

4 个常用的气候-植被分类模型对中国植被分布模拟的比较研究

杨正宇 周广胜* 杨奠安

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要 应用 KAPPA 一致性检验方法, 比较研究了 4 个常用的气候-植被分类模型: Penman 模型、Holdridge 生命地带系统、Kira 模型和 Thornthwaite 模型对中国植被分布模拟的一致性和适用性。结果表明: 这 4 个常用的气候-植被分类模型对中国植被区划一级分类的植被地理分布模拟效果较好。其中, Holdridge 生命地带系统的 KAPPA 值达到 0.57, 模拟效果优于其它三者。但对特定地区, 如青藏高原的植被地理分布, 所有模型均需改进或引入新的影响因素才能较好地模拟二级植被区划的植被地理分布。1) Penman 模型对温带草原和青藏高原的植被地理分布模拟的 KAPPA 值超过 0.50, 是 4 个模型中对青藏高原植被地理分布模拟效果最好的。2) Thornthwaite 模型对热带雨林、季雨林植被地理分布模拟的 KAPPA 值达到 0.40, 可以弥补 Holdridge 生命地带系统对热带植被地理分布模拟精度的不足。3) Holdridge 生命地带系统对中国植被地理分布模拟的效果最佳, 但对西部季雨林、雨林区域(52)、西部草原亚区域(63)、青藏高原温性荒漠地带(86)和温性草原地带(84)的模拟程度不理想。4) Kira 模型对亚热带常绿阔叶林植被地理分布的模拟效果可与 Holdridge 生命地带系统相媲美; 对低海拔和湿润、半湿润地区植被地理分布的模拟效果尚可, 但在温带荒漠区与青藏高原区植被地理分布的模拟效果与实际相差较远。

关键词 KAPPA 模型 植被区划 全球变化 气候-植被关系模型

COMPARISON OF SIMULATED VEGETATION DISTRIBUTION IN CHINA PRODUCED BY FOUR POPULAR CLIMATE-VEGETATION CLASSIFICATION MODELS

YANG Zheng-Yu ZHOU Guang-Sheng* and YANG Dian-An

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract The effectiveness and accordance of four popular climate-vegetation classification models (Penman model, Thornthwaite model, Holdridge Life Zone System and Kira model) for the geographic distribution of Chinese vegetation is compared using the KAPPA agreement statistic method. The results indicate that those four classification models work well in the first level of Chinese Vegetation Division. The KAPPA value of the Holdridge Life Zone System (0.57) is the largest among the four models. It showed that it is the best one among four models in simulating the geographical distribution of Chinese vegetation. However, regarding some specific regions, for example, the Tibetan plateau, all of the models need to be refined or to take new affecting factors into account in order to obtain a better simulation of the geographic distribution of vegetation. 1) The Penman model could simulate the geographic distribution of vegetation in temperate steppe and Tibetan plateau with a KAPPA value greater than 0.50. It is the best one for Tibetan plateau among the four models. 2) The Thornthwaite model could give the best simulation for tropical rain forests and seasonal rain forests with KAPPA value of 0.40. It might compensate for the ineffectiveness of the Holdridge Life Zone System in this area. 3) The Holdridge Life Zone System is the best one among the four models for simulating the geographical distribution of vegetation in China based on the first level of vegetation division in China, but it still fails to simulate west seasonal rain forests and rain forests (52), west temperate steppe (63), Tibetan plateau temperate desert (86) and Tibetan plateau temperate steppe (84). 4) The Kira model simulates the subtropical evergreen forest zone very well, and its KAPPA value in this zone is close to that of the Holdridge Life Zone System. Also it could simulate moderately well the geographical distribution of vegetation in low elevation and humid/semi-humid area, but it was far from the ground truth when applied to the regions of temperate desert and Tibetan Plateau.

收稿日期: 2002-05-27 接受日期: 2003-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(49905005, 30028001, 40231018)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999043407)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-12, KSCX₂-1-07)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhous@public2.bta.net.cn

This research also implies that it is urgent to develop better climate-vegetation classification model in order to provide better input to the general circulation models (GCMs) with the geographic distribution of vegetation and to accurately evaluate the possible effects of climate change on vegetation.

Key words KAPPA model, Vegetation division, Global change, Climate-vegetation classification model

植被地理分布与气候关系的研究直接关系到气候预测的准确性以及预测和评估全球气候变化对陆地生态系统影响的准确性。植被与气候之间的相互作用主要表现在两个方面:植被对气候的适应性及植被对气候的反馈作用。植物生态学的观点认为主要的植被类型反映了植物界对于主要气候类型的适应,每个气候类型或分区都有一套相应的植被类型。另一方面,不同的植被类型通过影响植被与大气之间的物质(如水和二氧化碳等)和能量(如太阳辐射、动量和热量等)交换来影响气候,改变的气候又通过大气与植被之间的物质和能量的交换作用对植被的生长产生影响,最终可能导致植被类型的变化(Zhou & Wang, 2000)。植被地理分布作为预测气候变化大气环流模式的重要下垫面参数必将影响到气候预测及其影响评估的准确性。当前,以“气候变暖”为突出标志的全球环境变化及其可能对生态系统产生的严重影响,已经引起了科学家、各国政府与社会各界的极大关注(Wood, 1988; Houghton *et al.*, 1990; Rosenzweig & Parry, 1994)。准确地预测气候变化以及未来气候变化对生态系统的可能影响已经成为“国际地圈-生物圈计划(ICBP: International Geosphere-Biosphere Programme)”的主要研究目标。这一目标的实现取决于气候预测的准确性和气候与植被关系模式的建立。正因为如此,植被地理分布的研究一直受到植物学、生态学、气候学和地理学等方面学者的高度重视(周广胜, 1993)。

关于植被地理分布与气候关系的研究已有近 200 年的历史(周广胜, 1993)。自 20 世纪初 Köppen (1920)首次提出世界气候分类系统以来,植被-气候关系的定量研究取得了巨大进展,主要可分为 3 个阶段(Zhou & Wang, 2000): 1) 以现实自然植被类型与气候之间的相关性为特征的阶段。这一阶段还没有将对植物生理活动具有明显限制作用的气候因子作为植被分类的指标,是非机理性的,代表性模型主要有: Holdridge 生命地带系统(Holdridge, 1947)和 Box 模型(Box, 1981)。2) 以对植物生理活动具有明显限制作用的气候因子作为气候-植被分类指标的阶段,代表性模型有: DOLY 模型(Woodward, 1987)、MAPSS 模型(Neilson *et al.*, 1992)和 BIOME2 模型(Prentice, 1990)。这类模型又称为生物地理模型

(Biogeography model), 主要描述了植被的结构特征, 如叶面积指数等, 不足的是这类模型关于植被类型与气候之间相互关系的描述是静态的, 即植被与气候处于平衡状态, 也没有反映植被的结构与功能的综合作用。3) 以综合反映植被的结构和功能为特征的气候-植被分类研究阶段。目前, 国际上已经有一些模型(Cramer *et al.*, 2001), 如 BIOME3 模型(Haxel-tine & Prentice, 1996)和 IBIS 模型(Integrated Biosphere Simulator)(Foley *et al.*, 1996)开始将植被的类型与植被的结构与功能有机地联系起来, 但仍处于发展阶段。

我国关于气候-植被分类的研究与国际研究水平相比有很大差距。张新时等(1989a; 1989b; 1993)、张新时(1993)、Fang 和 Yoda (1989; 1990a; 1990b; 1991)、Fang (1994)与刘春迎(1999)将 Penman 方法、Thornthwaite 模型、Kira 模型和 Holdridge 生命地带系统等国际通用的气候-植被分类模型引进中国, 对中国植被分类进行了模拟研究。张新时(1993)根据中国植被的实际分布情况对 Holdridge 生命地带系统的暖温带与亚热带的界线和雪线界线进行了修正, 建立了修正的 Holdridge 生命地带系统, 倪健(2002)亦将 Biome 模型应用于中国植被分类研究。尽管如此, 由于中国气候和植被分布的特殊性, 中国的气候-植被分类还不能为 Holdridge 生命地带系统所反映, 而且该系统还存在利用局部潜在蒸散进行区域尺度的气候-植被分类的缺陷, 为此周广胜等(1996a; 1996b)提出了基于区域潜在蒸散进行气候-植被分类的观点, 并给出了热量和水分划分的指标: 区域热量指数(RTI)和区域湿润指数(RMI), 初步定量地研究了中国的气候-植被分类及其对气候变化的响应。但是, 这些气候-植被分类模型(如 Penman 方法, Thornthwaite 模型, Kira 模型和 Holdridge 生命地带系统)对中国植被地理分布模拟的准确性如何还没有进行过比较研究, 因而亦无法确定这些模型对于中国植被地理分布模拟的优劣, 直接影响到基于这些模型对中国植被对气候变化响应的预测, 从而限制了中国气候-植被分类研究及其对于气候变化响应预测评估的准确性。

针对 4 个常用的气候-植被分类模型: Penman 方法、Thornthwaite 模型、Kira 模型和 Holdridge 生命地

带系统,基于中国的气候和植被区划资料,利用 KAPPA 一致性检验方法,本文将比较其在中国应用的一致性和适用性,为研究中国植被与气候的关系及评估全球气候变化的影响提供依据。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

研究资料包括:等角圆锥投影的数字化 1:1 400 万植被区划图,全国 957 个气象观测台站 1950 ~ 1980 年 30 年的月均气候资料。气候资料具体包括:气象站海拔高度、经度、纬度、1 ~ 12 月均温、1 ~ 12 月降水、1 ~ 12 月日照时数、1 ~ 12 月日照百分率、1 ~ 12 月风速、1 ~ 12 月蒸发散、1 ~ 12 月的月最低温度、1 ~ 12 月的月最高温度、30 年年均温度、30 年年

均降水、30 年年均风速及 30 年年均日照时数。

4 个常用的气候-植被分类模型的中国植被地理分布指标系统:Penman 中国植被地理分布指标系统(张新时等,1989a)、Thornthwaite 中国植被地理分布指标系统(张新时等,1989b)、Kira 中国植被地理分布指标系统(刘春迎,1999)和 Holdridge 中国植被地理分布指标系统(张新时,1993)。

1.2 植被地理分布

植被地理分布采用张新时等(1989a)的分类系统,如表 1 所示。表 1 中的植被类型代码的十位数代表一级植被区划,个位数代表二级植被区划。

1.3 气候-植被分类模型

本研究主要比较 4 个常用的气候-植被分类模型:Penman 模型(张新时等,1989a)、Holdridge 生命地

表 1 中国植被区划类型(张新时,1989a)
Table 1 Division types of Chinese vegetation (Chang *et al.*, 1989a)

| 类型编号 Type code | 类型代码 Digital code | 类型名称 Vegetation zones |
|--------------------|----------------------|--|
| I | 11 | 寒温带针叶林 Cold-temperate coniferous forest zone |
| II _{ia} | 21 | 温带针阔叶混交林地带北部亚地带 Northern subzone of temperate mixed coniferous-broadleaved forest zone |
| II _{ib} | 22 | 温带针阔叶混交林地带南部亚地带 Southern subzone of temperate mixed coniferous-broadleaved forest zone |
| III _{ia} | 31 | 暖温带落叶阔叶林地带北部亚地带 Northern subzone of warm-temperate deciduous broadleaved forest zone |
| III _{ib} | 32 | 暖温带落叶阔叶林地带南部亚地带 Southern subzone of warm-temperate deciduous broadleaved forest zone |
| IV _{Ai} | 41 | 亚热带常绿、落叶阔叶混交林地带北部亚地带 Northern subzone of subtropic evergreen and deciduous broadleaved forest zone |
| IV _{Aiia} | 42 | 亚热带常绿阔叶林地带中北部亚地带 Mid-northern subzone of subtropic monsoon evergreen broadleaved forest zone |
| IV _{Aiib} | 43 | 亚热带常绿阔叶林地带中南部亚地带 Mid-southern subzone of subtropic evergreen broadleaved forest zone |
| IV _{Aiii} | 44 | 亚热带季风常绿阔叶林地带南部亚地带 Southern subzone of subtropic monsoon evergreen broadleaved forest zone |
| IV _{Bi} | 45 | 亚热带常绿阔叶林地带中西部亚地带 Mid-western subzone of subtropic evergreen broadleaved forest zone |
| IV _{Bii} | 46 | 亚热带常绿阔叶林地带西南部亚地带 South-western subzone of subtropic evergreen broadleaved forest zone |
| V _A | 51 | 热带季雨林、雨林地带东部亚地带 Eastern subzone of tropic rain-forest and monsoon forest zone |
| V _B | 52 | 热带季雨林、雨林地带西部亚地带 Western subzone of tropic rain-forest and monsoon forest zone |
| VI _{ia} | 61 | 温带草原地带北部亚地带 Northern subzone of temperate steppe zone |
| VI _{Aib} | 62 | 温带草原地带南部亚地带 Southern subzone of temperate steppe zone |
| VI _B | 63 | 温带草原地带西部亚地带 Western subzone of temperate steppe zone |
| VII _A | 71 | 温带荒漠地带西部亚地带 Western subzone of temperate desert zone |
| VII _B | 72 | 温带荒漠地带东部亚地带 Eastern subzone of temperate desert zone |
| VII _C | 73 | 极端荒漠地带 Extremely desert zone |
| VIII _A | 81 | 青藏高原地区东南部亚地带 South-eastern subzone of Tibetan plateau district |
| VIII _B | 82 | 青藏高原地区东部亚地带 Eastern subzone of Tibetan plateau district |
| VIII _{Gi} | 83 | 青藏高原地区高寒草原亚地带 Alpine steppe subzone of Tibetan plateau district |
| VIII _{Gi} | 84 | 青藏高原地区温性草原亚地带 Temperate steppe subzone of Tibetan plateau district |
| VIII _{Di} | 85 | 青藏高原地区高寒荒漠亚地带 Alpine desert subzone of Tibetan plateau district |
| VIII _{Di} | 86 | 青藏高原地区温性草原亚地带 Temperate steppe subzone of Tibetan plateau district |

带分类系统(张新时等, 1993)、Kira 模型(刘春迎, 1999)和 Thornthwaite 模型(张新时等, 1989b)对于中国植被地理分布模拟的一致性与适用性。

1.4 KAPPA 检验

采用 KAPPA 一致性统计检验方法比较 4 个常用的气候-植被分类模型对于中国植被地理分布的模拟效果。KAPPA 一致性统计检验方法是用于评价测量目标影像与参照影像一致性的方法(Pren-
tice, 1990)。该方法的意义在于忽略了“偶发的精确”, 其计算出的误差可以看作是在对比两幅图时的变化量。KAPPA 公式可表示如下:

$$K = \frac{N \times \sum_{i=1}^m X_{ii} - \sum_{i=1}^m X_{ji} \times X_{ki}}{N^2 - \sum_{i=1}^m X_{ji} \times X_{ki}}$$

其中: K 为 KAPPA 值, N 为矩阵中的元素总数, X_{ji} 为行数据元素, X_{ki} 为列数据元素, X_{ii} 为对角线元素, m 为分类数。KAPPA 一致性统计检验方法的准确度如表 2 所示。

表 2 KAPPA 一致性指数的准确度
Table 2 Accuracy represented by KAPPA values

| K | 准确程度 Accurate level |
|---------|---------------------|
| 0~0.2 | 较差 Bad |
| 0.2~0.4 | 一般 General |
| 0.4~0.6 | 较准确 Good |
| 0.6~0.8 | 很准确 Better |
| 0.8~1.0 | 极准确 Excellent |

1.5 数据处理

数据处理过程如下: 1) 首先将全国 1:1 400 万植被区划图经过数字化获取矢量格式图, 再通过投影变换和格式转换, 得到投影为经纬网投影、栅格化、每 3°(东经) × 2°(北纬) 空间分辨率为 96 × 96 个象素点的资料。2) 通过对全国 957 个气象台站的海拔高度和 1950~1980 年 30 年的月均气候资料进行线性插值, 获取栅格化、每 3°(东经) × 2°(北纬) 空间分辨率为 96 × 96 个象素点的资料。3) 基于所建立的气候资料数据库, 结合 4 个常用的气候-植被分类模型及其对应的中国植被地理分布指标系统, 给出模拟的中国植被地理分布。4) 利用 KAPPA 一致性检验方法, 结合建立的数字化 1:1 400 万植被区划图, 比较模拟的中国植被地理分布与现实的中国植被地理分布, 给出各模型模拟中国植被地理分布的一致性评价。

2 结果与讨论

2.1 中国植被地理分布的模拟与比较

4 个常用的气候-植被分类模型所模拟的中国植被地理分布的 KAPPA 一致性指数如下: Holdridge 生命地带系统的一致性指数最高(0.58), Penman 模型次之(0.51)、Thornthwaite 模型再次(0.49)、Kira 模型(0.46)最低。根据 KAPPA 一致性统计检验方法的定义可知, KAPPA 值大于 0.40 表明模拟结果较准确。因此, 就全国所有植被地理分布而言, 4 个常用的气候-植被分类模型对中国植被地带分布模拟均达到较准确或更好的水平, 其中以 Holdridge 生命地带系统的模拟效果最佳。

2.2 中国主要植被地理分布的模拟与比较

为了解 4 个常用的气候-植被分类模型对各类植被的具体模拟情况, 首先对 4 个常用模型模拟的中国一级植被地理分布的 KAPPA 一致性指数进行比较(表 3)。

表 3 4 个常用的气候-植被分类模型模拟中国植被地理分布的 KAPPA 一致性指数

Table 3 KAPPA values of simulating Chinese vegetation by four popular climate-vegetation classification models

| 类型编码 Type code | 模型 Model | | | |
|-------------------|-----------|------|--------|--------------|
| | Holdridge | Kira | Penman | Thornthwaite |
| 11 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 |
| 21 | 0.98 | 0.93 | 0.82 | 0.97 |
| 22 | 0.49 | 0.71 | 0.56 | 0.56 |
| 31 | 0.75 | 0.75 | 0.49 | 0.73 |
| 32 | 0.46 | 0.37 | 0.75 | 0.34 |
| 41 | 0.68 | 0.48 | 0.58 | 0.51 |
| 42 | 0.52 | 0.48 | 0.31 | 0.49 |
| 43 | 0.40 | 0.34 | 0.51 | 0.26 |
| 44 | 0.55 | 0.70 | 0.37 | 0.34 |
| 45 | 0.89 | 0.76 | 0.43 | 0.64 |
| 46 | 0.55 | 0.76 | 0.79 | 0.67 |
| 51 | 0.83 | 0.49 | 0.38 | 0.86 |
| 52 | 0.02 | 0.23 | 0.08 | 0.33 |
| 61 | 0.70 | 0.67 | 0.71 | 0.61 |
| 62 | 0.42 | 0.56 | 0.20 | 0.03 |
| 63 | 0.00 | 0.00 | 0.65 | 0.65 |
| 71 | 0.34 | 0.26 | 0.21 | 0.61 |
| 72 | 0.36 | 0.08 | 0.54 | 0.24 |
| 73 | 0.84 | 0.49 | 0.50 | 0.67 |
| 81 | 0.46 | 0.52 | 0.74 | 0.56 |
| 82 | 0.92 | 0.25 | 0.52 | 0.41 |
| 83 | 0.72 | 0.37 | 0.37 | 0.36 |
| 84 | 0.13 | 0.28 | 0.88 | 0.48 |
| 85 | 0.65 | 0.69 | 0.85 | 0.86 |
| 86 | 0.00 | 0.21 | 0.91 | 0.38 |

寒温带针叶林区: 4 个模型的 KAPPA 一致性指数均大于 0.80, 达到极准确程度, 表明 4 个模型均可以很好地模拟出寒温带针叶林的地理分布。

温带针阔叶混交林区: 尽管 4 个模型的一致性指数均大于 0.60, 但小于 0.80。这表明 4 个模型对温带针阔叶混交林地理分布的模拟程度不如对寒温带针叶林地理分布的模拟好, 但依然达到很准确的程度。

暖温带落叶阔叶林区: 4 个模型的一致性指数, 除 Kira 模型(0.36)外, 均大于 0.40, 但均小于 0.60, 表明 4 个模型对暖温带落叶阔叶林地理分布的模拟程度小于对前两类植被的模拟, 仅达到较准确程度。

亚热带常绿阔叶林区: Penman 模型、Thornthwaite 模型的一致性指数均小于 0.40, 而 Holdridge 生命地带系统和 Kira 模型的一致性指数均大于 0.40, 但均小于 0.60。这表明 Penman 模型、Thornthwaite 模型对亚热带常绿阔叶林地理分布的模拟程度不如 Holdridge 生命地带系统和 Kira 模型。其中, Kira 模型的一致性指数达到 0.50 左右, 能够较好地模拟亚热带常绿阔叶林地理分布, 与倪健(1998)的研究结论相一致。总体而言, 这 4 个模型对亚热带常绿阔叶林地理分布的模拟均未达到很准确程度。

热带季雨林、雨林区: 4 个模型的一致性指数均小于 0.40, 反映出 4 个模型对于热带季雨林、雨林地理分布的模拟程度均较差。Penman 模型和 Holdridge 生命地带系统的一致性指数均小于 0.10, 表明这两个模型对中国热带季雨林、雨林地理分布的模拟结果很差; Thornthwaite 模型的一致性指数则达到 0.397, 非常接近 0.40 的较准确程度。因此, Thornthwaite 模型是 4 个模型中模拟热带季雨林、雨林地理分布的最佳模型。

综上所述可知, 对于整个森林植被地理分布而言, 4 个模型的模拟效果均不相同。Penman 模型和 Thornthwaite 模型对寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区和暖温带落叶阔叶林区的模拟均可达到较准确程度, 而对亚热带常绿阔叶林区和热带季雨林、雨林区的模拟则较差, 表明该模型不适用于亚热带和热带森林植被地理分布的模拟。但 Thornthwaite 模型对热带季雨林、雨林区的模拟接近于较准确程度。

Holdridge 生命地带系统对寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区、暖温带落叶阔叶林区和亚热带常绿阔叶林区的模拟均达到较准确程度, 但对热带季雨林、雨林区的模拟效果则较差, 表明该模型不适用于热带森林植被地理分布的模拟。

Kira 模型对寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区和亚热带常绿阔叶林区的模拟达到较准确程度, 但对暖温带落叶阔叶林区, 热带季雨林、雨林区的模拟则较差。

总体而言, 4 个模型中的 Holdridge 生命地带系统和 Thornthwaite 模型均能对 4 类植被的地理分布模拟达到较准确程度, 占整个森林植被地理分布类型的 80%。而这两个模型在亚热带常绿阔叶林区和热带季雨林、雨林区的模拟可以互相补充, 提高模拟效果。Penman 模型和 Kira 模型仅能对 3 类植被的地理分布模拟达到较准确程度, 仅占整个森林植被地理分布类型的 60%。

温带草原区: 除 Kira 模型的一致性指数大于 0.40, 但小于 0.60 外, 其它模型的一致性指数均小于 0.40, 表明对温带草原的模拟 Kira 模型较其它方法为好, 达到了较准确程度。

温带荒漠区: 除 Thornthwaite 模型和 Holdridge 生命地带系统的一致性指数大于 0.40, 但小于 0.60 外, 其它模型的一致性指数均小于 0.40。

对于干旱半干旱区植被地理分布的模拟, Penman 模型的效果最差, 而 Thornthwaite 模型和 Holdridge 生命地带系统较 Kira 模型更适用于干旱程度严重的地区。这表明这 4 个模型的干湿指标都存在一定的不足, 特别是 Penman 模型的效果最差。

青藏高原高寒植被区: 青藏高原是我国, 乃至在地球上极少受到人类活动影响的少数几个地区之一, 其海拔高度大多在 4 000 m 以上, 被称为世界“第三极”。由于高原的水热条件经常处于植被生态极限的边缘, 即使是一两度的温度或一二百毫米的降水变化, 在温暖湿润地带可能不会对植被分布产生太大的影响, 但却可能导致高原植被地带性的巨大变迁。因此, 研究青藏高原高寒植被区植被地理分布的气候指标更具有重要意义。4 个模型模拟的青藏高原高寒植被地理分布表明, 除 Kira 模型的一致性指数小于 0.40 外, 其它模型均大于 0.40。其中, Holdridge 和 Penman 模型的一致性指数超过 0.50, Thornthwaite 模型的一致性指数超过 0.40, 但小于 0.60。这表明, 除 Kira 模型外, 其它 3 个模型均能较准确地模拟青藏高原高寒植被的地理分布。

3 小 结

基于 KAPPA 一致性统计检验方法对 4 个常用气候-植被分类模型: Penman 模型、Holdridge 生命地带系统、Kira 模型和 Thornthwaite 模型模拟的中国植

被地理分布比较表明, Holdridge 模型对不同植被地理分布模拟的效果最好, 只在西部季雨林、雨林区域(52), 西部草原亚区域(63)和青藏高原温性荒漠地带(86), 温性草原地带(84)的模拟效果较差。

Kira 模型与 Holdridge 生命地带系统对亚热带常绿阔叶林区和温带草原区的模拟效果较好。其中, 在温带草原区的一致性指数达到 0.43, 是唯一达到较准确一致性指数标准的模型。该模型在低海拔和湿润、半湿润地区效果尚可, 但在温带荒漠区与青藏高原区的模拟效果与实际相差较远。

Penman 模型模拟青藏高原地区植被地理分布的一致性指数超过 0.50, 是 4 个模型中最好的。因此, Penman 模型与 Holdridge 生命地带系统的指标体系结合有可能提高对青藏高原植被地理分布模拟的准确程度。

Thornthwaite 模型模拟热带雨林、季雨林地理分布的一致性指数接近 0.40(0.397), 较其它 3 个模型为高。Thornthwaite 模型的这一优势可以弥补 Holdridge 生命地带系统模拟热带地区植被地理分布的不足。若将二者的指标体系相结合, 应该可以提高热带雨林、季雨林的模型模拟准确度。

值得注意的是: 4 个模型对温带荒漠(71~73)的模拟均与实际差异较大, 对雨林、季雨林植被地理分布的模拟效果也不理想。因此, 4 个模型对极端干旱条件下植被地理分布的模拟效果均较差, 反映出 4 个模型对于干湿指标考虑的不足。

从对中国植被地理分布模拟的总体效果来看, Holdridge 生命地带系统优于其它 3 个模型。尽管这 4 个常用的气候-植被分类模型在区域尺度(如全国范围)的模拟效果较好, 但对青藏高原这样特殊环境下的植被地理分布模拟效果都不如意, 因此未来应该从中国主要植被地理分布出发, 建立更为完善的植被地理分布指标体系, 以为用于气候预测的大气环流模式提供更精确的植被地理分布模式以更准确地评估气候变化对我国植被地理分布的影响。

参 考 文 献

- Box, E. O. 1981. Macroclimate and plant forms: an introduction to predictive modeling in phytogeography. The Hague: Dr. W. Junk.
- Chang, H. S. (张新时), D. A. Yang (杨奠安) & W. G. Ni (倪文革). 1989a. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification. I. An introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), **13**: 1~9. (in Chinese with English abstract)
- Chang, H. S. (张新时), D. A. Yang (杨奠安) & W. G. Ni (倪文革). 1989b. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification. II. An introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), **13**: 197~207. (in Chinese with English abstract)
- Chang, H. S. (张新时), D. A. Yang (杨奠安) & W. G. Ni (倪文革). 1993. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification. III. An introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), **17**: 97~109. (in Chinese with English abstract)
- Cramer, W., A. Bondeau, F. I. Woodward, I. C. Prentice, R. A. Betts, V. Brovkin, P. M. Cox, V. Fisher, J. A. Foley, A. D. Friend, C. Kucharik, M. R. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White & C. Young-Molling. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, **7**: 357~373.
- Fang, J. Y. (方精云). 1994. Arrangement of East-Asian vegetation-climate types on coordinates of temperature and precipitation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **14**: 290~294. (in Chinese with English abstract)
- Fang, J. Y. & K. Yoda. 1989. Climate and vegetation in China. II. Distribution of main vegetation types and thermal climate. *Ecological Research*, **4**: 71~83.
- Fang, J. Y. & K. Yoda. 1990a. Climate and vegetation in China. III. Water balance and vegetation. *Ecological Research*, **5**: 9~23.
- Fang, J. Y. & K. Yoda. 1990b. Climate and vegetation in China. IV. Distribution of tree species along the thermal gradient. *Ecological Research*, **5**: 291~302.
- Fang, J. Y. & K. Yoda. 1991. Climate and vegetation in China. V. Effect of climatic factors on the upper limit of distribution of evergreen broadleaf forest. *Ecological Research*, **6**: 113~125.
- Foley, J. A., I. C. Prentice & N. Ramankutty. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**: 603~628.
- Haxeltine, A. & I. C. Prentice. 1996. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**: 693~709.
- Holdridge, L. R. 1947. Determination of world formations from simple climatic data. *Science*, **105**: 367~368.
- Houghton, J. T., G. T. Jenkins & J. J. Ephraums. 1990. Climate change: the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press.
- Köppen, W. 1920. *Das Geographische System der Klimate*. Berlin: Gebrüder Bornträger. 1~50.

- Liu, C. Y. (刘春迎). 1999. The application of Kira's indices to the study of vegetation-climatic interaction in China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **23**: 125 ~ 138. (in Chinese with English abstract)
- Neilson, R. P., G. A. King & G. Koerper. 1992. Towards a rule-based biome model. *Landscape Ecology*, **7**: 27 ~ 43.
- Ni, J. (倪健). 1998. Vegetation-climate classification indices and their application. *Chinese Bulletin of Ecology* (生态学杂志), **17**(2): 33 ~ 44. (in Chinese with English abstract)
- Ni, J. (倪健). 2002. Biome models: main principles and applications. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **26**: 481 ~ 488. (in Chinese with English abstract)
- Prentice, I. C. 1990. Bioclimate distribution of vegetation for general circulation model studies. *Journal of Geophysical Research*, **95**: 11811 ~ 11830.
- Rosenzweig, C. & M. L. Parry. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, **367**: 133 ~ 138.
- Wood, F. B. Jr. 1988. The need for systems research on global climate change. *Systems Research*, **5**: 225 ~ 240.
- Woodward, F. I. 1987. *Climate and plant distribution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhang, X. S. (张新时). 1993. A vegetation-climate classification system for global change studies in China. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), **2**: 157 ~ 169. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, G. S. (周广胜) & X. S. Zhang (张新时). 1996a. Study on Chinese climate-vegetation relationship. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **20**: 113 ~ 119. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, G. S. (周广胜) & X. S. Zhang (张新时). 1996b. Study on climate-vegetation classification for global change in China. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **38**: 8 ~ 17. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, G. S. (周广胜). 1993. Study on climate-vegetation interaction. I. Climate-vegetation classification. In: Lin, J. A. (林金安) & J. X. Lin (林金星) eds. *Plant science review*. Harbin: Northeast Forestry University Press. 234 ~ 245. (in Chinese)
- Zhou, G. S. & Y. H. Wang. 2000. Global change and climate-vegetation classification. *Chinese Science Bulletin*, **45**: 577 ~ 584.

责任编辑: 方精云 责任编辑: 周玉荣