

BIOME3 模型在中国应用的精确度分析及其改进

张宁宁^{1,2} 延晓冬¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 通过对 BIOME3 模型输出结果与中国植被区划类型相匹配, 在一级植被区划下, 通过 Kappa 检验方法对 BIOME3 模型的模拟能力进行了客观比较分析。结果表明, BIOME3 模型在植被区域等级下可以整体上较好地模拟中国植被区域 (Kappa 指数 0.55), 但存在其对草原、寒温带针叶林及热带雨林区域模拟能力较弱, 对青藏高原地区植被模拟能力单一, 以及在区域边界处模拟不准确等不足。本工作在 3 方面对 BIOME3 模型作出了改进: 1) 将原 BIOME3 模型中大大简化的土壤下渗过程进行了较完善的机理化改进; 2) 采用更为完善的美国农业部 USDA 系统土壤分类数据库, 重新设定土壤参数; 3) 将站点月平均温度在空间插值的基础上结合海拔高度整理出新的格点月平均温度数据库, 应用于模型输入中。修改后的模型结果显示, BIOME3 模型中生物地球化学模型部分对于模型的作用增强即水分胁迫作用明显增强, 可较成功地模拟中国南部的灌丛、矮林植被群区; 对于青藏高原冰川区模拟能力大大加强, 并具有一定的垂直地带性模拟能力。

关键词 植被模型 BIOME3 模型 下渗模型

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0021-10 **中图分类号** P421 **文献标识码** A

Accuracy Analysis and Improvement of BIOME3 Model Used in China

ZHANG Ning-Ning^{1,2} and YAN Xiao-Dong¹

1 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia, START/RRC Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract The study analyzed the accuracy of BIOME3 simulation of China's potential vegetation distribution by using Kappa statistics and suggested that BIOME3 can simulate China's vegetation division fairly well (Kappa value 0.55). However, it failed on simulating the boreal forests and tropical forests and could not show the variety of vegetation on Tibet Plateau, and had uncertainties when dealing with the boundaries of each biome. Therefore, the study tried to ameliorate the model in three aspects: 1) mechanizing the infiltration process of BIOME3, which was described empirically; 2) using USDA soil texture classification system instead of the original one of BIOME3 and resetting the soil hydraulic parameters; 3) interpolating station data of monthly mean temperature by considering topography. Simulating results showed that the effect of water intolerance to model output is more distinct, which means the biogeochemistry sub-model can play a bigger part. As a result, BIOME3 can describe the temperate shrub land and short woodland of southern China successfully. Moreover, there is an improvement in the simulation of ice/polar desert of Tibet Plateau while the ameliorated model also has a basic ability of simulating the vegetation vertical distribution.

Key words vegetation model, BIOME3, infiltration model

收稿日期 2007-01-30 收到, 2007-11-02 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400500

作者简介 张宁宁, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事森林生态模型及气候-植被相互作用研究。E-mail: zhangnn@tea.ac.cn

1 引言

随着全球 CO_2 浓度的不断增加, 大气环流模式 (GCMs) 稳态模拟得出, 全球的气温将普遍升高 $1.5\sim 4.5\text{ }^\circ\text{C}$, 全球增暖将会从结构和功能上同时影响陆地生态系统的分布格局^[1,2]。BIOME3^[3]模型是在 BIOME^[4]和 BIOME2^[5]模型的基础上发展起来的平衡态陆地生物圈模型, 它在前两个模型的基础上将生物地理模型和生物地球化学模型在全球的尺度下加以结合, 用以模拟植被分布和一定的生物地球化学特征, 并将潜在植被分布直接耦合入生物地球化学中^[6], 是一个基于植物功能型的生态生理特征、资源有效性和竞争的生物地理-生物地球化学耦合模型。虽然生物地球化学模型种类繁多, 特点各异, 但 BIOME3 由于结构简单, 使用方便, 输出结果多样、准确, 因此在全球尺度的植被格局模拟, 海气耦合模式计算, 碳循环收支计算以及古气候反演研究方面有着广泛的应用。

倪健等^[6~8]将 BIOME3 模型应用于中国, 通过采用更精确的气象资料数据, 将中国的土壤类型按照 BIOME3 中的分类加以重组, 对中国植被分布和净生产力等方面进行了模拟研究, 其结果可以在区域尺度上较好地模拟中国潜在植被的分布特点。但是, 由于 BIOME3 模型本身着眼于全球尺度, 模型的输出结果分类和模型参数的确立及输入数据对中国区域的针对性不强, 并导致模型的应用受到限制。因此, 利用比较分析, 判断出 BIOME3 模型产生误差的原因, 并提出解决方案, 对其进一步改进和应用提供参考和方向。本文将通过对 BIOME3 全球模拟输出结果 (0.5° 网格) 与中国植被区划图进行比较分析, 采用 Kappa 一致性检验方法对两者的相似性进行检验, 评价 BIOME3 模型在中国地区应用的准确性。IGBP/GAIM 第 5 号报告通过对 16 种模型在全球 NPP 模拟结果的对比分析指出, 水分平衡和水分胁迫会对模型的植被净初级生产力 (NPP) 输出产生较大的影响^[9]。本工作将对 BIOME3 模型的土壤下渗过程进行改进, 使模型更加机理化, 具有更广泛的适用性, 并加强该模型中生物地球化学过程 (特别是土壤水模型) 对植被分布、生长

和竞争方面的反馈作用。另外, 将根据美国农业部 USDA 分类系统分类的中国土壤数据^[10]和改进过的 30 年的月平均观测气温数据直接应用于 BIOME3 模型, 使模型输入资料更加适应中国区域, 从而提高模拟精度, 达到在亚区域尺度甚至更高尺度上模拟中国植被群区分布的目的。

2 BIOME3 模型资料及其准确性检验

2.1 BIOME3 模型

BIOME3 模型是应用较为广泛的生物地理-生物地球化学耦合模型之一。其输入的驱动变量包括: 日较差的月平均值, 月平均气温, 月降水量, 辐射吸收率 (FPAR), 土壤质地参数, 纬度和大气 CO_2 浓度。模型通过生理因子的限制条件, 首先会在每个单元中得到可能存在的植被功能型 (PFTs), 在此基础上, 耦合碳水通量模型以计算出每个功能型所能获取的最大 NPP 及其对应的叶面积指数 (LAI)。利用单元内每个植物功能型的最优 NPP 作为竞争要素, 通过水分胁迫, 近似估计光竞争等条件, 模拟出单元格内的植被动态平衡。模型所用的植物功能型为 9 种, 最终输出的植被群区类型为 18 种。与此同时, 模型还输出包括一系列植被状态的定量描述, 如优势 PFT, 次要 PFTs 以及生态系统的总 LAI 和 NPP 等。

模型检验分析采用的模型驱动数据和土壤质地等级数据来源于联合国粮食及农业组织 (FAO)^[11], 而气候数据采用国际应用系统分析研究院 (IIASA) 的气候资料^[12], 数据分辨率均为 0.5° 网格。

2.2 Kappa 检验

Kappa 检验是近几年在比较两个多元素、多类别的影像一致性程度上采用的较多的一种统计检验方法。Monserud 将此检验方法引入到生态模型模拟一致性检验中, 此后被广泛采用^[3,4,13,14]。其优点是可以排除某几个元素“偶然一致”的干扰从而得到较为客观的两影像的一致程度的评估^[11]。Kappa 检验结果在 $-1\sim 1$ 之间, 指数等于 1 则说明两幅影像完全一致, 若 ≤ 0 则表明两幅影像无相似之处。表 1 给出了 Kappa 一致性指数与评价准确度描述之间的关系^[8]。

表 1 Kappa 一致性指数的准确度
Table 1 Accuracy of Kappa statistic value

Kappa 指数	评价标准
<0.4	差, 极差
0.4~0.55	一般
0.55~0.7	好
0.7~0.85	非常好
>0.85	极好

2.3 中国植被区划与数据匹配

中国植被区划是按照一定地段上植被类型, 及其地理分布的特征, 划分出高、中、低各级彼此既有区别但在内部又具有相对一致性的植被类型, 及其有规律组合的植被地理区。其划分原则不仅考虑了植被的地带性因素, 还考虑到了地质构造、地貌、地表组成物质、土壤和水文等其他非地带性生态差异, 是各种生物地球模型建立的理论和方法基础。中国植被区划按照侯学煜^[15]划分的中国植被区划图分为 13 个大区, 包括寒温带针叶林区 (Boreal conifer forest), 温带针叶阔叶林混交林区域 (Temperate conifer and broad-leaved mixed forest), 暖温带落叶阔叶林区域 (Temperate deciduous broadleaved forest), 西部亚热带常绿阔叶林区域 (Western subtropical evergreen broadleaved forest), 东部亚热带常绿阔叶林区域 (Eastern subtropical evergreen broad-leaved forest), 西部热带季雨林、雨林区域 (Western tropical rainforest/seasonal rainforest), 东部热带季雨林、雨林区域 (Eastern tropical rainforest/seasonal rainforest), 温带草原区 (Temperate grassland), 暖温带草原区 (Warm temperate grassland), 高寒草甸苔原区 (Alpine/tundra), 温带荒漠区域 (Temperate desert), 暖温带荒漠 (Warm temperate desert) 以及高寒荒漠 (Ice/Alpine Desert)。

用于与 BIOME3 进行比较的植被数据库是 1:4 000 000 中国植被分布图, 其按照植被类型分类, 给出 103 种植被类型的分布矢量图。对照中国植被区划, 将 103 种植被类型重新归纳成上述的 13 类植被区域类型, 得出新的植被区域尺度区划数据库。按 BIOME3 的模拟结果分辨率 (0.5° 网格) 将区划图栅格化, 得到了可与模拟结果相比较的图像。由于 1:4 000 000 中国植被分布图

数据库自身的某些数据分类特点, 因此在与中国植被区划相对应再归类时, 会出现对应不准确的现象, 在极个别的地区出现数据缺失, 但由于面积很小, 对整体比较结果不会产生太大影响。

BIOME3 模型作为一个生物地理-生物地球化学耦合模型, 其输出的 18 种植被群区结果均以该单元内潜在植被类型为基础, 按照不同的优势、次优势植被功能型比例组合, 综合得到。由于潜在植被的定义并不明确, 加之中国目前没有明确的潜在植被分布图, 因此使得直接对 BIOME3 模型进行比较检验十分困难。中国植被区划是利用一系列严格定义的原则对中国植被地带性分布进行描述, 其划分原理本身与 BIOME3 模型的生物地理部分机理类似, 因此, 采用中国植被区划来与 BIOME3 模拟结果进行比较从机理上和逻辑上都是具有可比性的。

BIOME3 输出 9 种 PFTs 类型, 18 种植被群区类型, 但由于其是全球尺度模型, 在对应中国植被地理分布时并不能一一对应。为了使 BIOME3 模型和中国植被分布匹配且具有可比性, 将模型的输出结果根据我们得到的中国植被区划图中的类型进行了合并和简化 (如表 2)。由于中国植被区划中并不存在稀树草原 (Savanna) 的分类,

表 2 BIOME3 模型输出群区与中国植被区划植被群区
Table 2 Matching BIOME3 output with Chinese Vegetation Division

序号	植被区划	BIOME3 输出
1	寒温带针叶林区	寒温带落叶林 寒温带常绿林
2	温带针叶阔叶混交林区	温带/寒温带混交林 温带针叶林
3	温带落叶阔叶林区	温带落叶林
4	西部亚热带常绿阔叶林区 东部亚热带常绿阔叶林区	温带常绿阔叶林
5	西部热带季雨林、雨林区 东部热带季雨林、雨林区	热带雨林 热带季雨林
6	暖温带草原区	长草草原
7	温带草原区	短草草原
8	温带荒漠区 暖温带荒漠区	半干旱森林/灌木 干旱灌木/戈壁 沙漠
9	高寒草甸苔原区	极地/高寒苔原
10	高寒荒漠区	高寒荒漠/冰川

并且在对这种群区类型的再归类上也有相当的难度和不确定性，加之样本量并不大，不会对整体的比较结果产生大的影响，因此进行一致性检验时并不对此类稀树草原群区进行检验。这种方式可以与我国植被区划的分类相匹配，客观地对 BIOME3 模型在区域大尺度的模拟能力加以了解，并且能由此排除由于分类过细而产生的系统误差，从模型本身找出可以改进的部分。

2.4 Kappa 检验结果

表 3 中列出的是经过匹配后中国植被区划分布与 BIOME3 模拟输出的 Kappa 一致性检验结果。其中，将植被群区面积作为权重因子，对整体的 Kappa 指数进行加权平均计算，其值达到了 0.55，说明 BIOME3 与中国植被区划的一致性较强，大尺度上可以较成功地体现中国现有气候一植被的总体格局。图 1 显示的是 BIOME3 与中国植被区划的吻合情况，为了更明显地反映 BIOME3 在相应植被区域的模拟能力，将已经归类的 1:4 000 000 中国植被图作为背景，图中“√”标志的地区表明被 BIOME3 成功模拟，“o”标志表示由于 BIOME3 输出为稀树群区而未与植被区划相对应的地区。

(1) 寒温带针叶林区

寒温带针叶林区位于中国东北北部，图 1 中可以看出，BIOME3 可以完整地模拟出中国北部

表 3 植被区划与 BIOME3 模型输出的 Kappa 指数

Table 3 Kappa value of simulating Chinese vegetation by BIOME3

植被群区名称	Kappa 指数
寒温带针叶林区	0.30
温带针叶阔叶混交林区	0.58
温带落叶阔叶林区	0.40
亚热带常绿阔叶林区	0.61
热带季雨林、雨林区	0.25
暖温带草原区	0.38
温带草原区	0.32
温带半干旱区/荒漠区	0.81
高寒草甸苔原区	0.71
高寒荒漠区	0.04
Kappa 平均值	0.55

的针叶林地带，但由于其错误地将其他区域模拟成为针叶林地区，因此导致了 Kappa 指数表现为一般。此外，BIOME3 的输出结果中虽然较成功地模拟出此区域，但是在植被亚群区的分类下却模拟得不好，寒温带针叶林区在中国境内主要是寒温带落叶针叶林，而 BIOME3 模型并未正确模拟出来，而是模拟为常绿针叶林。

(2) 温带针叶阔叶混交林区

温带针叶阔叶混交林区是中国东北部典型的植被区域，其范围包括了东北平原、小兴安岭、

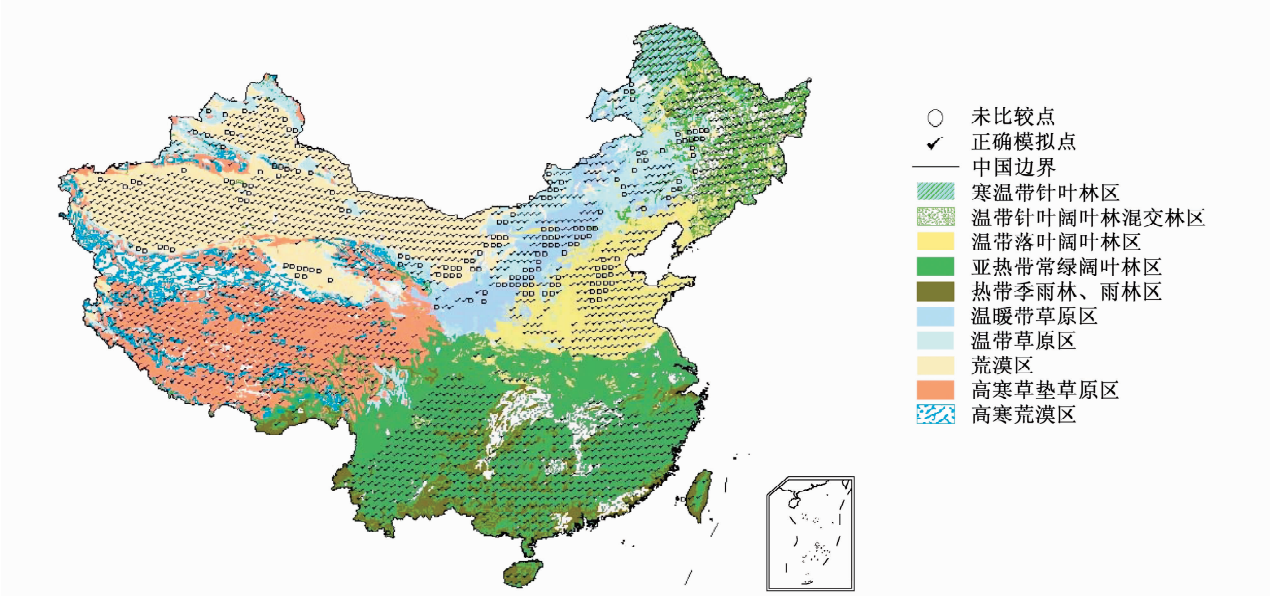


图 1 BIOME3 模型模拟结果输出与中国植被区划比较结果

Fig. 1 Comparison of BIOME3 and Chinese Vegetation Map

长白山及三江平原地区。BIOME3 成功地模拟出了此植被区域的分布, 对该类型的植被模拟能力高于模型整体模拟能力, 但在与草本植被区域交界带地区模拟效果不好。

(3) 温带落叶阔叶林区

BIOME3 较成功地模拟了华北平原、东北平原南部的温带落叶阔叶林区, 但未能模拟出太行山南部到伏牛山地区的区域, 并且对温带落叶阔叶林和亚热带常绿阔叶林区的交界处模拟能力较差, 有明显的误差。

(4) 亚热带常绿阔叶林区

亚热带常绿阔叶林区是在中国东部湿润半湿润地区 BIOME3 模拟最成功的区域。对大巴山—长江中下游以南地区的常绿阔叶林区 BIOME3 能很好地进行模拟, 但对其以北到秦岭—淮河以南的狭长地区却未能准确模拟。在温带落叶阔叶林区和亚热带常绿阔叶林区的交界线上 BIOME3 模拟结果明显偏南 (图 1 中箭头指向)。此外, 在四川省以及云南省常绿阔叶林区与高寒苔原带的交界处, BIOME3 同样有一个很明显的狭长地带未能准确模拟。

(5) 热带雨林/季雨林区

中国热带雨林/季雨林区面积很小, 仅仅集中在最南部的狭长地带, 且较分散, 在将中国植被图再归类形成中国植被区划数据库的过程中, 并未很明显地将热带雨林/季雨林区作为一个连续的气候—植被带加以表示, 影响了 BIOME3 对其准确模拟。

(6) 暖温带草原与温带草原

BIOME3 对暖温带草原与温带草原的模拟能力都不高, 由于位于东部湿润半湿润区向西部干旱半干旱区过渡的地带, 因此其植被区划与所有其他的植被区划都有交界, 而在交界处的模拟困难较大, 误差也较高。

(7) 温带半干旱区/荒漠区

BIOME3 对干旱半干旱地区的模拟能力很强, 对整个中国西北部的干旱环境都有准确的模拟, 且在边界的界定上也很准确。但是对于柴达木盆地并未成功模拟。

(8) 高寒草甸草原区与高寒荒漠区

高寒草甸草原主要范围是在青藏高原地区, BIOME3 对此区域的模拟能力较强。由于有青藏

高原西北部的大面积的高寒冰川地貌, 而 BIOME3 模型未能得到相应的较准确的冰川分布, 因此, 影响了对高寒草甸草原区的预测。并且, 对于青藏高原东南部的横断山脉地区的植被, BIOME3 也未能正确模拟。

2.5 BIOME3 检验结果分析

由于 BIOME3 模型是生物地理-生物地球化学耦合模型, 其本身是从机理上对每个单元格点的植被功能型进行计算, 因此在植被类型空间分布的精度上应大于植被区划图。植被区划图的划分规律是按照先地带性, 后非地带性; 先水平地带性, 后垂直地带性; 先高级植被分类单位, 后低级植被分类单位; 先大气候 (水热条件), 后地貌和土壤基质的顺序进行的。而 BIOME3 模型则是在此分类基础上引入了竞争机制, 使得其不仅可以模拟出优势顶级植被类型 (即植被区划中所提及的类型), 而且能模拟出次级优势植被类型, 从而通过不同类型的优势次优势植被的组合得到更加细致的植被分区类型。中国植被区划无论在区域或亚区域尺度上, 都未能给出一个由木本植被区向草本植被区过渡的区域类型, 而 BIOME3 则可以将这种地区即稀树草原群区型反映出来。植被区划在亚区域体现出的半干旱灌木半灌木地区和沙漠地区也应可以用 BIOME3 加以模拟, 并且在更加高的分辨率下准确地模拟中国植被群区的分布细节。

BIOME3 模型输出类型与中国植被之间的不适应是影响其模拟效果的主要因素。BIOME3 的 18 种植被群区输出是通过 9 种植被功能型 (PFTs) 进行特定组合而输出得到的, 虽然这 9 种植被功能型 (PFTs) 在中国都有直接的对应关系, 但是通过 BIOME3 组合后形成的 18 种植被群区却有多种群区类型与中国的不相适应。BIOME3 模型的模拟能力应不仅限于对植被区域尺度的模拟, 但由于输出结果的不匹配, 严重限制了其在中国区域的应用。适合中国地区的植被群区类型输出, 对于 BIOME3 在亚区域或更精确尺度上的应用, 以及进行更加准确客观的模型对比检验都有重要的作用。

提高 BIOME3 模型模拟能力的另一个重要途径即提高输入数据的质量。倪健等^[8]采用 800 多个站点气象资料驱动 BIOME3 进行模拟的结果显

示, 柴达木盆地是很明显的干旱半干旱地区, 而 BIOME3 模型在本文采用的驱动资料下未能正确模拟, 说明 BIOME3 的模拟精度很大程度上取决于输入数据的质量。近几年中国气象观测数据无论从准确度、丰富度上都有很大的进步, 为 BIOME3 进一步更精确地应用于中国区域提供了可靠的保障。而通过对模型进行微小的改动, 则可以使整个数据的利用得到很大的提高。首先, BIOME3 对温度、日照数据是采用月中平均值, 通过简单的线性插值后得到每日的值, 再用来计算植被生长, 即 LAI、NPP 和辐射等重要结果。由于近几年中国气象资料有日数据可以采用, 因此在计算上述过程中采用实际观测值会更加准确, 这种改进对于研究潜在植被分布在年代际尺度上的变化作用尤为明显, 而对于较长时间尺度上的植被变化研究则意义不大。其次, BIOME3 中采用的土壤质地等级数据过于粗糙、单一, 而土壤饱和持水量、萎蔫点、下渗速率等参数直接影响着模型运行过程中对植被功能型的选择, 水分胁迫条件下的物种竞争及 LAI 和 NPP 值的输出。通过重新对中国区域内不同土壤种类的分布进行整理, 对上述参数进行改进, 就能有效地改善 BIOME3 模型在非地带性植被功能型选择分布及资源有效性动态竞争上的准确度, 提高模拟的精度。

虽然本文将 BIOME3 模型的输出植被群区进行了简化, 降低了其分辨率, 但对于高寒草原植被的模拟结果并未简化, 即模拟青藏高原地区的植被分布时, 其分辨率仅停留在区域尺度上, 因而对于亚区域以下尺度的青藏高原植被分布模拟无法进行。一方面由于青藏高原上的植被在对气候的适应能力和对气候条件变化的敏感度上都要大大强于中低海拔地区的植被, 因此在 BIOME3 中采用同一种植被气候限制因子时, 将无法体现出青藏高原植被的多样性。另一方面, 青藏高原地区的气象数据匮乏, 由再分析形成的数据不够准确, 空间分辨率也很低, 导致预测结果的单一、不敏感。因此, 虽然根据青藏高原植被的特殊生理特性, 单独对其区域进行 BIOME3 参数调整是必要的, 但采用可以准确描述青藏高原地区气候的高分辨率的数据是目前最难解决的问题。然而对高寒冰川区的模拟因数据质量的提高将有所改进。

3 模型改进及结果

根据以上的分析, 本工作在三方面对 BIOME3 模型进行改进。首先, 机理化土壤水模型, 舍弃经验性参数和公式, 提高模型模拟能力, 并使其能较容易地在各种土壤分类系统下得到很好的应用。其次, 采用 USDA 土壤分类系统, 对 BIOME3 模型中各土壤物理参数进行重新定义和赋值。最后, 经过地形校正, 改进空间插值月平均气温数据, 并应用于模型输入。

3.1 BIOME3 土壤水文模型改进

植被地理分布的决定因素包括温度、降水和辐射等气候要素, 同时也包括土壤和养分等非气候要素。BIOME3 模型虽然是生物地理-生物地球化学耦合模型, 但其气候要素对植被分布仍起主导限制作用, 而其生物地球化学模型部分多采用经验参数及经验方程, 导致此部分模型的作用更多地体现在丰富模型输出结果方面; 而对植被生长、竞争和植被分布决定方面, 作用并不明显, 表现在 BIOME3 对于气候类似而土壤质地差异明显的地区, 无法准确模拟出其植被群区的复杂程度, 对亚区域尺度的模拟能力不高。研究发现, 模型中植被最主要的草本、木本植被对水分的竞争机制, 是通过不同植被处于不同土壤层的根系对土壤水的利用能力而实现的。改进 BIOME3 中的土壤水文模型, 使之直接影响植被之间的水分胁迫竞争动态, 是提高 BIOME3 在亚区域尺度下模拟能力的关键。由于土壤下渗模型中采用的是经验参数和经验模型, 导致采用新的土壤分类系统数据时土壤性质参数不可用, 因此将 BIOME3 水文模型部分机理化, 使得模型可以采用更精确的土壤数据及更具针对性的土壤分类体系。

BIOME3 模型采用 2 层土壤模型, 模型土壤水动态过程如图 2 所示。土壤水在土壤中的下渗过程采用了简单的经验公式加以模拟。BIOME3 中给出上下层土壤可利用含水量计算公式:

$$\Delta W_1 = (V_{\text{Melt}} + V_{\text{Rain}} - V_{\text{Perc}} - \beta_1 V_{\text{AET}}) / V_{\text{AWC}_1}, \quad (1)$$

$$\Delta W_2 = (V_{\text{Perc}} - \beta_2 V_{\text{AET}}) / V_{\text{AWC}_2}, \quad (2)$$

其中, ΔW_1 、 ΔW_2 分别为上下层土壤可利用含水量变化, V_{Melt} 是积雪融水, V_{Rain} 是降水量, V_{Perc} 为下渗水量, β_1 与 β_2 为根系通过不同层土壤吸收水

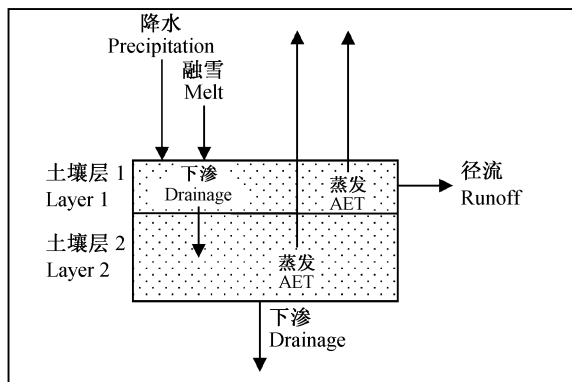


图2 BIOME3 土壤水动态示意图

Fig. 2 Soil moisture model of BIOME3

分的比例参数, V_{AWC} 为土壤可利用水含量, V_{AET} 则为土壤实际蒸发量。由式 (1) 和 (2) 可以看出, 模型中下层土壤的唯一水分来源是上层土壤的垂直下渗。BIOME3 中采用的土壤下渗模型

$$V_{Perc} = KW_1^4 \quad (3)$$

虽然使得计算简便, 但不能真实地反应上下两层土壤水交换与降水之间的互动关系, 使得木本、草本的水分竞争动态被削弱。式 (3) 中 K 是经验下渗参数 (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), W_1 为上层植被可利用水分含量。水文模型中土壤下渗速率参数和下渗方程均为经验性结论, 在不同的土壤分类系统下很难加以融合采用。

通过 Darcy 定理可以将现有的土壤下渗模型较好地机理化, 使下层土壤对降水的动态响应更强, 较真实地模拟水分胁迫在植被生长中的作用。上层土壤向下层土壤的下渗过程分为饱和下渗和非饱和下渗。当上层土壤湿度达到土壤饱和持水量时, 土壤产生饱和下渗, 下渗速度为饱和导水率:

$$V_{Perc} = K_s W_1^4, \quad (4)$$

其中, K_s 为饱和导水率, W_1 为上层土壤水相对湿度。而当上层土壤未达到饱和时, 土壤下渗遵循非饱和流下渗速率, 为

$$V_{Perc_1} = K_a \times \left(1 - \frac{\Delta\Psi_m}{s}\right), \quad (5)$$

其中, K_a 为非饱和导水率, $\Delta\Psi_m$ 为上下土壤水质势差, s 为土壤层厚度。 K_a 通过 Roger 给出的经验公式得到^[16]:

$$K_a = K_s \times W_1^{2b+3}, \quad (6)$$

b 为经验参数。由于模型是在月平均降水的基础上线性插值到每一天的降水, 下层土壤获得的水分量仅在天的时间尺度上加以计算, 下垫面并未有非饱和流下渗存在, 因此下层土壤在未饱和前并不会产生下渗。为加强下层土壤对水分动态的真实模拟, 模型中加入了土壤下垫面的非饱和流下渗项。即

$$V_{Perc_2} = K_a = K_s \times W_2^{2b+3}, \quad (7)$$

其中 W_2 为下层土壤水的相对湿度。

为适应土壤水文模型的机理化改进, 土壤湿度时间分辨率需提高, 以每小时计算, 降水以每日的降水总量为上限, 随机分配到每小时。

土壤物理性质参数采用 Cosby 等^[17]提供的参数数值。土壤萎蔫点和饱和持水量分别采用衬质势 4 500 cm 和 100 cm 时的土壤湿度值^[4]。

3.2 USDA 土壤分类体系及土壤数据应用

USDA 土壤分类体系应用广泛, 对土壤性质的研究也较为全面, 目前绝大部分数值模式都使用 USDA 土壤质地分类标准。USDA 分类有 12 个土壤类型, 多于 BIOME3 本身的 9 个类型。倪健等^[8,18]将 BIOME3 模型应用于中国地区时, 将 USDA 的 12 个土壤类型归类简化, 以适应 BIOME3 参数设定。本工作通过机理化 BIOME3 模型土壤水文动态过程, 使得 USDA 土壤分类标准可直接应用于 BIOME3 模型, 大大改善了由于土壤分类不同而带来的数据不确定性。张时煌等^[10]根据不同比例尺的土壤质地分布图资料, 将数据加以融合得到 USDA 分类标准的中国土壤分类数据库, 其融合了土壤质地分布图、土壤发生分类类型分布资料以及土壤诊断学分类的土壤类型分布图资料, 可以较准确地反映 USDA 分类下中国土壤分布, 其空间分辨率为 0.1° 。

3.3 基于地形校正的台站观测温度数据的应用

BIOME3 模型运算过程中, 月平均温度是极为重要的驱动数据, 直接关系到特定植被类型的发生和生长, 高质量的月平均温度数据资料是提高输出质量的关键。台站观测数据虽然准确度高, 数据丰富, 但由于站点非规律连续分布, 因此须将台站观测数据进行空间插值并得到最终连续的格点温度数据。Kriging 插值法是目前广泛采用的空间插值方法, 但受到站点密度的限制, 在站点密度较稀疏的青藏高原和西部地区, 用此插值方

法对站点密度进行直接插值效果并不理想。Kriging 插值法并不考虑由于地表高程差带来的格点气温差异，因此植被的垂直地带性无法得以反映。本工作将台站数据结合地形数据在空间进行插值，得到的数据能够较明显地体现海拔高度对气温的影响，并减弱了站点稀少地区插值过程中产生的误差，对提高 BIOME3 在空间上的分辨率有较大的作用。

3.4 气候数据

除了月平均气温数据采用地形校正后台站观测值的 Kriging 插值，月均降水、最冷月和最冷日

温差、月均云量数据均为 1970~2000 年台站观测资料经直接空间插值得到，空间分辨率为 0.1°。

3.5 结果

通过机理化 BIOME3 土壤水文模型，引入更准确的 USDA 土壤分类数据库，以及将温度驱动数据经地形校正，得到了新的 0.1°空间分辨率的中国潜在植被分布图（图 3b）。改进后的结果较之前有了较大变化，对前面提到的几处重大的模拟偏差也有明显改进：温带常绿阔叶林带的北界出现在秦岭淮河沿线，塔里木盆地干旱区被明显地模拟出来。另外，我国南部的热带季雨林带也

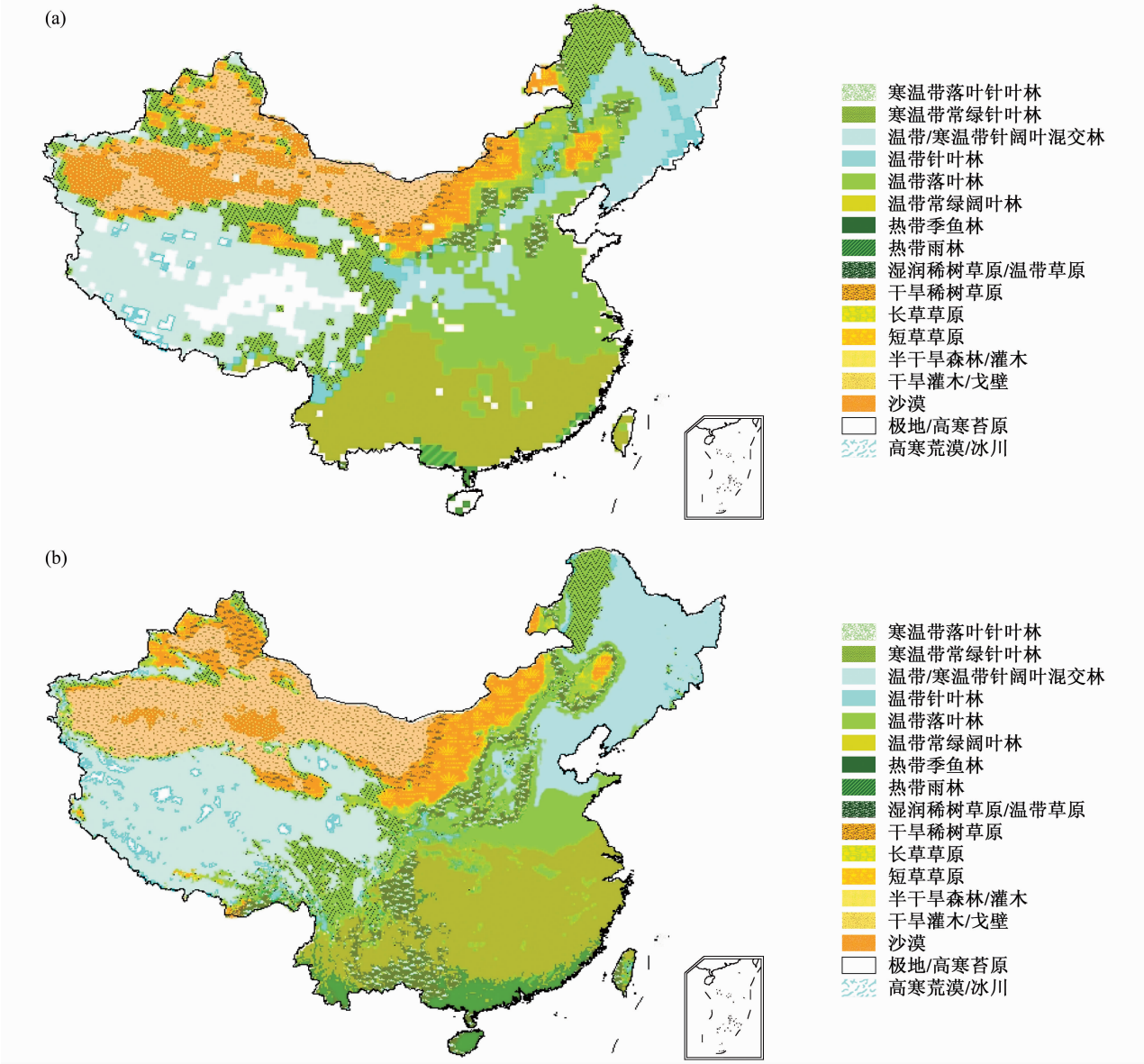


图 3 中国 600 台站 1 月平均气温空间插值数据：(a) 未经地形校正；(b) 经地形校正
Fig. 3 Interpolation of mean January temperature of China; (a) before topography modified; (b) topography modified

被较好地模拟,其分布于福建、广东、广西南部,海南大部以及云南西南部,与模型模拟结果相吻合。

BIOME3 中所用的植被分布概念——潜在植被(PNV)分布是在早期地图学绘制过程中提出的,即一种与所处立地达到平衡的演替终态,反映的是无人干扰的情况下,立地所能发育形成的最稳定成熟的一种顶级植被类型^[19]。但是这种定义的可变性很大,经过改进后的 BIOME3 的输出结果与以前的有很大不同,改进后的模型更加真实地反映了气候因素以外的其他因素对潜在植被分布的影响。但是,由于在亚区域的尺度上 BIOME3 输出的生物群区类型并不能很好地与中国现有植被群区类型相吻合,并且由于现时自然植被与潜在植被之间仍存在一定差异,再加之高分辨下模拟结果的离散度增加,绝对意义上的准确性降低,因此本工作没有对新的 BIOME3 模型模拟结果进行 Kappa 检验。但通过定性比较分析发现,改进后 BIOME3 在亚区域尺度甚至更高的尺度上都具有较好模拟潜在植被分布的能力。

通过改进 BIOME3 土壤模型,使其能更好地通过水分胁迫对植被分布格局加以作用。在现实植被分布中,我国西南部存在大面积的热带、亚热带常绿灌丛和矮林,广泛分布于云南、贵州和广西地区,而未改进的 BIOME3 模型并未能很好地模拟,只仅仅将此地区模拟为亚热带常绿阔叶林及热带季雨林。改进后的 BIOME3 模型由于模型本身输出的限制,并无热带/亚热带灌丛区和热带亚热带矮林区分类(Tropical/Subtropical shrub, Short forest),而将此地区模拟为热带稀树草原区,实际上体现了在此地区由于水分胁迫而产生的植被分布与气候带之间的差异;而从模型输出类型机理上说,稀树草原与灌丛、矮林都属于 NPP 值介于草原与森林之间的植被群区类型。因此,可以认定,BIOME3 模拟出了我国南部的灌丛、矮林植被群区,值得注意的是,海南省西部狭长地带的热带灌丛、矮林也得到了准确的模拟。

模型在更精确尺度上的成功模拟还表现在以下几个方面:秦岭淮河南部大面积常绿落叶林地区中零星分布的温带落叶阔叶林、针叶林的模拟结果与自然植被分布图标明的地区相吻合;对于青藏高原东部复杂地貌下的植被经度地带性分布

和垂直地带性分布做出模拟;由于引入地形校正的温度数据库,BIOME3 对于青藏高原地区冰川区模拟能力大大加强。

以上证据表明,改进的 BIOME3 模型可以在更高的亚区域尺度上对植被分布进行模拟,并具有一定的垂直地带性模拟能力,且较之原模型有较大提升。

4 结论与讨论

BIOME3 生物地理-生物地球化学耦合模型,从机理上对每个单元格点的植被功能型进行模拟。通过对中国现有植被区划与模型输出的植被群区功能型的整合比较发现,BIOME3 能够较好地模拟中国地区的潜在植被分布。通过 Kappa 检验分析,模型对中国潜在植被区划的总体模拟能力的 Kappa 指数达到 0.55,尤其对干旱地区(Kappa 指数 0.81),高寒草甸苔原带(Kappa 指数 0.71)和亚热带常绿阔叶林(Kappa 指数 0.61)等区域的模拟能力很强。

本工作通过改善 BIOME3 驱动资料,改进并机理化土壤下渗过程及重新选用 USDA 土壤分类系统物理参数,使得模型的输入数据更加准确、分辨率更高,模型的地球化学循环过程的作用得到较大提升,从而使得模拟结果得到了较大的改进。定性分析来看,温带常绿阔叶林带的北界正确地出现在秦岭淮河沿线;塔里木盆地干旱区被正确模拟;我国南部的热带季雨林带也被较好地模拟,其分布于福建、广东、广西南部,海南大部以及云南西南部,与模型模拟结果相吻合;由于水文模型部分过程的机理化改进,使得南部由于土壤水分胁迫产生的亚热带灌木、矮林植被群区也得到了较好模拟。

虽然模型模拟能力在改进后有较大提升,但仍有不足。首先,个别群区之间的边界参数界定需要改进:模型对干旱地区沙漠和戈壁/灌木的区分模拟能力还较弱;对针叶/阔叶混交林的模拟能力不高,与落叶阔叶林的边界呈现出偏南的趋势。其次,由于未对 BIOME3 的输出植被类型进行改进,使得在湿润区向干旱区过渡的过程中仍存在植被类型不匹配的问题。第三,青藏高原区复杂植被分布模拟能力仍待提高。虽然东部地区模拟

能力有所加强但在西部地区 BIOME3 模拟能力依旧单一, 这一方面是由青藏高原特殊的植被生长生理因素造成的, 而另一方面青藏高原地区尤其西部地区稀缺的观测资料也导致了其对青藏高原地区模拟能力的不足。

参考文献 (References)

- [1] 陈起英, 俞永强, 郭裕福, 等. 温室效应引起的东亚区域气候变化. 气候与环境研究, 1996, **1** (2): 113~123
Chen Qiyang, Yu Yongqiang, Guo Yufu, et al. Climatic change in East Asia induced by greenhouse effect. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1996, **1** (2): 113~123
- [2] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [3] Haxeltine A, Prentice I C. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**: 693~709
- [4] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, et al. Global biome model: Predicting global vegetation patterns from plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, **19**: 117~134
- [5] Haxeltine A, Prentice I C, Creswell I D. A coupled carbon and water flux model to predict vegetation structure. *Journal of Vegetation Science*, 1996, **7**: 651~666
- [6] 倪健. BIOME 系列模型: 原理与应用. 植物生态学报, 2002, **26** (4): 481~488
Ni Jian. BIOME models: Main principles and applications. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2002, **26** (4): 481~488
- [7] Ni Jian. A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their responses to global climate change. *Mountain Research and Development*, 2000, **20**: 80~89
- [8] Ni Jian, Sykes M T, Prentice I C, et al. Modeling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3. *Global Ecology and Biogeography*, 2000, **9**: 463~479
- [9] Cramer W, Moore III B M, Sahagian D. Global net primary productivity: A model intercomparison. Hibbard K, Sahagian D, Eds. IGBP/GAIM Report Series Report 5. GAIM Office, University of New Hampshire, 1998
- [10] 张时煌, 彭公炳, 黄玫. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取与数据融合. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 65~79
Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. The feature extraction and data fusion of regional soil textures based on GIS techniques. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 65~79
- [11] Food and Agriculture Organization. Soil map of the world 1: 5 000 000. U. N. Education, Science and Culture Organization. Paris. 1974
- [12] Leemans R, Cramer W. The IIASA climate database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a terrestrial grid. International Institute for Applied Systems Analysis. 1991
- [13] Monserud R A, Leemans R. The comparison of global vegetation maps. *Ecological Modelling*, 1992, **62**: 275 ~ 293
- [14] 杨正宇, 周广胜, 杨奠安. 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. 植物生态学报, 2003, **27** (5): 587~593
Yang Zhengyu, Zhou Guangsheng, Yang Dian'an. Comparison of simulated vegetation distribution in China produced by four popular climate-vegetation classification models. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2003, **27** (5): 587~593
- [15] 侯学煜. 中国植被图. 北京: 中国地图出版社, 1989
Hou Xueyu. *Vegetation Map of the People's Republic of China* (in Chinese). Beijing: China Map Publisher. 1989
- [16] Clapp R B, Hornberger G M. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 1978, **14** (4): 601~604
- [17] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.*, 1984, **20** (6): 682~690
- [18] 倪健. 区域尺度的中国植物功能型与生物群区. 植物生态学报, 2001, **26** (4): 481~488
Ni Jian. Plant functional types and biomes of China at a regional scale. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2001, **26** (4): 481 ~ 488
- [19] 刘华民, 吴绍洪, 郑度, 等. 潜在植被研究与展望. 地理科学进展, 2004, **23** (1): 62~70
Liu Huamin, Wu Shaohong, Zheng Du, et al. The study on the potential natural vegetation and future prospect. *Progress in Geography* (in Chinese), 2004, **23** (1): 62~70