

MTCLIM 模型(山地小气候模拟模型)的研究现状及其潜在应用

李海涛¹, 沈文清², 桑卫国³, 李家永¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所千烟洲农业生态站, 北京 100101;

2. 北京林业大学林业资源与环境学院生态环境系, 北京 100083;

3. 中国科学院植物研究所北京森林站, 北京 100093)

摘 要: MTCLIM 模型是许多生态、生理模型的分析工具。它能解释模型的结果, 分析一些生态、水文过程在不同气候条件下的变化趋势, 也是其它模型的辅助管理工具, 辅助建立不同环境条件下的生态管理方案。本文介绍了该模型的基本原理及其各变量较详细的计算方法, 概述其研究历史及发展现状, 及模型应用的几个重要方面及其发展趋势。

关键词: 气候模拟模型; 太阳辐射; 气温; 湿度; 降雨量

中图分类号: X16 P46

文献标识码: A

0 引言

气候数据在区域尺度以及全球尺度的生态系统应用中起着关键作用。太阳辐射是一切生命活动的能量来源, 生物的生长、生活、蒸发、大气环流等许多生态过程、水文过程都离不开辐射因子。温度和湿度等气候因子也控制着很多生理生态、水分平衡过程, 如: 气孔开闭、光合、蒸腾、生物生产力、植物进化适应^[1, 2]。1990 年 Peer, R. L.^[3] 概括了 19 个当代模型, 其中包括生物群系模型、生态系统过程模型、种群动态模型、农业模型, 它们都需要基本的气候变量, 表明了生态系统研究对气候数据需求的普遍性。一些水文生态模型^[4] 和森林生物生态系统过程模型^[5-7] 也需要太阳辐射、温度、湿度、水分作为输入值。但是, 很多研究地区由于地理位置的特殊性以及仪器设备不足, 气象站点少, 难以获得太阳辐射、温度、湿度、降水量的直接观测值。因此, 如何利用邻近有台站地区的资料来延长和推算无测站山区的气象资料, 既是生产实践的需要, 也是山地气候研究中迫切需要解决的理论问题。

多年来, 山地气候资料推算的研究方法多是在

外业考察的基础上建立起来的, 例如, 考虑纬度、海拔高度和地形的影响推算山区的平均温度、极端最低温和降水; 根据相关法推算山区各种农业界限温度出现日期; 利用期差法推算霜冻初终期; 根据地球资源卫星图片研究山区气候资源; 用物候法对山区的气候要素进行推算等。翁笃鸣等^[8] 还提出按天气过程和天气型考虑地形和冷空气的影响计算山区的温度, 并用统计理论得出与苏联按天气型加权平均订正观测温度方法相似的条件概率法, 用以订正气温和风。傅抱璞对山地的日照时间和辐射平衡各分量的计算、山地气候特征等方面做了一系列研究, 并著有《山地气候》一书, 系统地揭示和分析了山地气候变化的特点和规律, 提出了一套计算或推算山地各种气候要素的方法: 分离综合法、动力相似法和变换界限法^[9, 10], 这些研究成果是建立模型的重要基础。1970 年代以来, 大气环流模型被广泛地应用于模拟各种大气环流现象、研究气候变化以及人类活动对气候的影响等, 其工作多集中于研究全球尺度的环流特征及其平均状态, 或者研究各种边界条件对气候影响的敏感性。但由于该模型分辨率低, 尺度大, 而实际物理过程又细致复杂, 云量影响复杂,

收稿日期: 2001-07-31。

基金项目: 中国科学院知识创新工程(KZCX2-407)项目。

作者简介: 李海涛(1967-), 男, 副研究员, 研究方向为生态系统生态学和生态经济。现工作于中科院地理科学与资源研究所, 发表论文 30 余篇, E-mail: lht@igsnrr.ac.cn。

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

难以描述山地小气候状况^[11]。其它一些气候模型又多具有较复杂的模拟过程,使用起来较为困难,限制了其广泛应用^[12]。而MTCLIM 模型(山地小气候模拟模型)就是在前人研究的山地气候要素推算理论的基础上建立起来的,不仅模拟原理简单,所需数据容易获取,准确度较高,而且可用于空间上的外推。本文主要介绍这个模型的基本原理和研究现状。

1 MTCLIM 模型原理概要

MTCLIM (Mountain Microclimate Simulation Model) 模型是由一个点上观察得到的气候要素值经过海拔、坡度、方位的差异订正递推出另一个点上的气候要素,可以应用到附近任一点,是一个由点向面铺开的过程。其组成成分及其计算流程见图 1^[13, 14]。该模型起源于两个早期模型: H20TRANS 模型和 DAYTRANS 模型。它们以 1 小时和 1 日为时间尺度评估气孔控制机制在生态系统水平上的意义^[15, 16]。MTCLIM 模型是由两类气候学逻辑组成: 地形气候学和日气候学, 地形气候学把一地的气象状况通过空间递推应用到复杂地形, 日气候学可以从输入的温度、降水量得到辐射等其它的气象信息。主要的几个参数是基准点纬度、海拔、研究位点海拔、坡向坡度、反射率、大气透射率, 两个位点的等雨量图以及平均气温直减率。由于该模型建立在针叶林的基

础上, 而针叶林的气流、能量交换对风速不敏感^[17], 此外也不存在山地之间风的气候递推原理, 因此模型忽略风的影响。模型的输入文件需要三个变量: 每日降雨量、每日最高气温、每日最低气温。输出变量有每日入射短波太阳辐射、每日平均气温、湿度、降雨量等(至少有前四个)。MTCLIM 模型区别于其他气象模型的一个重要假设是“作用环境”的概念, 即关键的环境变量是在植物生理学基础上定义的, 而不是在气象学上定义的^[19]。日长根据具体需要来定义, 可为日出到日落间的时间段^[13, 14], 也可为太阳光强在植物光补偿点以上的时间段。在模型中光补偿点是描述植物作用环境的一个量值, 是气孔开闭、蒸腾、净光合作用为正的临界值。其大小因植被类型而变, 由它确定的日长一般为日出到日落时间段的 85%。通常, 湿度的表示方法有很多种, 如: 水汽含量、相对湿度、水汽压差, 露点温度^[20]。水汽含量是指一定体积空气内的水分总量, 如水汽密度就是这些量值中的一个称为绝对湿度; 相对湿度是空气样本内实际水汽含量与同温度下、同体积的饱和空气的水汽含量的百分比, 是可直接观测的最普通的湿度量值; 露点温度是指在没有水汽增加或排出的情况下, 空气等压冷却达到饱和时的温度。而饱和和水汽压差是空气中饱和水汽压与实际水汽压之差, 表示空气的干燥程度, 它是指示生境最有效的湿度指标, 在决定植物相对蒸腾率时起着重要的作用^[21]。另外, 植物在生理上对水汽压的变化比对湿

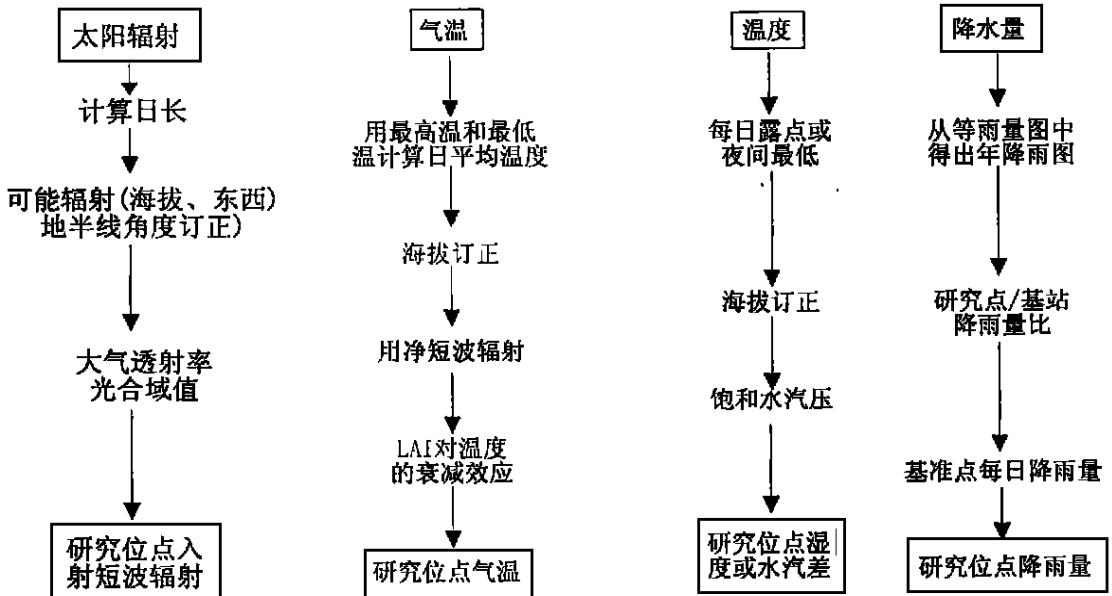


图 1 MTCLIM (山地小气候模拟模型)

Fig. 1 MTCLIM model(Mountain Microclimate Simulation Model)

度的变化更为敏感^[2]。所以, MTCLIM 模型中的湿度指标用饱和水汽差表示。该模型中的日平均气温不是指一天中最高温和最低温的数学平均值($T_{\text{mean}} = 1/2(T_{\text{max}} + T_{\text{min}})$), 而是加权平均气温($T_{\text{ave}} = T_{\text{mean}} + \text{AMP}(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$)^[22]。

各个变量的时间尺度一般为一天。一方面是因为这种尺度的数据容易获得; 另一方面是因为高分辨率的以一小时的时间步长需要大量的观察数据^[16], 低分辨率的以一周、一个月、一年为步长的时间尺度计算会使气候波动相抵成一个平均值, 导致生态系统水文区划错误^[23], 因而一天的时间尺度是生态模拟中高分辨率时间尺度和低分辨率时间尺度的最适合折衷。该模型建立的第一步是选择合适的天气气象数据库。选择的气象站原则为: 尽可能保证足够大的样本容量, 得到一个生长季完整的数据系列, 反应出物候上的一些趋势。这种气象站一般多为国家一级气象站或专业气象站^[14], 然后各个子程序如图 1 所示进行纵向订正递推, 模拟气象站附近各位点的气象变量值, 而且用于模型参数估计的站点必须与用于模型验证的站点不同。另外, 由于基准站点和研究位点两点间存在着大气质量、云量、降雨量差异, 递推精度随两点间的距离增加而降低。因而 MTCLIM 模型基准气象站的选择十分重要, 必须具有很大的代表性。

2 MTCLIM 模型研究历史和现状

MTCLIM 模型源于 1980 年代, 经过近 20a 的发展, 模型已趋于成熟, 其应用也得到较广泛的认识。这一过程主要分为两个阶段。

2.1 模型的建立

1983 年 Running, S. W. 等^[24]首次提出了 MTCLIM 模型的气候要素空间递推的基本思想, 并应用于生态模拟, 结果表明模型拟合效果较好。在此基础上, 1987 年 Running, S. W. 等^[13]第一次提出了 MTCLIM 模型, 经空间递推得到山地任一点的日入射短波辐射、日平均气温、湿度、降雨量, 并首次被应用于 DAYTRANS/PSN 模型计算半干旱美国西部针叶林的蒸散和光合。用 MTCLIM 推出的各气象变量计算的蒸散值(ET)与测量值计算的 ET 之差 < 5%, 与 PSN (Photosynthesis) 之差在 10% 以内; 两个模型的结合模拟结果表明: 北坡的光合季节平均值比南坡高 5%~31%, 与观察值相符^[13]。随后, 1989 年 Hungerford, R. D. 等^[14]概括了 MTCLIM 建立的逻辑

原则和各变量计算方程式。1994 年 Glassy, J. M. 和 Running, S. W. 对模型的有效性进行了验证^[25]。总之, 这一阶段是模型的萌芽建立时期, 现将模型中的变量计算作一简略说明。

1. 太阳辐射

太阳辐射的估算较为困难, 因为其观察数据不仅来源于半定量的日照计, 而且来源于定性的云量估计。Satterlund, D. R. 和 Means, J. E.^[26]和 Running, S. W. *et al*^[24]用这些定性半定量数据估算了太阳辐射, 结果表明, 由于所采用的计算模型简单, 云量记录少, 因而有很大的局限性, 很多时候不能使用。另外, 南北坡向小气候以及相应的森林植被类型有很大的差异^[16, 27]。因而在 Gamier, B. J. 和 Ohmura, A.^[28]以及 Buffo, J. 等^[29]和 Swift, L. W.^[30]计算太阳辐射的基础上, 1989 年 Hungerford, R. D. 等^[13]调整坡度、坡向及东西地平线角对太阳辐射的削减效应, 建立了计算直射和漫射太阳辐射的潜在辐射模型。日总大气透射率随日温度极差 ΔT 呈指数变化, 在气流活动较强的天气中, 气流的运动引起的温度变化会掩蔽了太阳辐射引起的辐射变化, 因而用两天最低温的平均值可以消除大尺度暖气流或冷气流的影响。

2. 气温

多年的实验研究表明: 温度变化轨迹为一条过三个象限的正弦线^[22], 因而计算平均温度是首先假设一天的温度变化轨迹为一条过三个象限的正弦线, 用基准点的最高温和最低温计算该点的日平均温。

长期以来, 许多气候学家发现随着海拔增高, 大气气压降低, 气温也随着发生变化, 随海拔高度增大而减小, 气温直减率一般为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$ ^[31]。直减率也随天气状况而变, 晴天降低 10%, 多云天增大 10%, 一般用平均值, 因而低于观察值^[12, 32]。晴天、多云天气的划分取决于实际辐射与潜在辐射的比值, 如果比值 < 0.5 则为多云天气^[14]。另外, 气温的计算还需要考虑方位的影响。在同一海拔高度上南坡温度高, 北坡温度低, 用可能太阳辐射计算的斜面与水平面辐射之比来调整方位差异。另外, 差异大小取决于坡面能量交换特性, 因植被而异, 裸露坡面温度方位差异大^[33], 郁闭冠层几乎没有差异^[34, 35], 所以也用 LAI 来调整温度的方位差异, 但 LAI 为 5.0 时温度就几乎没有方位差异。

3. 湿度

模型中湿度的计算有三个假设: ①露点在一天

内是稳定不变^[2,24,36]; ②在一天内的相对较大区域内, 露点在空间上是相对稳定的; ③夜间最低温近似于露点温度^[13]。

相对湿度为空气中实际水汽压与饱和水汽压之比, 用露点温度计算的水汽压为大气中的实际水汽压, 用平均温度算出的水汽压为该状况下的饱和水汽压。研究点的露点温度是由基准点的最低温度经气温直减订正而来^[32]。饱和水汽压的计算公式很多, 简便而有效又常用的为 Magus 方程的改写形式: $E = 6.1070 \exp(aT/(b+T))$, 其中 a, b 为蒸发系数, E 为水汽压, T 为温度^[37,38,39]。

4. 雨量

复杂山地上降雨时间及降雨持续期变化很大, 如以一天为时间尺度计算两位点的平均值比 (A_s / A_{b1}) 则误差大^[32], 因而用一年为时间尺度计算较精确。另外, 模型中降雨量计算可用一个基准站点, 也可用两个基准站点。但使用两个基准站点时, 基准站点必须在研究位点的正反两个方向。必须注意的一点是: 测量降水的精度受测站密度影响很大, 测站所代表的面积越大, 测量的误差也越大, 因而研究位点距离基准站点越近越好。

Hungerford, R. D. 和 Running, S. W.^[14] 及 Glassy, J. M. 和 Running, S. W.^[25] 对模型进行检验应用, 结果表明: 模型拟合效果很好, 可以很好地为许多生态、水文模型提供气象变量, 大尺度空间模拟应用结果更好, 但也存在几个问题:

(1) 当研究位点云量多于基准点时, 日太阳辐射估计偏高, 但季节平均值估计更准确。一般情况下, 山地云量都多于平地。因而可选山地点为基准点或选山地附近点为基准点^[40]。而当天气晴朗时, 由预测云量的较小的温度幅度引起的日辐射估算偏低的误差是难以克服。

(2) 气温直减率随季节不同, 用一年的平均值会有较大误差, 根据季节选择直减率可改善模型模拟结果, 最小气温直减率受地形影响大, 霜袋地、冷气流、逆温层使直减率变化很大^[32]。湿度的估计与温度密切相关, 结果与温度类似。

(3) 生长季节降雨量估计偏高, 因为较干旱的谷地冬天降雨量差异大于生长季节, 又用年平均值计算。可能根据需要具体使用某一阶段的平均值会大大改善估计结果。但两点距离越大, 估计偏差越大。

(4) 模型模拟结果与景观单元的划分有关, 气候均质区划分越准确, 模拟结果更好。

2.2 模型的发展时期

由于太阳辐射计算的复杂多变, 实际上, MTCLIM 模型的发展变化是伴随太阳辐射计算公式的改善而进行的。1997 年以前, 模型只是作了一些细节上的修改, 如: 日长不再由光补偿点确定, 而为日出到日落的时间段; 温度没有辐射和叶面积指数的订正; 只应用一个基准点估计降雨量。1997 年以后, 除降雨量只使用一个基准点外, 模型的其它变量有很大的改善: 1997 年 Kimball^[40] 发现, 在不同的气候区中露点温度与最低温度的关系是有很大差别的, 在干旱气候条件下, 两者间的差异一直很大, 年平均值可相差 11°C , 这使得分别由两个温度计算的水汽压相差 $0.8\text{kPa} \sim 1.2\text{kPa}$, 而且这种差异在 4~10 月比较温暖的季节中尤其突出; 在半干旱区, 露点温度与最低温度的差异要稍小些, 年平均为 5°C , 但 10~次年 3 月气温低, 两者之间差异更小, 平均为 2°C , 这时估算的水汽压只相差 0.1kPa , 4~10 月的两种温度及相应的水汽压分别相差 7°C 和 0.6kPa , 而且在干旱、半干旱区, 露点温度常常小于最低温度; 在湿润的气候区中, 露点与最低温的差异很小, 年平均为 1°C , 相应的水汽压相差 0.3kPa , 而且露点可能高于也可能低于最低温, 但由此估算的水汽压差异很小。因而, Kimball 用气温、蒸发、降雨的关系建立估算露点温度的经验模型, 从而使得水汽压的估算更加完善。1999 年 Thornton 和 Running^[41] 进一步完善了辐射的计算, 不仅考虑了大气分子、大气光学质量和水汽压的影响, 还对透射率与温差的关系重新拟合, 漫射率和直射率用每日大气透射率的函数表示^[43], 从而使得模型有更广泛的实用性。由于复杂山地地形线的遮蔽, 水平能见度有很大的变化, 这大大削弱了到达坡面上的辐射, 而且山地积雪增强了反射率, 使得漫射辐射增强, 这都使原有的估算辐射效果减弱。因而, 2000 年 Thornton 等^[42] 又考虑了这些因素的影响, 大大提高了模型的应用率。总的来说, 有以下几个方面的改进:

1. 露点计算不再仅仅近似于最低温, 用可能蒸散与降雨量比值来确定它的干旱订正。在气候均一区中, 每一天的露点是稳定不变的。气温的递推忽略了下垫面的影响, 而只考虑海拔的影响。

2. 太阳常数不再假设为稳定的, 而是随时间变化的。

3. 辐射的计算有很大改进。大气透射率与气压、大气光学质量、水汽压有关, 漫射率用每日大气

透射率的函数表示^[44], 而且考虑了地平线障碍和积雪场对漫射的影响。

4. 各个变量的计算紧密相关, 尤其是太阳辐射和露点湿度, 太阳辐射的估算需要露点求水汽压对它的影响, 而露点的订正需要辐射计算蒸发的变化, 因而两者的模拟需要迭代订正。当有露点温度输入时, 直接用露点温度估算太阳辐射和湿度。当没有提供露点温度时, 需要重复计算太阳辐射和露点温度。首先假设露点温度近似等于最低温, 用露点温度计算水汽压、太阳辐射; 再用太阳辐射计算可能蒸散^[21, 45], 确定露点温度的计算方法: 如果可能蒸散 PET 与年降雨量 P 的比 > 2.5 , 则进行干旱订正, 如果 < 2.5 , 则 $T_{dew} = T_{min}$; 用订正后的露点温度重新计算太阳辐射, 方法与前同; 最后用重新估算的太阳辐射计算露点, 进而求出湿度。

3 MTCLIM 模型的潜在应用

一般来说, 在需要天气数据又不能直接得到天气观察值时都需要使用 MTCLIM, 进行气候要素在空间上的外推。其外推值可作为生态系统、生长产量、病害行为、森林更新等模型的输入值, 检验各个模型在不同的环境条件下的可靠性, 也可用于研究病害发生时间、发生原因, 评估不同地形、立地条件的各种差异。因而, MTCLIM 模型可作为其他模型的分析管理工具, 辅助建立不同气候区域内的经营管理策略, 但在应用过程中 MTCLIM 的输出精度必须与应用模型的输入精度一致。

3.1 在生态—水文模拟中的应用

森林的结构组成成分受气候和地形因子的影响, 生态系统的结构和功能也受气候环境的影响, Gholz, H. Z.^[46] 指出生物量、叶面积、NPP 与水分、冬天低温有很大的相关性, 尤其是在高山地区; Runyon, J.^[47] 研究了有效太阳辐射与 NPP 的关系, 探讨了辐射影响净第一性生产力(NPP)的机理, 在一定程度上说明了不同森林生态系统碳贮量的差异。因而生态模拟离不开气象资料的应用。许多生态模型包括区域尺度甚至全球尺度的水循环问题, 还涉及到光合、蒸腾、分解、养分循环等生态过程^[19]。在很多生态应用中, 尤其是气象条件变化很大的山区, 气象资料的贫乏阻碍了这些生态模型的应用, 需要通过其外推至所研究的地点。

MTCLIM 对于水平衡研究也是极其重要, 计算水分平衡和小流域上的森林生态系统过程要应用

MTCLIM 的各个输出变量^[4]。局地范围内光合、蒸散、生产力及生物量的研究有很多。RHESSys (Regional Hydrology and Ecology Simulation System, 区域水文生态模拟系统)把水文生态过程统一起来, 是两个生态系统模型的结合体: 一个是 MTCLIM 模型, 用来得到气候要素; 另一个是 BGC(生物地球化学循环模型), 用 MTCLIM 模型模拟的气候要素来估算研究位点的碳、氮和水循环的各个指标值。Running, S. W. 等^[5, 6]就把 MTCLIM 和 FOREST-BGC 两个模型结合起来应用, 模拟出的光合、蒸散值无论是与实际观察值还是与用常规气象观测数据模拟出的光合、蒸散值都相差不大; 而这两个模型另一结合也成功模拟了区域尺度内碳、氮的动态分配^[7]。这是 MTCLIM 模型应用最多的一个方面。由于气候要素的应用, 使得全球气候变化和全球植被变化的研究进展很快。另外, 植物演替著名模型 JABOWA^[48]用气候要素作输入值研究生态过程和预测树木生长和干扰演替。另一演替模型 SILVA 及 FIRESUM 模型应用 MTCLIM 有效地模拟了火、病虫害的干扰下的演替过程^[49]。随着模拟模型的发展和专家系统的产生^[50], MTCLIM 将得到更广泛的应用。

3.2 在造林学上的应用

森林的潜在生产力及立地质量研究在不同程度上都要应用立地小气候。Running, S. W.^[15, 16]用计算机模拟小气候对森林生产力的控制状况, 分析了不同环境条件下控制生产量的主导气象因子。生长产量的机理过程模型也要用气象数据为输入值。光合产量与长期的生产有关, Running 等将光合蒸腾模型 DAYTRAN /PSN 与 MTCLIM 模型结合, 估计了小气候对生产力的影响, 提出了一个评估立地相对生产力的方法^[15, 16]。另外, 较小的气候差异会引起较大的光合变化^[13], 这种差异与方位有关。Tesch, S. D.^[49]发现南北坡的生产力有很大的差异。因而 MTCLIM 与生长模型的结合应用可提高评估立地反应及造林方案的能力, 这些生长模型如 FIRESUM^[49]和 DAYTRANS /PSN^[16]。

植被与环境条件的变化相适应, 生境类型可作为区分相似的立地单元的指标。但气象站常常位于没有森林的谷底, 要用 MTCLIM 研究生境内或不同生境之间的天气变化情况, 建立合适的造林方案。另外, 更新演替需要 MTCLIM 寻找影响更新的关键因素, 确定引种的最佳方法。

3.3 林火研究中的应用价值

天气数据对估计火的危害、火行为的发生, 建立

可控火烧方案是极其重要的。NFDRS、BEHAVE 等^[51, 52] 火烧模型都说明了气象数据对控制火烧的重要性, MTCLIM 模型可完善数据收集的方法以及林火管理方案。

3.4 在病虫害预测预报上的应用

天气和小气候的变化直接影响着病虫害的活动和植被的防御能力^[53]。因而 MTCLIM 模型输出量可辅助评估各种森林流行病害的发生发展状况, 有助于增加人们对立地与病害关系的了解。另外, 基于天气变量的病虫害预测预报也有助于病虫害在最适的时间中得到最大控制, 降低各种费用, 达到高效的目的。

4 模型的发展趋势

温带气候数据库很多, 以往的 MTCLIM 研究多集中在温带, 而热带气象站点少, 这方面的研究也少。模型的迅速发展要求气象观测网络分布全球化, 因而热带区域的研究不断增多^[53], 复杂的地形将使 MTCLIM 模型走向两种趋势:

4.1 遥感和 GIS 在 MTCLIM 模型发展中的综合应用

在山地小气候模拟过程中, 大量数据资料的获得除了利用参数估计法、现有的数据库外, 遥感的信息提取法将大有应用潜力。遥感中多时段、多光谱、大范围的监测和灵活的空间统计能力不仅是获得数据资料得一种经济有效的方法, 而且使得其在解决气候模型中的输入参数的时空连续性时具有独特的优势。GIS 也广泛应用于获取地形要素, 用 DEM 模型估计地平线角^[54]。随着空间技术的进一步发展, 遥感信息的分辨率、准确性和现时性大幅度提高, GIS 空间数据的高效动态更新成为可能, 且 GIS 能根据遥感信息的特征模型, 综合处理和分析多元遥感数据, 为其它研究提供辅助决策, 改进遥感信息监测效果。遥感和 GIS 的综合应用将使 MTCLIM 的研究取得突破性进展^[19]。

4.2 MTCLIM 模型的三维化

现实的景观是三维的。MTCLIM 模型不可避免地涉及到地形、地貌等具有空间特性的环境要素, 因而明显具有二维、三维的空间特性。许多基于 MTCLIM 的生态过程模型也从一维发展到二维, 对气象变量提出更高的要求^[55]。因而, 要求 MTCLIM 模型在考虑时空变化的同时, 也要考虑气候要素的三维化。

参考文献:

- [1] Choudhury, B. J.; Monteith, J. L. 1986. Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agric. For. Meteorol.* 36: 215—225p.
- [2] Grantz, D. A.; 1990. Plant response to atmospheric humidity. *Plant, Cell Environ.* 13: 667—679p.
- [3] Peer, R. L. 1990. An overview of climate information needs for ecological effects models. Contract number 68—02—4288. Atmospheric Sciences Modelling Division Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration. Research Triangle Park, North Carolina, USA.
- [4] Band, L. E.; Peterson, D. L.; Running, S. R.; Coughlan, J.; Lambers, R.; Dungan, J.; Nemani, R. R. 1991. Forest ecosystem processes at the watershed scale: basic for distributed simulation. *Ecological modeling* 56: 171—196p.
- [5] Running, S. W.; Coughlan, J. C. 1988. FOREST—BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42: 125—154p.
- [6] Running, S. W.; Nemani, R. R.; Peterson, L. E.; Band, D. F.; Potts, L. L.; Pierce, S. M. A. 1989. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis and coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology* 70: 1090—1101p.
- [7] Running, S. W.; Gower, S. T. 1991. FOREST—BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology* 9: 147—160p.
- [8] 翁笃鸣等. 大寨大队沟、梁、坡地的小气候分析[J]. 南京气象学院学报, 1978, 1978(1).
- [9] 傅抱璞. 山地气候. 北京, 科学出版社 1983.
- [10] 傅抱璞. 山地气候研究的若干问题[A]. 见: 山地气候文集[C]. 北京: 气象出版社 1984.
- [11] 董敏, 李跃凤, 沈文海. 东亚气候的模拟与验证研究[J]. 气象学报, 1997, 55(6): 692—702p.
- [12] Bruhn, J. A.; Fry, W. E.; Fick, G. W. 1980. Simulation of daily weather data using theoretical probability distributions. *J. Appl. Meteor.* 19(9): 1029—1036p.
- [13] Running, S. W.; Nemani, R.; Hungerford, R. D. 1987. Extrapolation of meteorological data in mountain terrain, and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 472—483p.
- [14] Hungerford, R. D.; Nemani, R. R.; Running, S. W.; Coughlan, J. C. 1989. MTCLIM: a mountain microclimate simulation model. Research Paper INT—414. USDA Forest Service Intermountain Research Station, Ogden, Utah, USA.
- [15] Running, S. W. 1984a. Documentation and preliminary validation of H2O TRANS and DAY TRANS, two models for predicting transpiration and water stress in western coniferous forests. Res. Pap. RM—252. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 45p.
- [16] Running, S. W. 1984b. Microclimate control of forest productivity: analysis by computer simulation of annual photosynthesis/transpiration

- balance in different environments. *Agri. For. Meteorol.* 32: 267 ~ 288p.
- [17] Smith, W. K. 1980. Importance of aerodynamic resistance to water use efficiency in three conifers under field conditions. *Plant Physiology*. 65: 132 ~ 135p.
- [18] Mason, H. L.; Langheim, J. H. 1957. language analysis and the concept of environment. *Ecology* 38: 325 ~ 339p.
- [19] Waring R. H.; Running, S. W.. 1998. *Forest ecosystems*. 2nd Academic Press, San Diego, London.
- [20] Barry, R. G.; Chorley, G. S. 1987. *Atmosphere weather and climate*. Fifth edition. Routledge, London, England.
- [21] Monteith, J. L.; Unsworth, M. H. 1990. *Principles of environmental physics*. EDWARD Arnold, London, England.
- [22] Parton, W. J.; Logan, J. E. 1981. A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agricultural Meteorology*. 23: 205 ~ 216p.
- [23] Nemani, R. R.; Running, S. W. 1985. Use of synoptic weather data to drive ecological models. In: 17th conference on agriculture and forest meteorology. Boston, MA: American Meteorology Society: 252 ~ 255p.
- [24] Running, S. W.; Hungerford, R. D. 1983. Spatial extrapolation of meteorological data for ecosystem modeling applications. In: *Proceedings of 16th conference on agriculture and forest meteorology*. Boston, MA: American Meteorology Society: 192 ~ 195p.
- [25] Glassy, J. M., Running S. W. 1994. Validating diurnal climatology logic of the MT-CLIM model across a climatic gradient in Oregon. *Ecol. Appl.* 4(2): 248 ~ 279p.
- [26] Satteland, D. R.; Means, J. E. 1978. Estimating solar radiation under variable cloud conditions. *Forest Science*. 24(3): 363 ~ 373p.
- [25] Glassy, J. M.; Running S. W. 1994. Validating diurnal climatology logic of the MT-CLIM model across a climatic gradient in Oregon. *Ecol. Appl.* 4(2): 248 ~ 679p.
- [27] Tesch, S. D. 1981. Comparative stand development in an old-growth Douglas-fir forest in western Montana. *Canadian Journal of Forest Research*. 11: 82 ~ 89p.
- [28] Garnier B. J.; Ohmura, A. 1968. A method of calculating the direct shortwave radiation income of slopes. *Journal of Applied Meteorology*. 7 (5): 796 ~ 800.
- [29] Buffo, J.; Fritschen, L.; Murphy, J. 1972. Direct solar radiation on various slopes from 0 to 60 north latitude. *Res. Pap. PNW-142*. Portland, OR: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. 74 p.
- [31] Barry, R. G.. 1992. *Mountain Weather and Climate*. 2nd Ed. Routledge, London.
- [32] Finklin, A. I. 1983. *Climate of Priest River Experimental Forest, northern Idaho*. Gen. Tech. Rep. INT-159. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 53 p.
- [30] Swift, L. W. 1976. Algorithm for solar radiation on mountain slopes. *Water Resources Research*. 12(1): 108 ~ 112p.
- [33] Parker, J. 1952. Environmental and forest distribution of the Palouse Range in northern Idaho. *Ecology*. 33(4): 451 ~ 461p.
- [34] Kaufmann, M. R. 1984. Effects of weather and physiographic conditions on temperature and humidity in subalpine watersheds of the Fraser Experimental Forest. *Res. Pap. RM-251*. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 9p.
- [35] Sader, S. A. 1986. Analysis of effective radiant temperatures in a Pacific Northwest forest using thermal infrared multispectral scanner data. *Remote Sensing of the Environment*. 19: 105 ~ 115.
- [36] McCutchan, M. H. 1977. Climatic features as a fire determinant. *Gen. Tech. Rep. W-3*, USDA Forest Service. 11.
- [37] Muny, F. W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*. 6: 203 ~ 204.
- [38] Abbott, P. E.; Tabony, R. C. 1985. The estimation of humidity parameters. *Meteorol. Mag.* 114: 49 ~ 56.
- [39] 董双林, 崔宏光. 饱和水汽压计算公式的分析比较及经验公式的改进[J]. *应用气象学报*. 1992. 3(4): 501 ~ 507.
- [40] Bristow, K. L.; Campbell, G. S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. 31: 159 ~ 166.
- [41] Kimball, J. S.; Running, S. W.; Nemani, R. R. 1997. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. *Agri. For. Meteorol.* 85: 87 ~ 98p.
- [42] Thornton, P. E.; Hubert, Hasenauer, Michal, a. White. 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agri. For. Meteorol.* 104: 255 ~ 271p.
- [43] Thornton, P. E.; Running, S. W.. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agri. For. Meteorol.* 93: 211 ~ 228p.
- [44] Jones, H. G. 1992. *Plant and Microclimate*. University Press, Cambridge. 428p.
- [45] Flint, Alan L.; Childs, Stuart W.; 1991 use of the Priestley-Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut. *Agri. For. Meteo.* 56(1-2): 247 ~ 260p.
- [46] Gholz, H. L.. 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology*. 63(2): 469 ~ 481p.
- [47] Runyon, J.; Waring, R. H.; Goward, S. N.; Welles, J. M. 1994. Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect. *Ecological Applications* 4: 226 ~ 237p.
- [48] Botkin, D. B. 1981. Causality and succession. In: West, D. C.; Shugart, H. H.; Botkin, D. B., eds. *Forest succession: concepts and application*. New York: Springer-Verlag 36 ~ 55.
- [49] Keane, Robert E.; Aron, Stephen F.; Brown, James K. 1989. *FIRESUM—An ecological process model for fire succession in western conifer forest*. Gen. Tech. Rep. INT-266. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 76p.
- [50] Coughlan, J. C.; Running, S. W.. 1997. Biophysical aggregation of forested landscape using an ecological diagnostic system. *Transactions in GIS*. 1: 25 ~ 39p.

- [51] Fuman, R. W.; Brink, G. E. 1975. The National Fire Weather Data Library: what it is and how to use it. Gen. Tech. Reep. RM-19. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 9 p.
- [52] andrews, Patricia L. 1986. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system—BURN subsystem, Part 1. Gen. Tech. Rep. INT-194. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 130 p.
- [53] Porter, J. H.; Pamy, T. R. 1992. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. Agri. For. Meteorol. 57(3): 221 ~240p.
- [54] Proy, C.; Tanre, D.; Deschamps, P. Y. 1989. evaluation of topographic effects in remotely sensed data. Remote Sens. Environ. 30: 21 ~ 32p.
- [55] Nemani, R. R.; Running, S. W.; Band, L.; Peterson, D. . 1993. Regional hydro ecological simulation system: an illustration of the intergration of ecosystem models in a GIS. Pages 296 ~ 304 in M. Goodchild, B. Banks and L. Steyer, editors. Integrating GIS and environmental modeling. Oxford, London, England.

Research Situation and Application of MTCLIM Model (Mountain Microclimate Simulation Model)

LI Hai-tao¹, SHEN Wen-qing² and SANG Wei-guo³

- (1. *Institute of Geographical Research and Resources, Chinese Academy of Science, Beijing 100101 China;*
 2. *Department of Resource and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083 China;*
 3. *Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Beijing 100093 China*)

Abstract: MTCLIM model is an analytical tool for many other ecological and physiological models. It can explain the results of the concerned models, analyze the trends of some ecological and hydrological processes based on different climatic regimes, and become a supplementary management tool for these models to develop the management alternatives under different environmental conditions. This paper introduced the basic principles of this model and the calculation formulae of its climatic parameters, reviewed its history and current development, and summarized the several aspects of its application and its future development.

Key words: climate simulation model, solar radiation, air temperature, humidity, precipitation.