

DOI: 10.5846/stxb201401200148

逯亚峰,刘艳青,王玉宽,刘媛,王爱华.未来气候变化对山地生物气候类型分布的影响——以四川省为例.生态学报,2015,35(21): - .

Lu Y F, Liu Y P, Wang Y K, Liu Y, Wang A H. Impact of climate change on bioclimatic types in a mountain area—a case from Sichuan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): - .

## 未来气候变化对山地生物气候类型分布的影响 ——以四川省为例

逯亚峰<sup>1,2</sup>, 刘艳青<sup>3</sup>, 王玉宽<sup>1,\*</sup>, 刘媛<sup>3</sup>, 王爱华<sup>3</sup>

1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 环境保护部环境保护对外合作中心, 北京 100035

**摘要:**使用生物气候分类法评估气候变化下生态系统变化的区域,对于气候变化下生态系统的保护有着重要的意义。但是现有的研究由于分析尺度较大,难以反映气候变化对于山地生态系统的影响。本文选取四川省为研究区,使用区域气候模型(RegCM4.0)对未来气候变化进行预估,在此基础上按照柯本生物气候分类法划分原则,分别对当前 1981—2010,未来 2011—2040,2031—2060 以及 2070—2099 时段四川省柯本气候类型进行识别并分析各类型的转变。结果表明(1)当前四川省分布的柯本气候类型共包括 3 个主要类型,分别为暖温带气候带(C),冷温带气候带(D),极地气候带(E),其面积分别占四川省总面积的 54%,22%和 24%。(2)在未来各时段内,四川省柯本气候类型总体分布格局并无明显变化。但是未来气候变化程度足以使得部分区域内的生物气候类型发生转变,其中最大的转变发生于 E 类型向 D 类型的转变。相比当前时段,到 2070—2099 时段 C 类型和 D 类型增加面积占当前分布面积的 13%和 20%,E 类型减少面积占当前分布面积的 48%。对比不同时段的变化速率,近期的气候变化对于生物气候类型的影响要大于远期的气候变化。(3)由于受气候变化的影响,各柯本气候类型分布的平均海拔均向高海拔区域上移,C 类,D 类和 E 类型分布平均海拔的上移速率分别为 2.9 m/a,3.4 m/a 以及 1.8 m/a。此外,经统计生物气候类型发生变化区域的海拔主要为 3800—4500 m。

**关键词:**气候变化,四川省,柯本气候分类法,海拔

## Impact of climate change on bioclimatic types in a mountain area—a case from Sichuan Province, China

Lu Yafeng<sup>1,2</sup>, Liu Yanqing<sup>3</sup>, Wang Yukuan<sup>1,\*</sup>, Liu Yuan<sup>3</sup>, Wang Aihua<sup>3</sup>

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100035, China

**Abstract:** It is important to assess the impact of climate change on ecosystems for ecological conservation. Climate - vegetation models are considered to provide an effective way of demonstrating climate change impacts. One such model, Köppen Classification, is widely used to estimate the effects of global climate change on ecosystems. However, due to climate surface resolution limitations, previous studies have not been able to completely reflect the impact of climate change on different ecosystem types in some mountain areas. Sichuan Province, which is located in the southwest of China, is sensitive to climate change because of its complex topography. In this paper, we used Köppen Classification to quantify the changes of bioclimatic types for Sichuan Province under climate change. We employed Regional Climate Model 4.0 to project

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41371539)

收稿日期:2014-01-20; 网络出版日期:2015-04-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn

monthly temperature and precipitation from 1981 to 2099. Then, the model output was calibrated by using data from 204 meteorological stations in and around Sichuan Province. Subsequently, spatial interpolation software, Anusplin 4.3.6, was used to downscale temperature and precipitation data, using elevation as an independent covariable. A 1 km x 1 km spatial resolution was selected for the climate data. Considering the uncertainty in climate change, we selected three time periods to analyze the distribution of Köppen climates, including 2010 (representing the 30-year average for 1981 - 2010), 2040 (representing the 30-year average for 2011—2040), 2060 (representing the 30-year average for 2031—2060), and 2099 (representing the 30-year average for 2070—2099). The 1981—2010 period was used as a baseline to represent “current climate.” First, we found that there were three bioclimatic types in the current period, including temperate climates (C), continental climates (D), and polar climates (E). C type, D type, and E type climates cover 54%, 22%, and 24% of the total area in Sichuan Province, respectively. Second, we found that the spatial patterns of bioclimatic types will not noticeably alter between 1981 and 2099, because neither new types nor current types appear or disappear, respectively. However, the changes in temperature were sufficient to cause shifts in bioclimatic types. Between 1981—2010 and 2070 - 2099, the areas covered by C and D types will increase by about 13% and 20%, respectively. In contrast, the relative area covered by E type during this period will decrease by about 48%. The maximum shift mainly refers to E type, while the maximum shift was observed for both E to D types. In addition, our results indicate that bioclimatic types display different rates of shifts in different time periods. For instance, the rate of change in 2011—2040 is greater than that in 2031—2060 and 2070—2099. Therefore, the response of ecosystem types to climate change in Sichuan Province is expected to be more drastic in the near future (2011—2040) compared to the distant-future (2031—2060 and 2070—2099). Third, we found that all the distribution of all types would shift in space, moving towards higher altitudes. Between 1981—2010 and 2070—2099, the shift rates along altitudinal gradients for C, D, and E types is expected to average 2.9 m per year, 3.4 m per year, and 1.8 m per year, respectively. By calculating the changed area in elevation zones of 100 m intervals, the changed area will be concentrated at an elevation range of 3800 m to 4500 m. Therefore, elevation zones should be considered for ecosystem conservation under climate change.

**Key Words:** Climate change; Sichuan Province; Köppen Classification; elevation

近一个世纪以来,气候变化已对当前生态系统的分布产生了影响。识别及分析影响区域的位置及特征,对于有针对性的制订气候变化下的生态系统保护策略有着重要的作用。

目前,已有的研究表明,使用气候—植被分类模型识别气候变化下生态系统可能发生变化的区域是一种有效的方法<sup>[1-3]</sup>。气候—植被模型主要包括了机理模型和非机理模型。机理模型虽然能够较好的将气候变化以及植被响应进行预测,但是此类模型所需数据不易获取,并且气候变化对于生态系统的影响机制尚不完全明确<sup>[4-5]</sup>。使得运用非机理性模型评价气候变化对于生态系统的影响仍然是一种有效方法<sup>[2,6]</sup>。自德国植物学家柯本建立生物气候分类法以来,生物地理学家已建立了多个非机理性的气候—植被模型,其中使用最为广泛的是柯本气候分类法<sup>[7]</sup>。已有大量研究使用此分类法从全球和区域尺度评估气候变化对于植被的影响并且取得了较好的效果<sup>[2,8-10]</sup>。对于中国区域,虽然使用柯本气候分类法评估结果较少<sup>[2]</sup>,但仍有一些运用其它气候—植被模型评估气候变化影响的研究,如张新时<sup>[6]</sup>,Chen 等<sup>[11]</sup>,岳天祥等<sup>[12]</sup>,胥晓等<sup>[13]</sup>。然而已有的研究多是基于较大尺度的分析,难以体现气候变化对于山地生态系统的影响。此外,由于山地区域往往海拔变化大,使得不同海拔区间内气候变化的程度存在明显差异,导致对不同海拔区域内生态系统的影响也并不相同。因此,分析不同海拔区间内生物气候类型的变化特征,对于系统的制订保护策略十分重要,但目前的研究并未对此进行详细分析。

随着薄盘样条气候表面插值方法的建立<sup>[14]</sup>,能够在较小尺度上获取较高精度的气候表面数据。在此基础上,通过运用柯本气候分类法,可以评估气候变化对于山地生态系统的影响。因此,本研究在区域气候模型

(RegCM4.0)对四川省未来气候变化进行预测的基础上,利用薄盘样条插值方法对气候数据进行处理。并使用柯本气候分类法评估未来气候变化对四川省生态系统的影响。同时也对气候变化下各生物气候类型变化区域的海拔特征进行分析。

## 1 研究区域

四川省位于青藏高原东缘,处于中国地势三大阶梯中的第一级和第二级,区域内高差悬殊,地势西高东低,是中国典型山地分布区。四川省独特的地理位置,使其一方面易受气候变化影响,另一方面形成了丰富的生态系统类型。因此,对气候变化下四川省生态系统分布变化的评估,可以较好的反映气候变化对于山地生态系统的影响。

## 2 方法与数据

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 柯本气候分类法

虽然有大量研究对柯本气候分类法进行了修正,但是目前使用比较广泛的分类方法是 Köppen-Geiger 分类方法(以下使用柯本分类法代表此类方法)。由于已有相关文献对柯本气候分类法进行了详细说明<sup>[1]</sup>,因此本文仅作简要描述。按柯本气候分类法分类原则,将全球植被划分为 5 个主要类型,再根据季节性降水和温度在每个主要类型中划分亚类型。具体划分时,首先根据月最低温,月最高温,月降水划分出 5 个主要类型,分别为赤道气候带(A),干燥气候带(B),暖温带气候带(C),冷温带气候带(D),极地气候带(E),再根据冬季和夏季的降水,月平均温进一步的划分亚类型。A 类型中包括的亚类型为常年湿润雨林(Af),季雨林(Am),夏干型稀树草原(As),冬干型稀树草原(Aw)。B 类型包括的亚类型为干旱型草原气候(BS),干旱型沙漠气候(BW)。C 类型包括的亚类型为冬湿夏干型暖温带气候(Cs),夏湿冬干型暖温带气候(Cw),全年常湿型暖温带气候(Cf)。D 类型包括亚类型为冬湿夏干型暖温带气候(Ds),夏湿冬干型暖温带气候(Dw),全年常湿型暖温带气候(Df)。E 类型包括亚类型为苔原气候(ET),冰原气候(EF)。其中在 C 类和 D 类中又可根据季节性温度,在每个亚类型中再划分出夏季炎热型(a),夏季温暖型(b),夏季凉爽型(c)和显著大陆型(d)。

#### 2.1.2 气候数据

本研究使用区域气候模式 RegCM4.0,单向嵌套 BCC\_CSM1.1 全球气候系统模式,在中等排放情景 rcp4.5 下,以 50 km×50 km 的尺度,模拟 1981—2099 年逐月的平均气温及降水。在此基础上使用 204 个省内外站点(包括四川省内 119 个气象站点以及周边区域 85 个气象站点)数据与模拟数据进行对比,去除预估数据的系统偏差。

在气象数据校正的基础上,使用薄盘样条插值软件 Aunsplin 4.36 进行插值。在插值时,选择插值模型以及样条次数的不同可能对插值结果产生一定影响,而本研究又需要对较长时间序列的气象数据进行插值。因此需要选取的模型既要保证表面精度又要考虑模型的稳定性,使得不同月份间可以相互比较。在进行气候表面生成前,分别选取薄盘样条以及局部薄盘样条两个插值函数,以海拔作自变量或协变量,在样条次数为 2, 3, 4, 5 次条件下进行插值。在 Anusplin 中,可通过对比不同插值函数以及不同样条次数生成的广义交叉验证(GCV)或是最大似然法(GML)值的大小确定最佳插值函数及其样条次数。通过对比,本研究选取局部薄盘模型,在样条次数为 2 次,海拔为协变量的条件下对四川省 1981—2099 年逐月平均气温和降水空间分布进行插值,插值尺度为 1 km×1 km。

根据世界气象组织(WMO)对于气候的定义,应选取至少 30 年为一个气候周期。同时,考虑到气候变化的不确定性,本研究选取 1981—2010 年,2011—2040 年,2031—2060 年和 2070—2099 年四个气候时段分别代表当前(2010),近期(2040),中期(2060)以及远期(2099)的气候时段。按照柯本气候分类法的划分原则,利用 Arcgis 软件与 Python 语言对这四个气候时段内的柯本气候类型分布进行划分。在划分时,本研究使用

一个气候时段内各月平均温度,月降水,各年最暖(冷)月温度的平均值分别代表柯本气候分类法中的月平均温度,月降水,最暖(冷)月温度。

## 2.2 数据来源

本研究所使用逐月气温与降水的站点数据来源于四川省气象局。

## 2.3 气候数据验证

为检验模拟数据与站点数据间的差异,随机选取 4 个不同海拔范围内的气象站点(见图 2),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,选取的 4 个站点中,气温的模拟值与实测值间差异较小,而降水预测值与实测值间差异明显(图 1)。由于柯本气候分类法主要是通过气温对生物气候类型进行划分。因此,使用模式输出结果是可以满足分析要求。

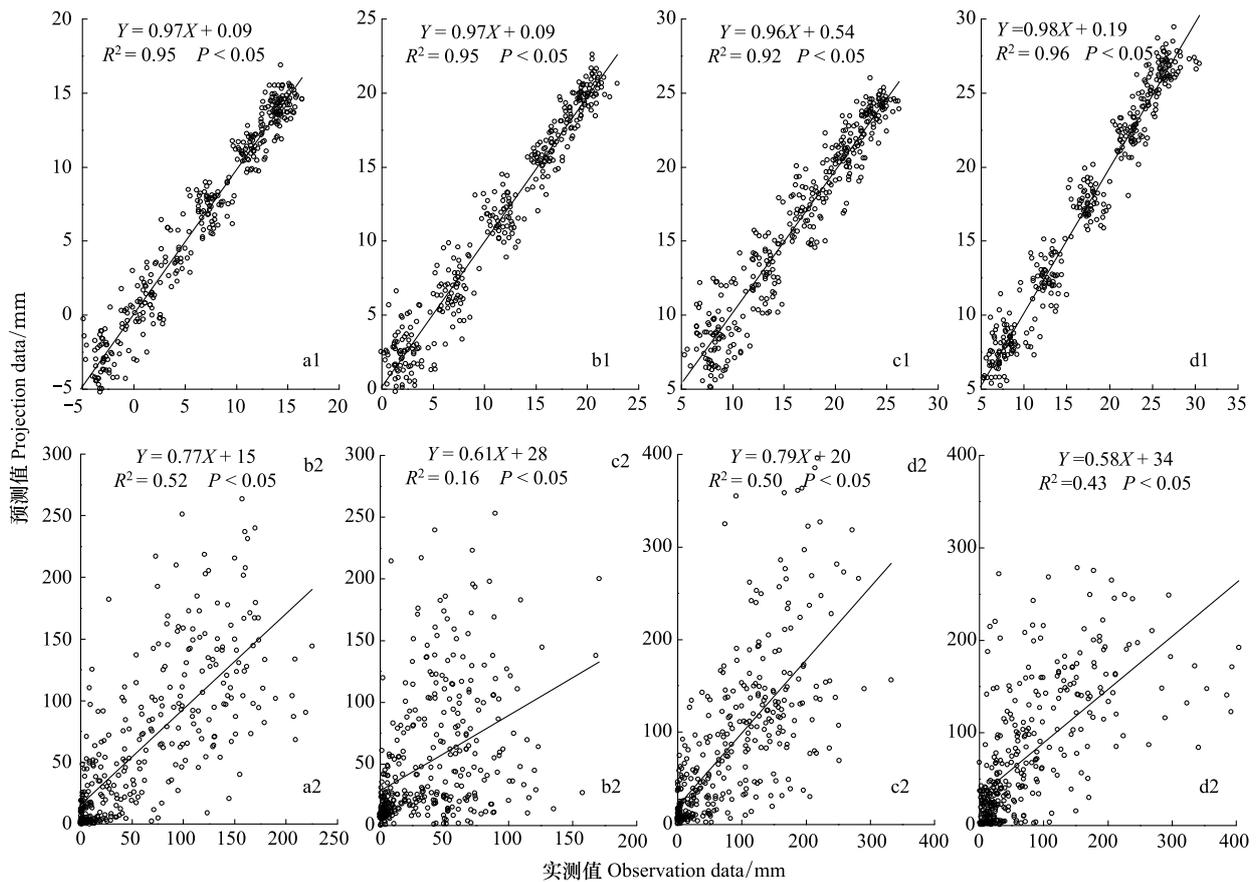


图 1 预估数据与气象站点数据对比

Fig. 1 The difference between projection data and observations data

(a, b, c, d 代表不同气象站点, 1 代表月平均气温, 2 代表月降水量)

如图 2 所示,使用薄盘样条插值方法将站点数据插值到  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  尺度是可以较好的反映地形对于区域气候的影响。为了验证插值结果与站点数值差异是否显著,本文以  $100 \text{ m}$  的海拔间隔为标准,按照海拔梯度将四川省划分为 55 个区域,其中第 55 个区域代表海拔  $5500 \text{ m}$  及以上的区域。选取 1981—2010 时段,分别对插值生成的气候表面数据以及预估的气象站点数据在各海拔区间内的月平均温度进行统计,并进行回归分析。由于并不是所有海拔区间均有气象站点分布,因此本研究仅选取有站点分布的海拔区间进行分析。分析结果表明,在选取的时段内气候表面数据与站点的预估数据有较好的一致性(图 3)。

## 3 结果

### 3.1 四川省柯本气候类型分布

运用柯本气候分类法对四川省生物气候类型分布的识别结果表明,在当前 2010 时段,四川省共包括 3 个柯本气候类型(C 类,D 类和 E 类)和 11 个气候亚类型(图 4-a)。各类型及亚类型详见图 4 的图例。在当前时段内,分布面积最大的类型为 C 类型,其分布面积占四川省总面积的 54%,分布面积最小的是 D 类型,其分布面积占四川省总面积的 22%。亚类型中分布面积最大的是 ET 类型,分布面积占四川省总面积的 24%。根据各生物气候类型分布的空间特征,从东到西的类型分别为 C 类,D 类和 E 类。相比川东平原及丘陵地区,川西高原的生物气候类型空间异质性明显较高。

由于柯本气候分类法缺少亚热带生态系统的分类,一般认为 C 类型反映了亚热带和暖温带两个植被类型。在识别出的四川省柯本气候类型中 C 类型,D 类型和 E 类型分别对应亚热带针阔混交林生态系统,寒温带针叶林生态系统以及高山草甸生态系统。因此,本研究的识别结果与四川省实际的生态系统类型的分布基本相符。并且,使用 1 km×1 km 的尺度进行分析,也是能够反映较小区域内地形对于植被分布的影响。

### 3.2 气候变化下柯本气候类型的转变

在气候变化情景下,四川省柯本气候类型空间分布特征无明显变化(图 4-b, c, d)。相比当前 2010 时段,在未来 2040,2060 以及 2099 时段面积增加的气候类型为 C 类型和 D 类型,至 2099 时段这两个类型增加面积占当前分布面积的 13%和 20%。面积减少的类型为 E 类,至 2070—2099 时段 E 类型减少面积占当前分布面积的 48%。为准确的反映气候变化情景下不同生物气候类型的相互转变,本研究使用转移矩阵方法对不同时段生物气候类型间的转变进行统计,结果见表 1—表 3。表中各行代表某个类型向其它类型转出的面积,各列代表其它类型向某类型转入的面积。表 1—表 3 的结果表明,在气候变化情景下,除了 ET 亚类,其它亚类型间

均有转出和转入,而 ET 亚类仅有转出。在各柯本气候类型的转变中,最大的转变是由 E 类型向 D 类型转变,到 2099 时段,有 55220 km<sup>2</sup>的 E 类型转变为了 D 类型。对比未来不同时段的变化速率表明,近期时段的气候变化造成的气候类型的转变速率要高于中期和远期时段的气候变化。

### 3.3 生物气候类型变化区域的海拔特征

为识别气候变化下各生物气候类型变化区域的海拔特征。本研究以当前时段为基准,分别与未来 3 个时段进行对比,识别出各时段内生物气候类型变化区域的空间分布。同时,以 100 m 的海拔间隔为标准,使用 Arcgis 软件对各海拔区域内柯本气候类型的变化面积进行统计。由于降水数据存在较大的不确定性,因此本文仅统计由温度产生的变化。结果表明,从海拔 900—4900 m 区域内均有柯本气候类型的转变,但是相比低海拔区域,高海拔区域的转变面积明显更多(图 5)。根据各类型的空间分布,在高海拔区域(川西地区)的转

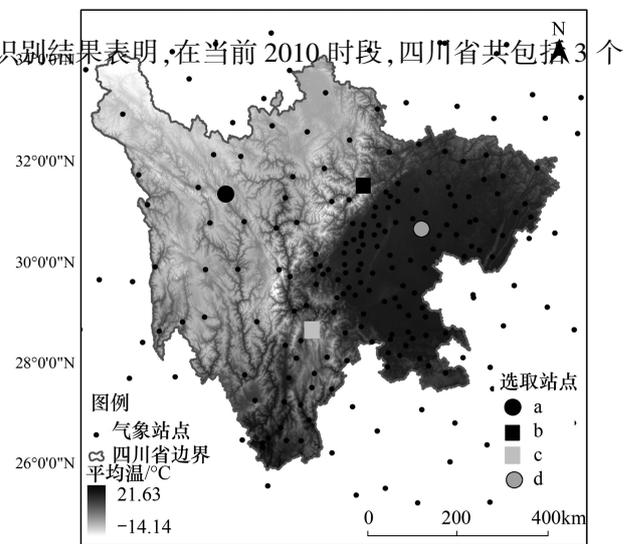


图 2 四川省 1981—2010 年月平均气温空间分布图(1 km×1 km)

Fig. 2 The mean temperature with 1 km spatial resolution in 1981—2010 period

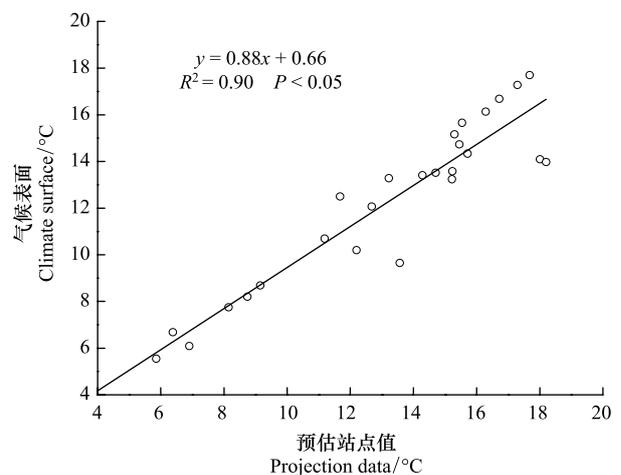


图 3 1981—2010 时段气候表面平均温度与预估站点数据平均温度对比

Fig. 3 Difference between projection temperature data and climate surface data

变主要是由 E 类型向 D 类型转变,其中发生转变的主要海拔范围是 3800—4500 m,转变面积最多的海拔区域是 4200—4300 m。在低海拔区域主要是由 D 类型向 C 类型转变,以及 C 类型中各亚类型相互转变,其中发生转变的主要海拔范围是 1200—2000 m,转变面积最多的海拔区域是 1300—1400 m。对比未来不同的时段,随时间增加各海拔区域内生物气候类型转变的面积逐渐增大。

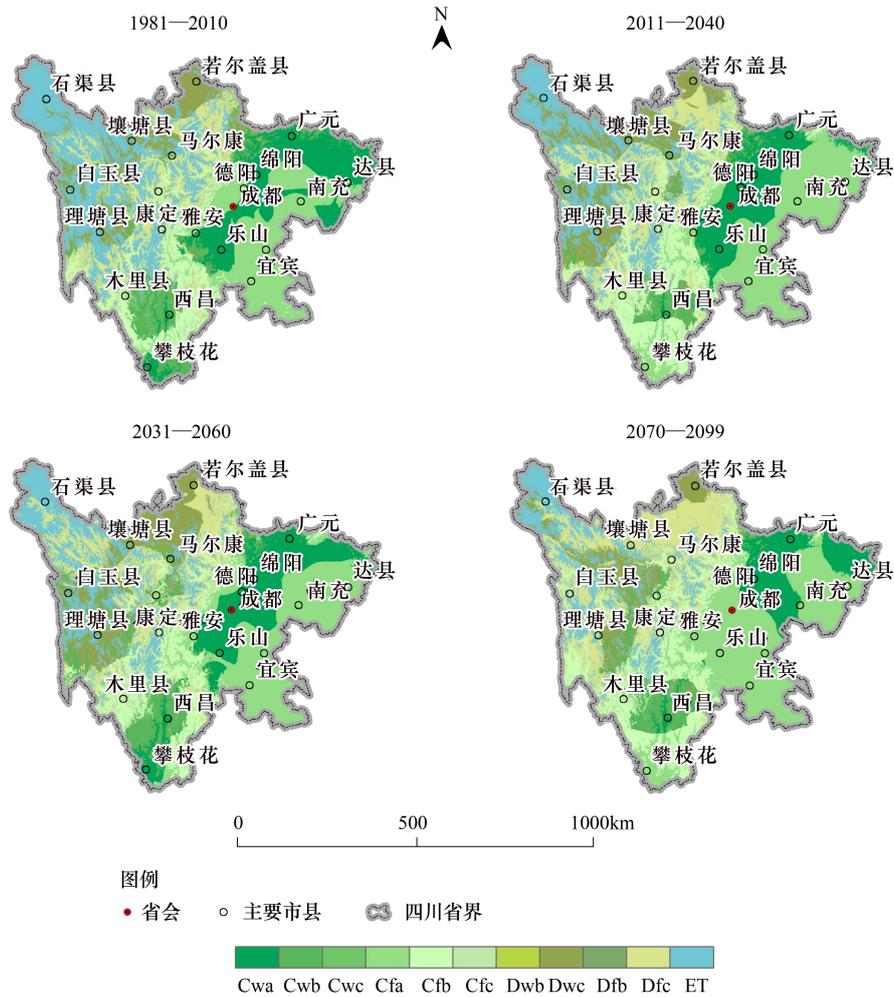


图 4 气候变化情景下四川省柯本气候区分布变化(a,b,c,d)

Fig. 4 The distributions of Köppen climates in Sichuan Province under climate change

表 1 2040 vs. 2010 柯本气候亚类型转移矩阵/(km<sup>2</sup>)

Table 1 The transfer matrixes for climates between the period of 2040 and that of 2010 (km<sup>2</sup>)

| 亚类 Subtype | Cwa   | Cwb  | Cwc | Cfa   | Cfb   | Cfc  | Dwb | Dwc   | Dfb  | Dfc   | ET |
|------------|-------|------|-----|-------|-------|------|-----|-------|------|-------|----|
| Cwa        |       |      |     | 32791 |       |      |     |       |      |       |    |
| Cwb        | 1995  |      |     | 2312  | 16999 |      |     |       |      |       |    |
| Cwc        |       | 946  |     |       | 1442  | 1257 |     |       |      |       |    |
| Cfa        | 17542 |      |     |       |       |      |     |       |      |       |    |
| Cfb        | 212   | 6505 |     | 2730  |       |      |     |       |      |       |    |
| Cfc        |       | 1342 | 389 |       | 4092  |      |     |       |      |       |    |
| Dwb        |       | 967  |     |       | 532   |      |     |       | 61   |       |    |
| Dwc        |       | 638  | 564 |       | 521   | 552  | 638 |       | 544  | 14028 |    |
| Dfb        |       | 294  |     |       | 1299  |      | 61  |       |      |       |    |
| Dfc        |       | 318  | 399 |       | 2436  | 1790 | 386 | 12842 | 1692 |       |    |

续表

| 亚类 Subtype | Cwa | Cwb | Cwc | Cfa | Cfb | Cfc | Dwb | Dwc   | Dfb | Dfc   | ET |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-------|----|
| ET         |     |     | 33  |     |     | 5   |     | 15295 |     | 14708 |    |

表 2 2060 vs. 2010 柯本气候亚类型转移矩阵/ (km<sup>2</sup>)Table 2 The transfer matrixes for climates between the period of 2060 and that of 2010 (km<sup>2</sup>)

| 亚类 subtype | Cwa   | Cwb   | Cwc  | Cfa   | Cfb  | Cfc  | Dwb | Dwc   | Dfb  | Dfc   | ET |
|------------|-------|-------|------|-------|------|------|-----|-------|------|-------|----|
| Cwa        |       |       |      | 23850 |      |      |     |       |      |       |    |
| Cwb        | 4389  |       |      | 2744  | 9876 |      |     |       |      |       |    |
| Cwc        |       | 1829  |      |       | 1000 | 1057 |     |       |      |       |    |
| Cfa        | 19200 |       |      |       |      |      |     |       |      |       |    |
| Cfb        | 1207  | 10924 |      | 3756  |      |      |     |       |      |       |    |
| Cfc        |       | 1620  | 168  |       | 4772 |      |     |       |      |       |    |
| Dwb        |       | 1057  |      |       | 549  |      |     |       | 46   |       |    |
| Dwc        |       | 2481  | 2274 |       | 589  | 750  | 713 |       | 488  | 11199 |    |
| Dfb        |       | 263   |      |       | 1481 |      |     |       |      |       |    |
| Dfc        |       | 1682  | 1242 |       | 4854 | 4887 | 131 | 12841 | 1067 |       |    |
| ET         |       |       | 131  |       |      | 312  |     | 16495 |      | 23375 |    |

表 3 2099 vs. 2010 柯本气候亚类型转移矩阵/ (km<sup>2</sup>)Table 3 The transfer matrixes for climates between the period of 2099 and that of 2010 (km<sup>2</sup>)

| 亚类 subtype | Cwa   | Cwb  | Cwc | Cfa   | Cfb   | Cfc  | Dwb | Dwc   | Dfb | Dfc   | ET |
|------------|-------|------|-----|-------|-------|------|-----|-------|-----|-------|----|
| Cwa        |       |      |     | 41074 |       |      |     |       |     |       |    |
| Cwb        | 4922  |      |     | 4980  | 12879 |      |     |       |     |       |    |
| Cwc        |       | 2670 |     |       | 1229  | 348  |     |       |     |       |    |
| Cfa        | 12029 |      |     |       |       |      |     |       |     |       |    |
| Cfb        | 416   | 5788 |     | 6864  |       |      |     |       |     |       |    |
| Cfc        |       | 1726 | 25  |       | 5394  |      |     |       |     |       |    |
| Dwb        |       | 757  |     |       | 897   |      |     |       | 3   |       |    |
| Dwc        |       | 2376 | 766 |       | 4324  | 1855 | 770 |       | 878 | 18633 |    |
| Dfb        |       | 104  |     |       | 1655  |      |     |       |     |       |    |
| Dfc        |       | 3271 | 589 |       | 11563 | 5176 | 496 | 7054  | 949 |       |    |
| ET         |       |      | 287 |       |       | 803  |     | 14160 |     | 41060 |    |

此外,随着气候变化下各生物气候类型的相互转换,使得各类型分布海拔发生变化。为反映不同类型的海拔变化,分别对未来不同时段各类型分布的平均海拔进行统计,并与当前时段进行比较。结果表明 C 类、D 类和 E 类分布平均海拔分别上升 258 m、307 m 和 157 m,平均上移速率分别为 2.9 m/a、3.4 m/a 以及 1.8 m/a。

## 4 讨论

### 4.1 气候变化下四川省生物气候类型变化趋势

相比中国其它区域的评估结果<sup>[11-12]</sup>,本研究中并未出现新增加的生物气候类型,也没有将消失的生物气候类型。但是,在本研究的气候情景下,未来气候变化的程度足以使得四川省的生物气候类型发生转变,并且转变的主要趋势为由温度低的类型向温度高的类型转变。对于生物气候类型转变的区域,川西高原发生转变的面积明显多于川东丘陵和平原地区。通常高海拔区域的升温程度要高于低海拔区域。因此,分布于高海拔的 E 类型相比其它类型对气候变化更敏感,发生转换的面积也更多。本研究中,生物气候类型的转变主要集

中于 E 类型向 D 类型的转变,这一转变趋势与大多数选取中国区域研究气候变化对生物气候类型影响的结果相一致<sup>[11,15]</sup>。但是,相比其它区域,未来四川省柯本气候 E 类型向 D 类型转变速率相对较低<sup>[16]</sup>。根据 RUBEL 等提供的使用 RegCM 3.0 模型对不同排放情景下柯本气候类型的分布数据进行分析<sup>[3]</sup>,至 2076—2100 年四川省 E 类气候区分布面积相比 1976—2000 年,在最高的排放情景下可能减少 91%,在最低的排放情景下可能减少 66%,高于本研究中 E 类型减少 48% 的结果。形成差异的原因可能是由于(1)本研究使用了更小尺度的气候插值方法。(2)使用气候预测模型 RegCM 4.0 与其它研究使用 RegCM 3.0 模型对气候预测存在差异。由于本研究使用气候情景为中等排放情景,E 类气候区的变化应在 66%—91% 范围内。因此,更小尺度的分析是决定气候类型转变的程度的最主要因素。而根据气候变化对川西高原地区雪线以及四川省周边地区树线影响的研究结果表明,过去的气候变化已使得这些区域的雪线,树线向高海拔迁移,但并未对此区域内当前生态系统格局产出明显影响<sup>[17-19]</sup>。雪线和树线的上移在一定程度上可以反映 E 类型向 D 类型的转变。因此,选择较高精度的气候插值方法分析气候类型的转变结果可能与实际更相符合。由于降水模拟的结果较差,本文不对降水产生的生物气候类型的转变进行讨论。

#### 4.2 生物气候类型变化区域的海拔特征分析

气候变化下,四川省所有生物气候类型都向高海拔区域迁移。迁移速率由大到小的顺序为 D 类>C 类>E 类。对比 Lenoir 等通过选取 171 个物种在海拔 0—2600m 范围内研究气候变化下物种的迁移结果表明,本研究中分布于相似海拔的 C 类型的迁移速率与 Lenoir 的研究结果基本一致<sup>[20]</sup>。此外,对于气候变化影响比较严重的海拔区域,主要是集中于 1200—2000m 和 3800—4500m 区域内。这两个海拔区域内的变化,分别占未来三个时段全部变化的 62%,63% 和 65%。但是不同于低海拔区域以亚类型转变为主,高海拔区域的转变主要为类型的转变。因此,对于生态系统的保护,首先是要排除这些可能受气候变化影响比较严重的区域。然而,若是这些区域内存在重要的物种,则需要对这些区域制订更为严格的保护措施,减少其它干扰因素。因为生态系统的变化是由多个因素共同决定的,虽然气候变化是不可阻止的,但减少其它干扰因素也能在一定程度上维护生态系统的稳定。根据本文的分析结果,在气候变化下对四川省的生态系统进行保护,需针对不同的海拔区域制订相应策略。同时,对近期气候变化造成的影响需要更多的关注。

## 5 结论

通过对未来气候变化情景下四川省柯本气候类型分布变化的分析,可以得出以下结论。

1、在未来气候变化下,四川省柯本气候类型分布格局虽无明显变化,但是未来气候变化的升温程度足以使得四川省柯本气候类型发生变化。在气候变化下,C 类型和 D 类型分布面积增加,E 类型分布面积减少。并且在近期气候变化下各类型转变的速率要高于远期的气候变化。通过与大尺度研究结果对比,在本研究所选取的尺度下生物气候类型变化速率与实际更相符合。

2、在未来气候变化下,高海拔区域受气候变化影响明显高于低海拔区域,其中变化主要集中于海拔 3800—4500 m 的范围内。同时,从近期到远期的气候变化,所有生物气候类型分布海拔均呈现上升趋势。相比 1981—2010,到 2070—2099 年 C 类,D 类和 E 类型平均分布海拔向高海拔区域上移的速率分别为 2.9 m/a, 3.4 m/a 以及 1.8 m/a。因此,使用柯本分类法,是可以在一定程度上反映气候变化下的生态系统类型的垂直

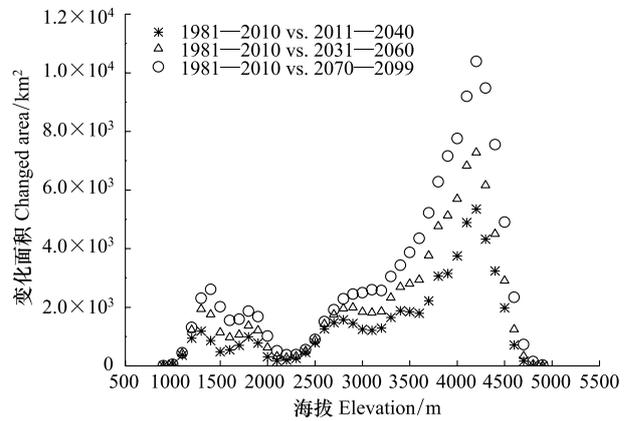


图5 不同时段柯本气候类型变化面积随海拔分布特征  
Fig. 5 The changed area for different time periods in elevation zones of 100m interval

迁移。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3): 259-264.
- [ 2 ] Baker B, Diaz H, Hargrove W, Hoffman F. Use of the Köppen - Trewartha climate classification to evaluate climatic refugia in statistically derived ecoregions for the People's Republic of China. *Climatic Change*, 2010, 98(1-2): 113-131.
- [ 3 ] Rubel F, Kottek M. Observed and projected climate shifts 1901—2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, 19(2): 135-141.
- [ 4 ] Hallgren W S, Pitman A J. The uncertainty in simulations by a Global Biome Model (BIOME3) to alternative parameter values. *Global Change Biology*, 2000, 6(5): 483-495.
- [ 5 ] Hurtt G C, Moorcroft P R, Pacala S W, Levin S A. Terrestrial models and global change: challenges for the future. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 581-590.
- [ 6 ] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. *第四纪研究*, 1993, 13(2): 157-169.
- [ 7 ] Köppen W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*, 1900, 6(11): 593-611.
- [ 8 ] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2007, 4(2): 439-473.
- [ 9 ] De Castro M, Gallardo C, Jylha K, Tuomenvirta H. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 329-341.
- [ 10 ] Peñuelas J, Boada M. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 131-140.
- [ 11 ] Chen X W, Zhang X S, Li B L. The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and Planetary Change*, 2003, 38(3-4): 327-337.
- [ 12 ] Yue T X, Fan Z M, Liu J Y. Changes of major terrestrial ecosystems in China since 1960. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(4): 287-302.
- [ 13 ] 胥晓, 苏智先, 杨奠安. 未来气候变化对四川盆地生命地带的影响模拟. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 192-196.
- [ 14 ] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, Jones P G, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [ 15 ] Ni J, Sykes M T, Prentice I C, Cramer W. Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3. *Global Ecology and Biogeography*, 2000, 9(6): 463-479.
- [ 16 ] Diaz H F, Eischeid J K. Disappearing "alpine tundra" Köppen climatic type in the western United States. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18), doi: 10.1029/2007GL031253.
- [ 17 ] Gou X H, Zhang F, Deng Y, Ettl G J, Yang M X, Gao L L, Fang K Y. Patterns and dynamics of tree-line response to climate change in the eastern Qilian Mountains, northwestern China. *Dendrochronologia*, 2012, 30(2): 121-126.
- [ 18 ] Li Z X, He Y Q, Yang X M, Theakstone W H, Jia W X, Pu T, Liu Q, He X Z, Song B, Zhang N N, Wang S J, Du J K. Changes of the Hailuoguo glacier, Mt. Gongga, China, against the background of climate change during the Holocene. *Quaternary International*, 2010, 218(1-2): 166-175.
- [ 19 ] Kramer A, Herzsuh U, Mischke S, Zhang C J. Holocene treeline shifts and monsoon variability in the Hengduan Mountains (southeastern Tibetan Plateau), implications from palynological investigations. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2010, 286(1-2): 23-41.
- [ 20 ] Lenoir J, Gegout J, Marquet P A, De Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, 320(5884): 1768-1771.