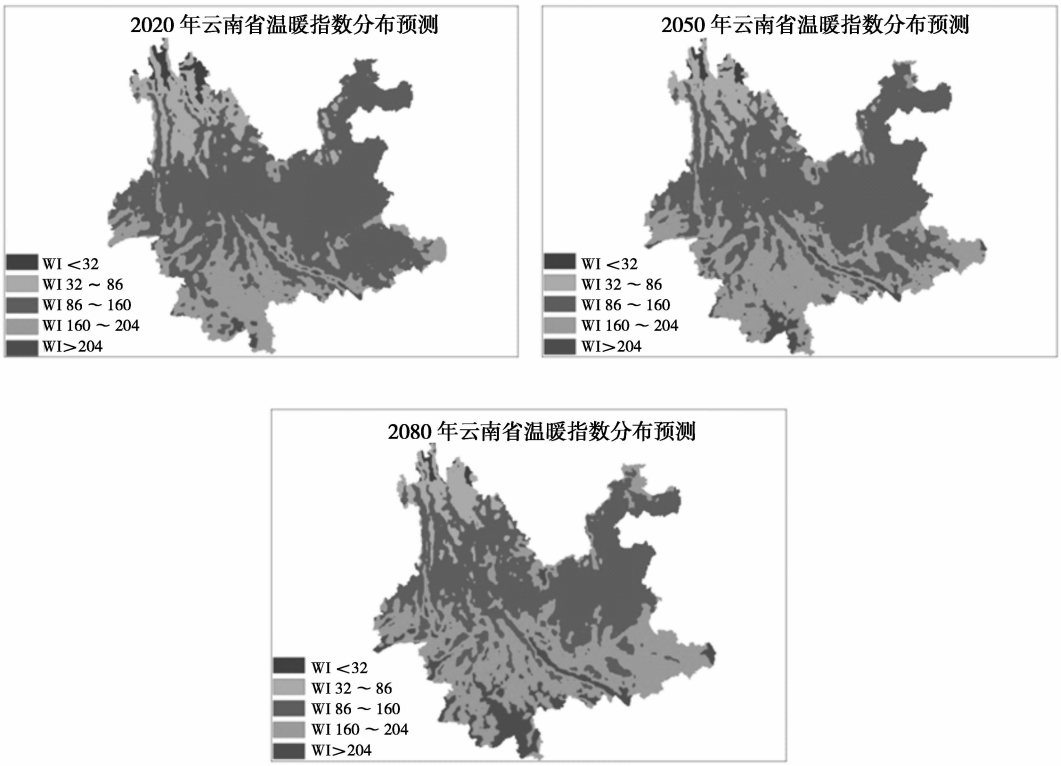


图5 气候变化下云南松适生性分布预测

表2 未来气候变化下云南松潜在分布区面积变化

项目	分布区面积/%		
	2020年	2050年	2080年
$WI<32$	-0.83	-1.04	-0.41
$32\leqslant WI<86$	-1.74	-1.99	-2.13
$86\leqslant WI\leqslant160$	-1.88	-8.21	-9.41
$160<WI\leqslant204$	3.63	9.20	6.75
$204<WI$	0.82	2.10	5.20
非适生区	-0.01	1.06	4.79
亚适生区	1.89	7.21	4.62
最佳适生区	-1.88	-8.21	-9.41

通过对比北部消失面积与南部新增面积发现，南部非适生区扩大面积超过北部非适生区缩小面积，综合二者数据以及图5比较得出，云南松分布北界移动不明显，但云南松适生面积将逐步减少。2020年，云南松最佳适生区减少1.88%；2050年减少8.21%；2080年减少9.41%，非适生区至2080年增加4.97%，并且呈加快趋势。

3 结论与讨论

根据云南松实际分布状况与分布区气候数据得出，云南松温暖指数平均值为123 ℃·月，最适范围为86～160 ℃·月，极限范围为32～204 ℃·月。近年来，云南气候与全球一致性的变暖，20世纪80年代后期开始气温持续上升，特别是20世纪90年代后增暖趋势更强烈[23]。气候变暖背景下，云南省地区温暖指数呈明显增加趋势，从1970年的121.30 ℃·月升至2002年的133.57 ℃·月，湿润指数略微降低，从1970年的10.97 mm·(℃·月)$^{-1}$降至2002年的8.92 mm·(℃·月)$^{-1}$，WI波动较HI显著。

气候变化背景下，基于Kira温暖指数预测出2020年、2050年以及2080年云南松适生性分布范围，总体来说，云南松分布区北界向北移动不太明显，而南界萎缩向北移动较为剧烈，这与前人对云南松的预测结果相吻合[4]。对非适生区而言，南部非适生区扩大的面积超过北部非适生区缩小的面积，综合表2数据得出，云南松总体适生面积将逐步减少。2020年，云南松最佳适生区减少1.88%，2050年减少8.21%，2080年减少9.41%，非适生区面积至2080年将增加4.79%，并且呈加快趋势。

由于自然本身具有复杂性、可变性与异质性,因此,不可能利用简单的模型精准地预测物种在未来的时空分布[24]。本研究基于物种与环境静态关系进行研究,而实际情况下物种对于气候的逐渐变化具有主动适应性及自我调节和耐受能力,能通过长期的适应进化来适应生境的变化,如果未来的气候变化幅度和速率分别处于云南松耐受极限和适应进化速度范围内,则云南松未来的分布状况可能与现状差异不大,反之则相反;另一方面,物种的迁移速度相对气候变化是滞后的,所以本文模拟的云南松分布适生性结果主要是基于气温的单一指标反映一种发展变化趋势而非未来实际分布。未来实际的分布是由各方面因素综合决定的,比如光照、水分、土壤、人为干扰、火灾、外来物种入侵、物种适应性进化和物种迁移等等[25]。可以合理的预测,如果未来实际气候向着本研究中使用模型所预测的气候方向发展,则云南松的分布也会朝着预测的总体趋势发展。提供物种的未来分布预测图,特别像云南松这类在西南地区森林生态系统中占有重要地位的树种,将有利于营林、伐木等管理决策方向的选择,并在气候变化对生态和生产方面产生的影响中采取趋利避害的针对性措施。

参考文献:

[1] 代姝玮,杨晓光,赵　孟,等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅱ. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报,2011,22(2):442 – 452

[2] 程建刚,解明恩. 近 50 年云南区域气候变化特征分析[J]. 地理科学进展,2008,27(5):19 – 26

[3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natual systems[J]. Nature, 2003, 421: 37 – 42

[4] 贺庆棠,袁嘉祖,陈志泊. 气候变化对马尾松和云南松分布的可能影响[J]. 北京林业大学学报,1996,18(1):22 – 28

[5] 杨正宇. 四类气候-植被关系模型比较研究[D]. 北京:中国科学研究院植物研究所,2001

[6] 许　娟,张白平,谭　靖,等. 青藏高原植被垂直带与气候影子的空间关系[J]. 山地学报,2009,27(6):663 – 670

[7] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J]. 应用生态学报,2000,11(1):47 – 52

[8] 金振洲,彭　鉴. 云南松[M]. 昆明:云南科技出版社,2004:5 – 13

[9] Barry S, Elith J. Error and uncertainty in habitat models[J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43:413 – 423

[10] 贺文丽,李星敏,朱　琳,等. 基于 GIS 的关中猕猴桃气候生态适宜性区划[J]. 中国农学通报,2011,27(22):202 – 207

[11] 陈海生,刘国顺,刘大双,等. GIS 支持下的河南省烟草生态适宜性综合评价[J]. 中国农业科学,2009,42(7):2425 – 2433

[12] Seffino L A, Medeiros C B, Rocha J. Woodss-A spatial decision support system based on workflows[J]. The Establishment of Decision Support System, 1999 (27): 105 – 123

[13] 李　峰,周广胜,曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟[J]. 应用生态学报,2006,17(12):2255 – 2260

[14] Daly C, Gibson W P, Taylor G H, *et al*. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate [J]. Climate Research, 2002(22):99 – 113

[15] Daly C, Halbleib M, Smith J I, *et al*. Physiographically-sensitive mapping of temperature and precipitation across the conterminous United States[J]. International Journal of Climatology, 2008(28): 2031 – 2064

[16] Wang T, Hamann A, Spittlehouse D L, *et al*. Development of scale-free climate data for western Canada for use in resource management[J]. International Journal of Climatology, 2006(26):383 – 397

[17] Kira T. Forest ecosystems of east and southeast Asia in global perspective[J]. Ecological Research, 1991(6):185 – 200

[18] Kira T. A climatogical interpretation of Japanese vegetation zones [M]//Miyawaki A, Tuxen R. Vegetation Science and Environmental Protection. Tokyo: Maruzen, 1997:21 – 30

[19] 徐文铎. 吉良的热量指数及其在中国植被中的应用[J]. 生态学杂志, 1985(3):35 – 39

[20] Yim Y J. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. Ⅲ. Distribution of tree species along the thermal gradient [J]. Journal of ecology, 1977,24:177 – 189

[21] 洪必恭,李绍珠. 江苏主要常绿阔叶树种的分布与热量关系的初步研究[J]. 生态学报, 1981(1):105 – 111

[22] Root T L, Price J T, Hall K R, *et al*. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421:57 – 60

[23] 王　宇. 云南气候变化概论[M]. 北京:气象出版社,1996:4 – 133

[24] Iverson L R, Prasad A M, Matthews S N, *et al*. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 254: 390 – 406

[25] Pearson R G, Dawson T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful[J]. Global Ecology & Biogeography, 2003,12:361 – 371