

文章编号: 1008-2786-(2016)6-716-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000178

# 气候变化下四川省物种的分布规律及迁移特征

刘 勤<sup>1,2</sup> 王玉宽<sup>1</sup> 彭培好<sup>2</sup> 逯亚峰<sup>1,3</sup> 陈颖锋<sup>1,3</sup> 王 跚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 四川省气候复杂、生态系统多样, 研究气候变化下该区域物种的分布及迁移规律, 可以为区域生物多样性保护提供科学依据。在中等排放情景 rep4.5 气候变化条件下, 选择 128 个物种作为气候敏感代表种, 利用最大熵模型(MaxEnt) 预测未来 50 a 和 100 a 四川省物种数量及分布变化, 分析了物种迁移特征。结果表明: 气候变化下, 四川省大部分区域物种多样性呈增加趋势, 特别是川西高原物种数量增加明显; 物种的适宜栖息地面积将发生改变, 其中 58% 物种表现为增加趋势, 42% 呈减少趋势; 不同物种栖息地变化程度有所差异, 大部分物种将向高纬度、高海拔移动, 所占比例分别为 54% 和 60%; 在海拔 1 200 ~ 1 800 m 和 3 300 ~ 4 500 m 区间物种多样性变动较剧烈, 应该优先关注和保护。

**关键词:** 气候变化; 物种; 栖息地; 潜在影响

**中图分类号:** Q15

**文献标志码:** A

近百年来以温度和降雨改变为主要特征的全球气候变化十分明显, 并呈持续发展之势<sup>[1]</sup>。与全球平均值相比, 中国升温幅度略高, 降水变化不显著, 但未来升温和降水均会不断增加<sup>[2]</sup>。动植物的生长和繁殖与气候因子关系密切, 气候变化可能影响生物多样性格局<sup>[3]</sup>。相关研究显示 80% 以上的物种将对气候变化产生响应<sup>[4]</sup>, 物种的数量、当前分布范围及潜在栖息地可能发生变动<sup>[5]</sup>, 即部分物种分布范围将缩小, 而有的物种分布范围则会增加或保持不变<sup>[6]</sup>。栖息地的改变将促进物种迁移<sup>[7]</sup>, 并且表现出不同的方向性<sup>[8]</sup>。在不考虑适应性变异下, 多数物种会向高纬度、高海拔方向迁移<sup>[4,9]</sup>, 而完全丧失栖息地或无法迁移的物种将会灭绝<sup>[10]</sup>。已有研究表明, 气候变化后大部分地区的物种多样性降低, 也有区域表现出增加趋势, 这与物种适应力及周边环境相关<sup>[11]</sup>。由此可见, 不同地区物种的栖息地变化及迁移规律具有差异性。本研究以气候和生态系统类型多样、垂直分布特征明显的四川省为

研究区, 评估气候变化下敏感物种在不同纬度与海拔梯度的变化趋势, 分析物种对气候变化的响应及迁移规律, 为区域生物多样性保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

四川省位于青藏高原东缘, 是长江中上游生态屏障的关键区域。全省海拔 186 ~ 7 556 m, 地貌复杂, 生态系统及物种丰富, 是全球生物多样性热点地区“喜马拉雅-横断山区”的核心组成部分<sup>[12]</sup>。由于独特的地理位置和气候类型多样性, 使得该区域对气候变化较敏感。全球气候变化背景下, 预测物种的分布格局与迁移规律, 有利于四川省生态系统管理和生物多样性保护。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 气候变化

收稿日期(Received date): 2015-08-11; 改回日期(Accepted): 2015-12-30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(No. 41401664) [National natural science foundation(No. 41401664)]

作者简介(Biography): 刘勤(1986-), 男, 汉族, 重庆巴南人, 博士, 主要从事流域生态与管理研究 [Liu Qin (1986-), male, born in Chongqing, Ph.D. major in watershed ecology and management] E-mail: liuqin@imde.ac.cn

研究中使用的逐月气温与降水站点数据来源于四川省气象局和国家气象共享网。利用水平分辨率为 50 km 的区域气候模式 RegCM4.0, 单项嵌套 BCC\_CSM1.1 全球气候系统, 模拟中等排放情景 rcp4.5 下四川省及周边区域 205 个气象站点逐月平均气温及降水, 并使用实测数据与模拟值进行对比, 去除系统偏差。气温和降水数据由薄盘样条软件 ANUSPLIN4.36 进行空间插值(尺度为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ )。为保证结果精度及可行性, 采用广义交叉验证(GCV)或最大似然法(GML)确定插值函数以及样条次数(选用局部薄盘模型, 样条次数为 2 次, 海拔为协变量), 对四川省 1981—2099 年逐月平均气温和降水空间分布进行插值。

根据世界气象组织(WMO)对于气候的定义, 结合区域实际情况, 研究中选取 30 a 为一个气候周期, 分别模拟 1981—2010 年、2031—2060 年和 2070—2099 年三个时段的气候特征。通过随机选取 4 个不同海拔范围内的气象站点, 对 1981—2010 时段逐月气温与降水的实测值与模拟值进行回归分析, 结果表明气温的模拟值与实测值间差异较小, 准确性相对较高, 而降水模拟值与实测值存在差异, 但输出结果可以满足分析要求。

## 2.2 物种分布预测

目前, 已有多种统计或机理模型用于物种潜在分布研究, 如生物气候分室模型(BEM)、广义线性模型(GLM)、分类和回归树模型(CART)、生物地理模型(BIOME1)、林窗模型(FORSKA)、基于过程的物候模型(PHE-NOFIT)以及最大熵模型(MAX-ENT)等<sup>[13]</sup>。其中, MAXENT 模型是一种基于生态位原理的生境适宜性模型, 最早由 Phillips 等人基于 Jaynes 提出的最大熵理论(maximum entropy, MAX-ENT, 1957)开发设计, 主要应用物种出现点数据和环境变量数据对物种生境适宜性进行评价<sup>[14]</sup>, 即在符合条件的分布范围中选择熵最大的区域作为最优分布, 利用物种分布数据和环境图层, 建立当前分布区的环境特征与研究区域的非随机关系, 找到最大熵的合理分布(概率最均匀分布), 表征物种的适生区域。模型运行需要的数据主要包括目标物种的实际地理分布点和研究地区的环境变量。

MAXENT 模型在用于气候变化下物种分布评估时, 由于缺乏准确、完善的气候变化对生物多样性的影响机制, 仅是通过统计学方法进行预测, 加之模型主要依靠气候数据提取物种生境的关键影响因

素, 而气候预估也可能存在不确定性, 最终将降低结果的准确度。但是已有研究表明, 在同等条件下, MAXENT 模型对物种分布模拟的精度高于其他生态位模型<sup>[15]</sup>。它以气候相似性为原理, 根据有限的物种分布数据, 在物种的生态位及其环境特征基础上, 得到物种适宜分布区与研究区的非随机关系。这不仅可以预测物种存在与否, 还能预测其存在的相对概率, 是目前最为有效的评估气候变化对于物种影响的模型<sup>[15-16]</sup>。

本研究使用的物种分布点数据来源于四川省林业科学研究院, 结合以下原则: 1) 生态系统中的优势物种; 2) 能反映特殊气候及区域特征的物种; 3) 国家、省级保护物种; 4) 中国特有物种; 5) 分布范围窄的物种, 通过专家打分法筛选出四川气候敏感代表物种如下(包括国家 I、II 级保护物种 33 种), 详见下表:

采用最大熵模型(MaxEnt)对物种分布进行预测, 通过查阅文献<sup>[17]</sup>和对比研究, 选取的生物气候变量和地形因子包括: 坡度、坡向、年均降水量、平均日较差(最高温—最低温)、等温( $P2/P7$ ) ( $\times 100$ )、气温季节性(标准差 $\times 100$ )、夏季最高温、冬季最低温、气温年较差( $P5 - P6$ )、湿季均温、干季均温、夏季均温、冬季均温、年降水量、(6、7、8)月降水量、(12、1、2)月降水量、降水季节性(变异系数)、湿季降水量、干季降水量、夏季降水量、冬季降水量。模型输出结果为 logistic 值, 变量的重要性采用 jack-knife 刀切法来检验, 并生成回馈曲线。预测物种分布的概率值在 0~1 之间, 故选取各物种最大分布概率的 70% 的值作为可能存在分布的阈值, 识别物种的空间分布。

## 3 研究结果

### 3.1 气候变化

通过对未来不同时段气温与当前时段的对比发现(图 1), 四川省气温呈增加趋势, 且变化的空间差异明显。西部高原升温幅度高于盆周山地和东部平原, 尤其是北部若尔盖区域升温显著。从不同时段来看, 中期时段(2031—2060 年), 高原区域小地形对气温变化的影响并不明显; 远期时段(2070—2099 年), 地形对于温度变化的影响较明显, 全省平均气温最多升高  $2.28^{\circ}\text{C}$ , 最低升高  $0.65^{\circ}\text{C}$ 。

通过对未来不同时段年降雨量与当前时段对比

表 1 四川省气候敏感代表物种  
Tab. 1 Representative species in sichuan province

植 物			动 物		
物种名称	拉丁名	保护级别	物种名称	拉丁名	保护级别
高寒水韭	<i>Isoetes hypsophila</i>		高体近红鲃	<i>Ancherythroculter kurematsui</i>	
霸王鞭	<i>Euphorbia neriiifolia</i>		圆口铜鱼	<i>Coreius guichenoti</i>	II 级
角柱花	<i>Hylocereus undatus</i>		铜鱼	<i>Coreius heterodon</i>	
川滇柳	<i>Salix rehderiana</i>		青石爬鮡	<i>Euchiloglanis davidi</i>	
川滇高山栎	<i>Quercus aquifolioides</i>		长吻鮠	<i>Leiocassis longirostris</i>	
黄背栎	<i>Quercus pannosa</i>		长薄鳅	<i>Leptobotia elongata</i>	
四川蒿草	<i>Kobresia setchwanensis</i>		胭脂鱼	<i>Myxocyprinus asiaticus</i>	II 级
早熟禾	<i>Poa annua</i>		岩原鲤	<i>Procypris rabaudi</i>	
红花绿绒蒿	<i>Meconopsis punicea</i>	II 级	华鲮	<i>Sinilabeo rendahli</i>	
杉木	<i>Cunninghamia lanceolata</i>		中华倒刺鲃	<i>Spinibarbus sinensis</i>	
山杨	<i>Populus davidiana</i>		大鲃	<i>Megalobatrachus davidianus</i>	
白桦	<i>Betula platyphylla</i>		高原蜉	<i>Gloydius monticola</i>	
柏木	<i>Cupressus funebris</i>		泽蛙	<i>Rana limnocharis</i>	
四川红杉	<i>Larix mastersiana</i>	II 级	高原林蛙	<i>Rana kukunoris</i>	
云南松	<i>Pinus yunnanensis</i>		西藏山溪鲵	<i>Batrachuperus tibetanus</i>	
岷江柏木	<i>Cupressus chengiana</i>	II 级	四川湍蛙	<i>Amolops mantzorum</i>	
独叶草	<i>Kingdonia uniflora</i>	I 级	倭蛙	<i>Nanorana pleskei</i>	
水青树	<i>Tetracentron sinense</i>	II 级	大齿蟾	<i>Oreolalax major</i>	
康定木兰	<i>Magnolia dawsoniana</i>		红脚鹬	<i>Tringa totanus</i>	
眼子菜	<i>Potamogeton distinctus</i>		普通燕鸥	<i>Sterna hirundo</i>	
雪莲花	<i>Saussurea involucrata</i>	II 级	红尾水鸕	<i>Rhyacornis fuliginosus</i>	
红景天	<i>Herba Rhodiola</i>	II 级	四川雉鹑	<i>Tetraophasis obscurus szechenyii</i>	
车桑子	<i>Dodonaea viscosa</i>		橙翅噪鹛	<i>Garrulax Elliotii</i>	
麻枫树	<i>Jatropha curcas</i>		长尾山椒鸟	<i>Pericrocotus ethologus</i>	
仙人掌	<i>Opuntia stricta</i>		棕背伯劳	<i>Lanius schach</i>	
扭黄茅	<i>Heteropogon contortus</i>		暗绿绣眼	<i>Zosterops japonicus</i>	
鸢尾杜鹃	<i>Rhododendron zheguense</i>		黄臀鹑	<i>Pycnonotus xanthorrhous</i>	
陇蜀杜鹃	<i>Rhododendron przewalskii</i>		紫啸鹑	<i>Myophonus caeruleus</i>	
紫丁杜鹃	<i>Rhododendron forrestii</i>		雉鹑	<i>Tetraophasis obscurus</i>	I 级
铁橡栎	<i>Quercus baronii</i>		四川山鸢鹑	<i>Arborophila rufipectus</i>	I 级
鲜卑花	<i>Sibiraea laevigata</i>		白腹锦鸡	<i>Chrysolophus amherstiae</i>	II 级
贝母	<i>Bulbus Fritillaria</i>		红腹锦鸡	<i>Chrysolophus pictus</i>	II 级
桢楠	<i>Phoebe zhennan</i>		白马鸡	<i>Crossoptilon crossoptilon</i>	II 级
香樟	<i>Cinnamomum camphora</i>	II 级	黑颈鹤	<i>Grus nigricollis</i>	I 级
青冈	<i>Cyclobalanopsis glauca</i>		血雉	<i>Ithaginis cruentus</i>	II 级
峨眉含笑	<i>Michelia wilsonii</i>		雪鹑	<i>Lerwa lerwa</i>	
西康玉兰	<i>Magnolia denudata</i>		勺鸡	<i>Pucrasia macrolopha</i>	II 级
麻栎	<i>Quercus acutissima</i>		间颅鼠兔	<i>Ochotona cansus</i>	
峨眉冷杉	<i>Abies fabri</i>		高山麝	<i>Moschus chrysogaster</i>	I 级
川西云杉	<i>Picea likiangensis</i>		棕熊	<i>Ursus arctos</i>	II 级
油麦吊云杉	<i>Picea brachytyla var. complanata</i>	II 级	白臀鹿	<i>Cervus elaphus</i>	
梓叶槭	<i>Acer catalpifolium</i>	II 级	羚牛	<i>Budorcas taxicolor</i>	
西昌黄杉	<i>Pseudotsuga xichangensis</i>		大熊猫	<i>Ailuropoda melanoleuca</i>	I 级
金毛狗	<i>Cibotium barometz</i>		小熊猫	<i>Ailurus fulgens</i>	II 级
马尾松	<i>Pinus massoniana</i>		鬣羚	<i>Capricornis sumatraensis</i>	II 级
连香树	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	II 级	白唇鹿	<i>Cervus albirostris</i>	I 级
冬虫夏草	<i>Cordyceps sinensis</i>	II 级	四川梅花鹿	<i>Cervus nippon</i>	I 级
块菌	<i>Tuber mdicum</i>		水鹿	<i>Cervus unicolor</i>	II 级
松茸	<i>Tricholoma matsutake</i>		毛冠鹿	<i>Elaphodus cephalophus</i>	
			斑羚	<i>Naemorhedus goral</i>	II 级
			豹猫	<i>Prionailurus bengalensis</i>	
			岩羊	<i>Pseudois nayaur</i>	II 级
			川金丝猴	<i>Rhinopithecus roxellanae</i>	I 级

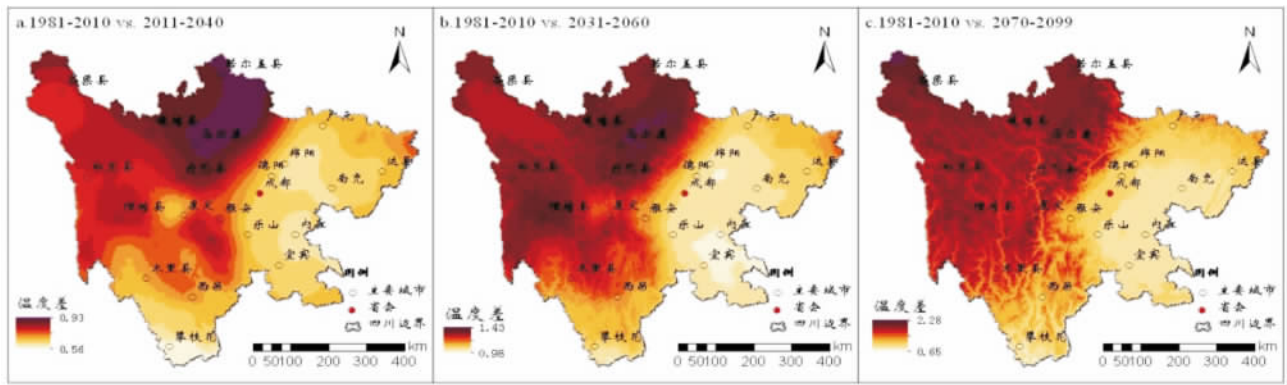


图1 未来气候变化下四川省平均气温空间分布  
Fig.1 Sichuan annual average temperature changes in the next 100 years

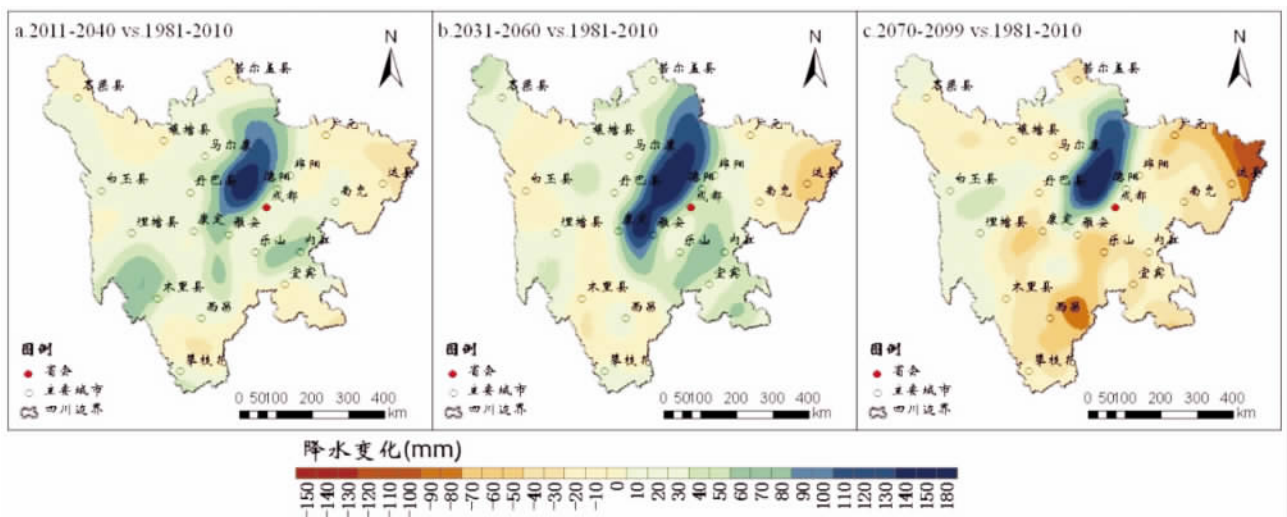


图2 未来气候变化下四川省降雨空间分布  
Fig.2 Sichuan annual average precipitation changes in next 100 years

发现(图2),未来100 a 四川省年降水量变化的空间分布不均匀,攀西地区和盆地东北部为减少趋势,盆地西部、南部和川西高原为增加趋势。

3.2 物种分布变化

3.2.1 物种数量及适宜栖息地面积变化

预测结果显示:气候变化情景下,本世纪四川省气候敏感物种数量未发生显著变化,但物种的分布格局及适宜栖息地面积将发生改变。其中,2000—2050年间,四川省物种的适宜栖息地平均减少面积4500.2 km<sup>2</sup>,其中面积减少最多的物种是倭蛙(*Nanorana pleskei*)、棕熊(*Ursus arctos*)和桢楠(*Phoebe zhennan*),而减少比例最多的是岩原鲤(*Procypris rabaudi*)、蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)和四川梅花鹿(*Cervus nippon sichuanicus*),分别减少为原来的0.25%、0.49%和0.55%。

2000—2100年间,四川省将有58%物种的适宜栖息地面积将增加,42%物种的适宜栖息地呈现减少趋势,平均减少面积9706.4 km<sup>2</sup>,其中面积减少最多的物种是高山麝(*Moschus chrysogaster sifanicus*)、峨眉含笑(*Michelia wilsonii*),而蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)和西藏蟾蜍(*Bufo tibetanus*)的面积减少比例最大,分别减少为原来的0.03%、0.04%和0.05%。蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)、鬣羚桢楠(*Capricornis sumatraensis*)和四川梅花鹿(*Cervus nippon sichuanicus*)面积急剧减少,华鲮(*Sinilabeo rendahli*)、康定木兰(*Magnolia dawsoniana*)和高体近红鲃(*Ancherythroculter kurematsui*)面积明显增加,而如藏鼠兔(*Ochotona tibetana*)、桢楠(*Phoebe zhennan*)、雉鸡(*Phasianus colchicus*)等的部分物种适宜栖息地面积

则表现为先减少后略有增加趋势。

3.2.2 未来物种迁移趋势

由于适宜栖息地空间分布的改变将导致物种迁移,其水平迁移通过分布中心点坐标变化来反映,即使用  $X$  轴的改变表示东西方向的迁移,而使用  $Y$  轴的改变表示南北方向的迁移。具体计算公式如下:

敏感物种东西迁移距离:

$$dX_{future-current} = \bar{X}_{future} - \bar{X}_{current} \quad (1)$$

敏感物种南北向平均平移距离:

$$dY_{future-current} = \bar{Y}_{future} - \bar{Y}_{current} \quad (2)$$

随着区域气候的变化,2000—2050 年间,所有物种均发生不同程度水平方向的迁移(表 1)。其中,67 个(52%)物种向东迁移,61 个(48%)物种向西迁移,54 个(42%)物种发生向南的平移,74 个(58%)物种发生向北的平移。总体而言,南北向比东西向平均迁移距离偏多,向东和向北迁移距离最大的分别是雉鸡(*Phasianus colchicus*)和铜鱼(*Coreius heterodon*),向西和向南迁移距离最大的分别是蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)和大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)。2000—2100 年间,物种迁移距离较前一个时段有所增加,向东、向北迁移距离最大的物种分别为黑眶蟾蜍(*Bufo melanostictus*)和红脚鹬(*Tringa totanus*),向西、向南迁移距离最大的物种分别为倭蛙(*Nanorana pleskei*)和大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)。

不同物种空间分布在垂直方向的变化通过海拔进行提取,具体计算公式如下:

$$dH_{future-current} = \bar{H}_{future} - \bar{H}_{current} \quad (3)$$

表 2 物种在水平方向的迁移状况

Tab.2 Species' horizontal migration

变化时段	迁移方向	发生迁移的物种数量	平均迁移距离/(km 或度)	迁移距离最大的物种
2000—2050 年	东	67	106.13 或 0.894	雉鸡
	西	61	99.063 或 0.875	蓝马鸡
	南	54	122.57 或 0.789	大熊猫
	北	74	146.239 或 0.957	铜鱼
2000—2100 年	东	64	138.53 或 0.841	黑眶蟾蜍
	西	64	168.55 或 0.793	倭蛙
	南	59	152.67 或 0.889	大熊猫
	北	69	156.51 或 0.755	红脚鹬

从垂直空间分布来看(表 3),随着区域气候变

化,更多的物种将向高海拔迁移。2000—2050 年间,总共有 83 个(65%)物种栖息地向高海拔迁移,其中蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)平均迁移距离最大;另外 45 个(35%)物种将向低海拔迁移,其中西康玉兰(*Magnolia wilsonii*)平均迁移距离最大。2000—2100 年间,物种在垂直方向上的迁移强度较前一时段有所增加,总共有 77 个(60%)物种向上迁移,四川湍蛙(*Amolops mantzorum*)的平均迁移距离最大;51 个(40%)物种向下迁移的物种中,大齿蟾(*Oreolalax major*)的平均迁移距离最大。

由图 3 可见,随着物种的规律性迁移,2000—2100 年间,该区域物种多样性呈增加趋势,且 2100 年变化程度高于 2050 年。其中,两爬类、鸟类、鱼类、植物类物种多样性增加,但是盆周山区、川西南山地河谷区和川西北高山、山原峡谷区的哺乳类物种多样性将降低,而真菌的物种多样性在各地区都有小幅降低,特别是盆周山地区、川西北高山、山原峡谷区。四川省未来生物多样性分布格局未发生重大变化,植被垂直带谱明显的盆周山中段、川西北高山、山原峡谷区和川西北高原区的生物多样性较高。

表 3 物种适宜栖息地在垂直方向迁移状况

Tab.3 Migration of the species' habitats in the vertical direction

变化时段	迁移方向	发生垂直迁移的物种数量	平均迁移距离/m	迁移距离最大的物种
2000—2050 年	上升	83	426.17	蓝马鸡
	下降	45	363.44	西康玉兰
2000—2100 年	上升	77	594.71	四川湍蛙
	下降	51	441.44	大齿蟾

3.2.3 物种分布变化的海拔特征

气候变化条件下,不同海拔的物种分布变化特征明显。因此,选择当前时段为基准,使用 Arcgis 软件对两个预测时段各海拔区域(以 100 m 的海拔间隔为标准,海拔 500 ~ 5 500 m 为分析范围,其他区域面积及所选物种分布较少,故不纳入统计范畴)的物种变化数量进行统计和对比,识别各时段不同海拔的物种变化规律。由图 4 可见,随着气候变化程度加强,至 2100 年各海拔物种增加数量显著高于中期时段;当前至 2050 年,海拔 500 ~ 1 500 m 物种数量增加较多,变化较剧烈;当前至 2010 年,海拔 1 200 ~ 1 800 m 和海拔 3 300 ~ 4 500 m 物种变化的波动较大,对气候变化更为敏感。



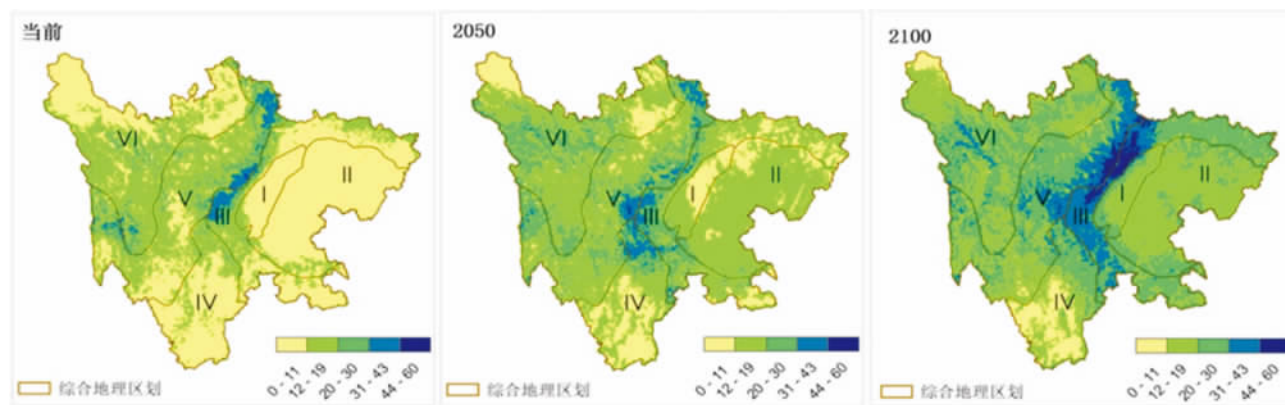


图3 物种多样性变化趋势

Fig.3 Change of species diversity

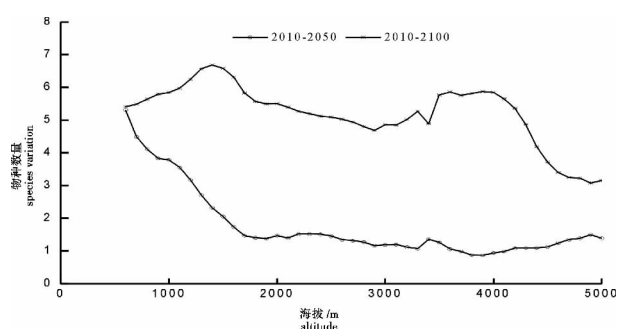


图4 不同海拔物种变化分布

Fig.4 Species variation in different altitude

## 4 讨论与结论

1) 研究结果,预测气候变化下,2010—2100年间四川省物种数量不发生显著变化,但58%物种的适宜栖息地面积将增加,42%呈减少趋势,物种间具有变化程度的差异性,珍稀濒危物种尤其值得关注。前人的研究表明,气候变化下物种数量、分布范围及潜在栖息地将发生变动<sup>[5]</sup>,适宜生境面积可能增加,也可能减少,这与物种的生态位及立地条件有关<sup>[18]</sup>。气候变化对珍稀濒危动植物的影响更为显著<sup>[19]</sup>。例如,气候变化将减少大熊猫的分布范围,扩大新的适宜分布区,但随着气候变化程度增加,其适宜生境又将缩小<sup>[20]</sup>。在当前气候变化下,未来几十年内珙桐的适宜分布面积将减少20%<sup>[21]</sup>。这些研究与本次结果相符,在区域尺度上物种数量未减少(这可能与敏感物种选择有关),但物种组成和结构可能发生改变。

2) 由于气候变化,四川大部分物种将向高纬度、高海拔移动,所占比例分别为54%和60%。同时,大多哺乳动物、两栖爬行动物和真菌类物种整体

分布范围向西北移动,多数植物的适宜分布范围向东北方向迁移,而多数鸟类和鱼类的迁移方向在不同时间段表现出不同的迁移趋势。HICKLING等<sup>[22]</sup>通过对英国329个物种分布的研究发现,受气候变化影响后,75%的物种向北迁移31~60 km,69%的物种则向高海拔方向平均迁移25 m。针对川金丝猴的研究也得到同样结论,即适宜栖息地将向更高海拔地区迁移,其面积将降低,斑块趋于破碎化<sup>[23]</sup>。

3) 从当前到2100年时段,四川省大部分区域的物种分布呈增加趋势,特别是川西高原更为明显,这表明高海拔地区可能更适合物种的生存。虽然气候变化后大部分地区的物种多样性降低<sup>[11]</sup>,但是Thuiller<sup>[24]</sup>的研究结果显示,从统计模型的参数来看,在只考虑气候变化基础上,有的区域由于更多的物种扩散过来会增加物种多样性。本研究结果产生的原因可能是:四川植被及气候类型垂直分布特征明显,物种具有较多的迁移空间或避难场所应对一定程度的气候变化;该区域地貌复杂,其他原因也会改变栖息地的分布<sup>[25-26]</sup>,如地形复杂度可能缓解气候变化带来的后果<sup>[27]</sup>;全球气候变化后,物种的分布变化及适应速度低于气候变化速率<sup>[28]</sup>,其影响可能经历100 a以上才能准确体现;MAXENT为统计模型,仅以生境相似性为依据,气候预估和敏感物种选择都有可能对预测结果产生影响。

4) 从不同海拔的物种分布规律对气候变化的响应来看,当前时段至2100年,海拔1200~1800 m和海拔3300~4500 m物种变化波动较大,可能会破坏现有的生物多样性格局与生态平衡,应该优先关注和保护。气候变化中期(2050年),较低海拔

物种多样性增加,而中高海拔变化不大,这与 Dillon<sup>[29]</sup>研究的气候变化后低纬度(海拔较低)区域的生物多样性可能增加的结论一致。随着气候变化持续,大部分物种将向高海拔迁移,但海拔 1 200 ~ 1 800 m 和海拔 3 300 ~ 4 500 m 物种变化波动较大,这可能与气候变化导致的气候类型与生态系统类型改变有关。

目前,国内外开展了大量关于气候变化下物种数量及分布的预测和分析,但评估结果具有不确定性<sup>[30]</sup>。本研究采用的 MAXENT 为统计模型,以 128 个气候敏感指示种来表征四川物种数量及分布,加之掌握的物种和环境数据有限,研究结论的准确性还有待验证,但预测的总体趋势是适用的<sup>[31]</sup>。因此,下一步的研究主要是综合地形、物种适应力、种间关系<sup>[32]</sup>等因素,提高模型预测精度,加强优先保护区和物种识别,提出相关区划方案及保护对策。

## 参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis[M]. The Fourth Assessment Report of Working Group. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007.
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告( I ): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8 [Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guanyu, et al. National assessment rePort of climate change( I ): climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research 2006, 2(1): 3-8]
- [3] Araújo MB, Pearson RG, Thuiller W, et al. Validation of species - climate impact models under climate change[J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1504-1513
- [4] Root TL, Price JT, Hall KR, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421(6918): 57-60
- [5] Walther GR, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416(6879): 389-395
- [6] Erasmus, BF, Jaarsveld AS, Chown SL, et al. Vulnerability of South African animal taxa to climate change[J]. Global Change Biology, 2002, 8(7): 679-693
- [7] 钟永德,李迈和, Norbert K. 地球暖化促进植物迁移与入侵[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 347-356 [Zhong Yongde, Li Maihe, Norbert Kraeuchi. Global warming facilitates plant migration and biological invasion[J]. Geographical Research, 2004, 23(3): 347-356]
- [8] Shafer SL, Bartlein PJ, and Thompson RS. Potential changes in the distributions of western North America tree and shrub taxa under future climate scenarios[J]. Ecosystems, 2001, 4(3): 200-215
- [9] Parmesan C and Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003, 421(6918): 37-42
- [10] 曹福祥,徐庆军,曹受金, et al. 全球变暖对物种分布的影响研究进展[J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 86-89 [Cao Fuxiang, Xu Qingjun, Cao Shoujin, et al. Advances of global warming impact on species distribution[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 28(6): 86-89]
- [11] 刘洋,张健,杨万勤. 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展[J]. 生物多样性, 2009, 17(1): 88-96 [Liu Yang, Zhang Jian, Yang Wanqin. Responses of alpine biodiversity to climate change[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(1): 88-96]
- [12] 李荔,廖成云,王撼,等. 四川省生物多样性保护现状与对策[J]. 四川林勘设计, 2009, 4: 54-57 [Li li, Liao Yunsheng, Wang Han, et al. The Biodiversity conservation present situation and the countermeasures in sichuan province[J]. Sichuan Forestry Exploration and Design, 2009, 4: 54-57]
- [13] 王娟,倪健. 植物种分布的模拟研究进展[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 1040-1053 [Wang Juan, Ni Jian. Review of modelling the distribution of plant species[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 1040-1053]
- [14] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 231-259
- [15] 曹向锋,钱国良,胡白石,等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063-3069 [Cao Xiangfeng, Qian Guoliang, Hu Baishi, et al. Prediction of potential suitable distribution area of *Flaveria bidentis* in China based on niche models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3063-3069]
- [16] Saatchi S, Buermann W, Ter Steege H, et al. Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 2000-2017
- [17] Peterson AT. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling[J]. The Quarterly Review of Biology, 2003, 78(4): 419-433
- [18] 吴建国. 气候变化对 7 种保护植物分布的潜在影响[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(4): 437-452 [Wu Jianguo. Potential effects of climate change on the distribution of seven protected plants in China[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2010, 28(4): 437-452]
- [19] 吕佳佳. 气候变化对我国主要珍稀濒危物种分布影响及其适应对策研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院: 2009. [Lv Jiajia. The impacts of climate change on the distribution of rare or endangered species in China and adaptation strategies[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2009.]
- [20] 王锐婷,范雄,刘庆, et al. 气候变化对四川大熊猫栖息地的影响[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 57-60 [Wang Ruiting, Fan Xiong, Liu Qing, et al. Impacts of climate change on giant panda habitat in Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(4): 57-60]
- [21] 张清华,阎洪. 气候变化对我国珍稀濒危树种——珙桐地理分

- 布的影响研究[J]. 林业科学, 2000, 36(2): 47–52 [Zhang Qinghua, Guo Quanshui, Xu Deying, et al. Influence of climate changes on geographical distribution of *Dalmanella involucreata*, the precious and endangered species native to China[J]. *Scientia Silviculturae Sinicae* 2000, 36(2): 47–52]
- [22] Hickling R, Roy D B, Hill J K, et al. The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 450–455
- [23] 彭红兰. 气候变化对川金丝猴栖息地的影响研究. 中国林业科学研究院, 2010. [Peng Honglan. Projected impacts of climate change on habitat of golden monkey. Chinese academy of forestry, 2010.]
- [24] Thuiller W, Lavorel S, Araújo M B, et al. Climate change threats to plant diversity in Europe [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(23): 8245–8250
- [25] Thomas, C D, Franco A M and Hill J K. Range retractions and extinction in the face of climate warming [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(8): 415–416
- [26] Forister M L, McCall A C, Sanders N J, et al. Compounded effects of climate change and habitat alteration shift patterns of butterfly diversity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(5): 2088–2092
- [27] Ackerly D D, Loarie S R, Cornwell W K, et al. The geography of climate change: implications for conservation biogeography [J]. *Diversity and Distributions*, 2010, 16(3): 476–487
- [28] Cowie, J. Climate change: biological and human aspects [M]. Cambridge University Press, 2012
- [29] Dillon M E, Wang G, Huey R B. Global metabolic impacts of recent climate warming [J]. *Nature*, 2010, 467(7316): 704–706
- [30] Wiens J A, Stralberg D, Jongsomjit D, et al. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(Supplement 2): 19729–19736
- [31] 吴军, 徐海根, 陈炼. 气候变化对物种影响研究综述 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(4): 1–6 [Wu Jun, Xu Haigen, Chen Lian. A review of impacts of climate change on species [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*. 2011, 27(4): 1–6]
- [32] Willis, K J, Bhagwat S A. Biodiversity and climate change [J]. *Science*, 2009, 326(5954): 806

## Characteristics of Distribution and Migration of Species in Sichuan Under the Climate Change

LIU Qin<sup>1 2</sup>, WANG Yukuan<sup>1 \*</sup>, PENG Peihao<sup>2</sup>, LU Yafeng<sup>1 3</sup>, CHEN Yingfeng<sup>1 3</sup>, WANG Shan<sup>1 2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources Chengdu 610041, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

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

**Abstract:** Sichuan Province of China possesses rich biodiversity and various climate types. The impacts of climate change on species distribution are of increasing concern, study on the distribution and migrating characteristics of species in Sichuan Province under the climate change can provide scientific basis for regional biodiversity conservation. In this study, according to simulate the climate change, with a medium emission scenario RCP4.5, we selected 128 representative climate sensitive species, and used the maximum entropy model to predict the variation characteristics of number and spatial distribution, and recognized the migration characteristics in the next 50 years and 100 in Sichuan Province. The results showed that: Species diversity in Sichuan will increase with migration of species, especially in Western Sichuan Plateau will change more strongly. As the suitable habitats for species changed, it is expected that the suitable habitats of about 58% of species will present an increasing trend, and others 42% will present a declining trend from 2000 to 2100. Most species in Sichuan will show horizontal and vertical migration trend with climate changes, about 54% and 60% will migrate to higher latitudes and higher elevations. The areas which from 1 200 ~ 1 800 m and 3 300 ~ 4 500 m changed more strongly should be given priority attention and protection.

**Key words:** climate change; species; suitable habitat; potential impact