

## 基于小网格的北京山区植物气候生产力及其限制因子分析

田志会<sup>1,2</sup> 李凤琴<sup>1,3</sup> 郭文利<sup>4</sup> 赵新平<sup>4</sup> 王志华<sup>4</sup> 王有年<sup>2</sup> 郑大玮<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094; 2. 北京农学院,北京 102206;

3. 河北农业大学,保定 071001; 4. 北京市气象局气候中心,北京 100089)

**摘要** 利用北京山区 1 km<sup>2</sup> 网格的气候资料,应用桑斯维特纪念模型与迈阿密模型对各网格点的植物气候生产力进行了估算,并利用地理信息系统软件 ArcGis 与 ArcView 对估算结果进行了可视化处理。结果显示,北京山区植物气候生产力总体分布趋势由东向西递减,高值区集中在东北部山区的平谷中部及密云南部;低值区主要集中在西部山区包括门头沟西部、延庆、怀柔北部地区。除部分海拔较高的中山区以外,水分条件是北京山区植物气候生产力的主要限制因子,大部地区水分亏缺量在 130~260 mm。用遥感方法对 2 种模型的估算结果进行了验证,模型估算结果与北京山区植被指数(NDVI)的相关性均达到了 0.01 的显著性水平,且桑斯维特纪念模型的估算结果好于迈阿密模型。

**关键词** 小网格;地理信息系统;植物气候生产力;限制因子;植被指数

中图分类号 S 162.3

文章编号 1007-4333(2004)06-0021-06

文献标识码 A

### Analysis of plant climatic production potential and its restricting factors of 1 km<sup>2</sup> grid of Beijing mountain area

Tian Zhihui<sup>1,2</sup>, Li Fengqin<sup>1,3</sup>, Guo Wenli<sup>4</sup>, Zhao Xinping<sup>4</sup>, Wang Zhihua<sup>4</sup>, Wang Younian<sup>2</sup>, Zheng Dawei<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Department of Forestry, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China; 3. College of Urban and Rural Construction,

Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 4. Beijing Climate Centre, Beijing 100089, China)

**Abstract** The plant climatic production potential (PCPP) of Beijing mountain area separated into 1 km<sup>2</sup> grids was calculated with Miami and Thornthwaite-Memorial model using climatic data. The PCPP data were finally transferred to visual images with a software of ArcGis and ArcView. The results showed that the PCPP decreased form east to west. The northeast parts of southern Miyun and middle Pinggu had a highest PCPP, but the lowest PCPP was found the west of Mentougou County, the north of Huairou County and the most part of Yanqing County, where both the temperature and precipitation were low. Except the high altitude area, water condition was the main limited factor of the PCPP in this region. The conclusion was confirmed by the results of the analysis with the Miami model. The water deficit was at the range of 130 - 260 mm. The result of the PCPP was validated by the method of remote sensing. The relationship between the PCPP and NDVI was significant at to 0.01 level. The estimated results of Thornthwaite-Memorial model was better than the Miami model.

**Key words** grid; geographic information system (GIS); plant climatic production potential; restricting factor; NDVI

植物气候生产力指某一地区植物群体在土壤、肥力等其他条件满足其生长发育的情况下,由光、热、水等气候因子决定的单位土地面积上植物最大

生物量,包括地上和地下部分。植物形成的生物产量是其自身生物学特性与外界环境因子相互作用的结果。空气中的 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 含量、土壤肥力等都是

收稿日期: 2004-06-14

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(6031001)

作者简介: 田志会,副教授,博士研究生;郑大玮,教授,通讯作者,主要从事农业气象学,生态学研究, E-mail: zhengdawei44@263.net

比较固定的因子,而气候则随时空变化较大;因此,某一地区的植物生物产量主要决定于该区域的光、热和水。植物气候生产力的估算对于合理利用气候资源,充分发挥气候生产潜力,寻找提高生产力的途径,特别是对于当前评价全球气候变化对生态系统的影响,制定相应对策,具有重要的理论和现实意义。国内外非常重视这一工作,很多研究者在该领域作了大量工作<sup>[1~8,11~13,16]</sup>,但大多研究主要应用常规气象台站的气候资料进行植物气候生产力的估算。我国是多山国家,山区地形复杂,气候多样,测站稀少且所测资料时间序列短,仅仅利用有限的测站资料估算山区植物气候生产力会与现实植物生产力产生较大差异<sup>[3]</sup>;因此,本研究利用小网格气候资料对山区植物生产力的估算有实际意义。

笔者以拥有62%山区面积的北京市作为研究对象,尝试采用小网格研究方法,利用北京地区1 km<sup>2</sup>网格点的气候资料,估算北京山区植物气候生产力,在此基础上,进一步分析了北京山区限制植物气候生产力的因子,旨在为充分利用山区气候资源,合理布局农、林、牧产业,实现山区可持续发展提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

北京地区1 km<sup>2</sup>网格点的气候资料及地理地形资料由北京市气象局气候中心提供,气候资料包括各网格点年降水量、各月平均气温值,地理地形资料主要包括经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向等。因气候资料在计算过程中已考虑了地理地形(经度、纬度、遮蔽度、海拔高度、坡度、坡向等)因素的影响<sup>[9,10]</sup>,因此在计算各网格点的植物气候生产力时直接使用各网格点的月平均温度、年降水量进行计算。

### 1.2 研究方法

山区植物气候生产力的估算采用比较成熟、国际上通用的桑斯维特纪念模型<sup>[7]</sup>和迈阿密模型<sup>[3]</sup>。

桑斯维特纪念模型:

$$TSP(v) = 3000 / [1 - \exp(-0.0009695(v - 20))] \quad (1)$$

式中:  $TSP(v)$  为以年平均蒸散量为自变量计算出的植物干物质总量,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $v$  为年平均实际蒸散量,  $\text{mm}$ 。由式(2)<sup>[2]</sup>计算

$$v = \frac{1.05p}{\sqrt{1 + (1.05p/l)^2}} \quad (2)$$

式中:  $p$  为年降雨量,  $\text{mm}$ ;  $l$  为年平均最大蒸散量,可用下面的 Ture 公式计算<sup>[2]</sup>

$$l = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (3)$$

式中:  $t$  为年平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

迈阿密模型:

$$1. \quad TSP(t) = 3000 / [1 + \exp(1.315 - 0.119t)] \quad (4)$$

$$2. \quad TSP(p) = 3000 / [1 - \exp(-0.000664p)] \quad (5)$$

式中:  $TSP(t)$  和  $TSP(p)$  为根据年平均气温和年平均降水量计算的植物干物质总量。

利用模型1,2分别算出  $TSP(t)$  和  $TSP(p)$ , 然后根据 Liebig 的限制因子定律,采用  $TSP(t)$  和  $TSP(p)$  中最小值作为计算点的植物气候生产力。

### 1.3 资料处理

网格点气候生产力的计算利用 Java 语言编程实现。由于所计算的数据容量巨大,为180行175列,难以直观反映气候生产力的空间分布,因此采用美国环境系统研究所(ESRI)开发的地理信息系统软件 ArcGIS 与 ArcView 将网格数据进行了可视化处理。网格坐标系采用北京地方坐标系,县界底图由北京市气象局气候中心提供。

## 2 结果分析

将所需参数分别带入桑斯维特纪念模型和迈阿密模型,计算出每个网格点的植物气候生产力,然后进行可视化处理,结果见图1~4。

### 2.1 植物气候生产力的空间分布

由于桑斯维特纪念模型以体现多个气象要素综合影响的年平均实际蒸散量来建模,计算结果要比迈阿密模型更为合理,更加接近生产实际,故以此模型的计算结果作为北京山区植物气候生产力的估算值。如图1所示:北京山区植物气候生产力的平均值为  $963 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,最小值为  $617 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,最大值为  $1116 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,总体分布趋势由东向西逐渐减少,存在3条明显的等值线。第1条为  $1061 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,此线所包围的区域为高值区,位于平谷中部地区、密云南部地区,所占区域范围较小,气候生产力大于  $1061 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。第2条为  $1005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,此线以东为次高值区,此区范围最大,主要集中于山区东部地区,包括房山东南部、昌平东部、门头沟区东部边界区、怀柔东南部、密云南部大部分地

区,气候生产力介于  $1\ 005 \sim 1\ 061\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  之间。第 3 条为  $894\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,此线以东区域,主要包括房山西北部、门头沟中部地区、昌平西部地区、延庆东南部地区、怀柔中部地区,气候生产力  $894 \sim 1\ 005\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;此线以西地区为植物气候生力低值区,包括门头沟西部地区、延庆大部、怀柔北部地区,气候生产力低于  $894\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中位于延庆县的灵山顶部植物气候生产力只有  $617\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,是北京市植物气候生产力最低的地区。

## 2.2 植物气候生产力的限制性因子

利用迈阿密模型对北京山区各网格点植物气候生产力的估算结果见图 2~4。

北京山区由年平均气温估算的植物气候生产力平均值为  $1\ 332\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而由年降水量估算的植物气候生产力平均值为  $984\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,仅相当于由年平均气温所决定的气候生产力的 73%。图 2 山区由年平均气温估算的气候生产力高值区主要出现在房山东南部、昌平东部、密云、平谷南部热量较丰富的地区,低值区主要出现在北京的西部和西北部的门头沟西部地区、延庆西部和西北部地区、怀柔北部热量较少的地区。根据年平均降水量计算的植物气候生产力最大值为  $1\ 272.64\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,与年平均气温决定的气候生产力相比低  $400\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,高值区主要出现在水资源较丰富的东北部山区,包括平谷、密云东部地区,低值区主要分布在水分条件较差的西部和西北部山区,包括门头沟西部地区、延庆、怀柔北部地区。由图 2 和 3 可知除了西部极少数高海拔地区的植物气候生产力受制于热量条件外,其余绝大部分地区热量条件均不成为气候生产力的限制因子,水分条件是限制植物产量提高的主要因子。例如:位于延庆盆地的康庄、延庆镇、张山营等乡镇由水分限制引起的植物气候生产力损失达  $500 \sim 600\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;位于房山东部的山前暖区由于水分条件的限制引起的植物气候生产力的损失竟高达  $700\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  以上。

图 4 是根据 Liebig 限制因子定律取最小值后的结果,植物气候生产力的平均值为  $982\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,与桑斯维特纪念模型的计算结果  $963\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  相近,分布的总体趋势是由东向西逐渐降低,与北京市的年平均降水量的分布趋势基本一致,高值区位于水分条件较好的东北部山区的平谷及密云东南部地区,最高值可达  $1\ 240.84\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,低值区主要分布在水分条件较差的延庆盆地地区,最低值位于康

庄。另外,在房山的东南部地区虽然有较好的热量条件,但由于水分条件的限制使其气候生产力明显降低。以上分析再一次证明水分条件是北京山区植物气候生产力的限制性因子,提高植物生产力必须解决水的问题。

利用公式 (2), (3) 及 ArcView 的空间分析功能,分别计算了各网格点年平均实际蒸散量达到年平均最大蒸散量时需补充的水量,据此确定山区各地水分亏缺程度,结果经 ArcView 可视化处理后如图 5 所示。由图 5, 6 可知,海拔较低,热量条件较好的缓坡丘陵区 and 盆地需补充的水量较多,如延庆盆地、房山东部、昌平东南部、怀柔东南部等地区,补充水量为  $180 \sim 260\ \text{mm}$ 。而海拔较高的地区,因热量条件的限制,蒸发力较弱,需补充水量较少,为  $55\ \text{mm}$  以下。其余大部分低山丘陵区需补充水量在  $130 \sim 180\ \text{mm}$ 。以上估算结果与文献 [18] 所给出的北京地区年平均水分亏缺量  $221\ \text{mm}$  的结果是一致的,由于采用  $1\ \text{km}^2$  小网格的研究方法,可以更详尽的描述山区不同区域的水分亏缺状况。

缺水限制了北京山区植物生物产量的提高,而且光热资源丰富的山前暖区及山间盆地缺水越发严重,而在山区希望通过灌溉补充所缺水量是很难实现的;因此,山区植物生物产量的提高主要应通过发展节水农业,应用先进的农业节水技术措施以及合理布局农林牧产业,提高植物水分利用率等途径实现。同时,增大山区植被覆盖度,减少水土流失,增大土壤的蓄水量等也是减少由于缺水所引起的植物生物产量损失的有效措施。

山区在农林牧业布局时,应充分考虑当地水资源状况,因地制宜安排农业生产。在水分条件较好海拔较低的东北部山区,可在河谷区适当种植粮食作物,在缓坡丘陵地带发展果树,其他中、低山区应大量植树造林,以达到保持水土涵养水源的生态功能。西部与西南部山区,水分条件都较差,应压缩耗水量较大的粮食作物,在水分条件相对较好的山间谷地适当发展果树,山坡退耕,阴坡发展林业,阳坡和低海拔山坡应发展需水量较少、水分利用率较高的牧草和耐旱灌木,畜牧业以发展草食畜牧业为主。

## 2.3 植物气候生产力估算结果的验证

由于植被指数 (NDVI) 和绿色生物量之间有很好的相关性<sup>[20]</sup>,利用由遥感方法获得的北京山区 NDVI 对 2 种模型的估算结果进行了验证。NDVI 结果是基于 2003 年 7 月 28 日的一景 MODIS 1B 遥

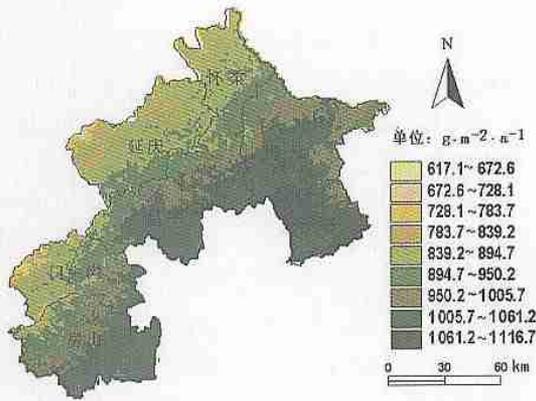


图1 桑斯维特纪念模型估算的植物气候生产力  
Fig.1 PCPP of Thornthwaite-Memorial model

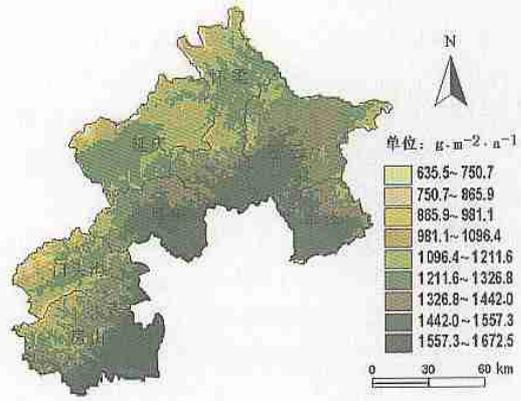


图2 迈阿密模型1估算的植物气候生产力  
Fig.2 PCPP of Miami model 1

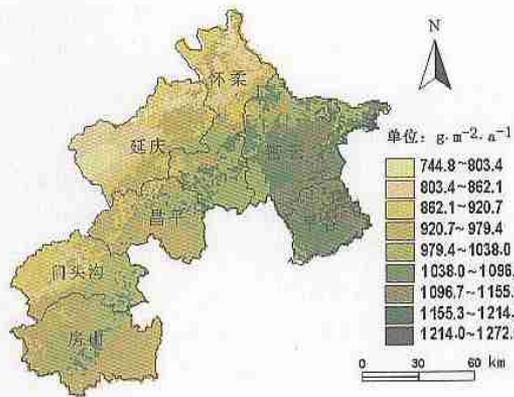


图3 迈阿密模型2估算植物气候生产力  
Fig.3 PCPP of Miami model 2

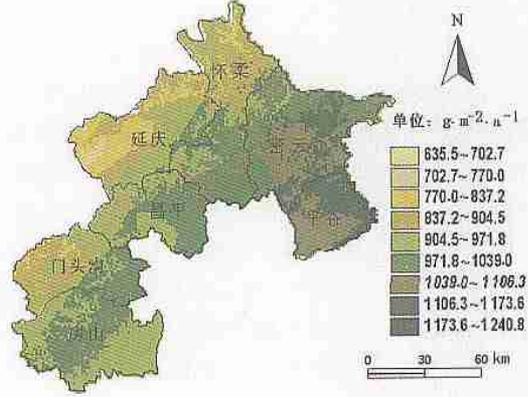


图4 Liebig限制因子定律取最小值后的植物气候生产力  
Fig.4 Minimum PCPP of Miami model 1 and 2

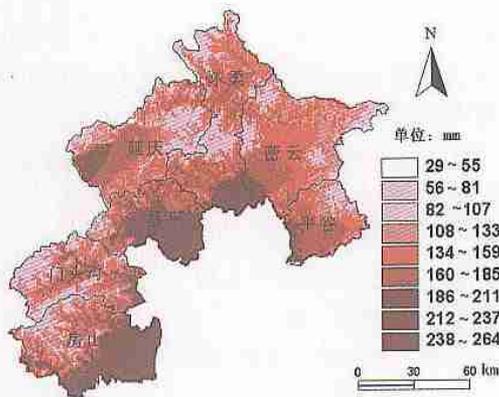


图5 山区大最大气候生产力时的补水量  
Fig.5 Water deficit of reaching the maximum PCPP

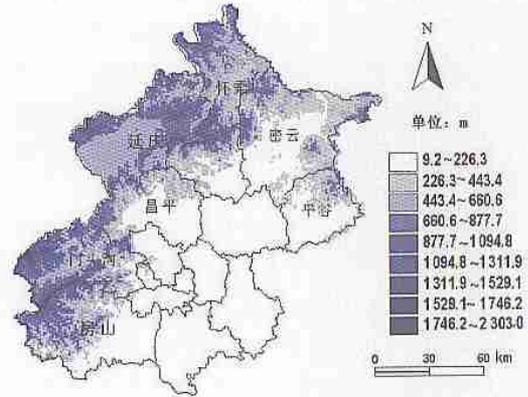


图6 北京市部分区县地形图  
Fig.6 Relief map of Beijing

感影像数据,因为 7 月 28 日影像上的北京区域内无云,同时该景影像能很好地反映正常年份植物的长势,MODIS 数据是生态环境监测中目前较理想的数据资源,而 1B 数据是经过辐射定标的数据产品,精度很高<sup>[19]</sup>。利用遥感影像处理软件 ENVI 对 1 km 空间分辨率 MODIS 波段 1(620 ~ 670 nm)和波段 2

(841 ~ 876 nm)的 1B 影像进行裁剪和地理校正,并以北京市区域图作为参考进行配准,计算了北京市区域内的归一化 NDVI。

在北京山区自然植被相对集中的区域随机选取的 70 个网格点的 NDVI 与相应网格点的植物气候生产力的变化趋势如图 7 所示。

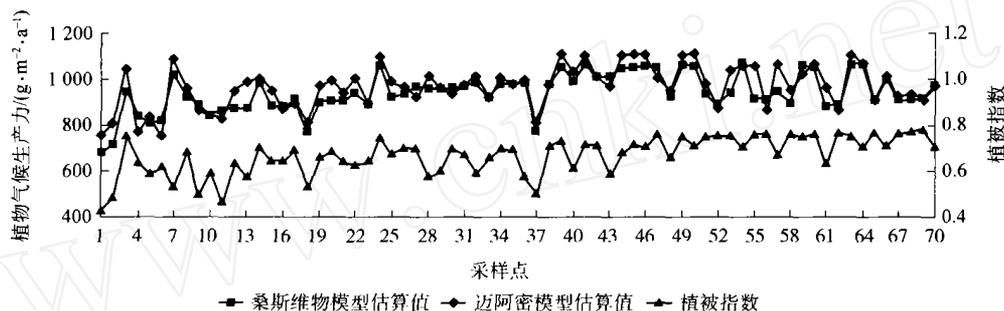


图 7 植物气候生产力与植被指数的相关性

Fig. 7 The relativity of the PCPP and NDVI

图中可以发现,NDVI 和植物气候生产力的变化趋势总体是一致的。相关分析表明,桑斯维特纪念模型和迈阿密模型的估算值与 NDVI 的相关系数分别为 0.547 4 和 0.459 1,经相关系数显著性检验<sup>[21]</sup>,均达到 0.01 的显著水平,说明 2 种模型估算的植物气候生产力能够较准确地反映北京山区实际气候生产力,且桑斯维特纪念模型的估算结果更好一些。这与前人研究结果基本一致<sup>[4,7]</sup>。

### 3 讨 论

1) 利用小网格气候资料估算植物气候生产力为在缺少气象台站的山区进行植物气候生产力估算提供了新途径,与单纯利用有限的山区气象台站的气候资料进行估算相比,其估算结果可更真实地反映山区不同地理地形条件下的植物生产力。利用地理信息系统对估算结果进行处理,可以更直观地反映山区植物气候生产力的空间分布状况,从而方便快捷地获取任意区域的植物气候生产力的信息。

2) 在估算植物气候生产力的主要数学模型中,筑后模型是一种半理论半经验的方法<sup>[4,17]</sup>,以其估算的我国各类地区的植物气候生产力与现实生产力较为接近<sup>[4]</sup>;但由于本文缺少筑后模型所需参数,未能采用。不过据侯光良等<sup>[4]</sup>研究,桑斯维特纪念模型的估算结果,以及当水分或者温度条件成为某一地区的植物生长的限制因子时,迈阿密模型的估算结果均接近筑后模型的结果,据此,本文中以桑斯

维特纪念模型和迈阿密模型作为北京山区植物气候生产力的估算模型。

3) 对 2 种模型的估算结果利用遥感的方法进行了验证,在以自然植被为主的区域,植物气候生产力与 NDVI 表现出了极好的相关性,但是在人为影响较大以及土壤条件较恶劣的区域,NDVI 与植物气候生产力估算值的相关性较差。比较典型的是延庆盆地,其热量条件和水分条件在北京山区中都是较差的,植物气候生产力也相应较低,但是从影像上看它却有较高的 NDVI。归结原因为:该地方地势较平坦、土壤条件较好且同时能够通过一些农业生产技术措施如灌溉、施肥来保证植物处于良好的生长发育状态。而本文所采用的数学模型只考虑了气候因子对植物生产力的影响,均未涉及土壤、地形、灌溉、植被种类等对植物生产力的影响,通过采用小网格的研究方法对山区植物气候生产力进行估算,虽然从某种程度上修正了由于山区地形差异对估算植物气候生产力的影响,但仍未能考虑由土壤、灌溉、植物种类等因子对植物生产力的影响,所以模型仍具有很大的局限性。

### 4 结 论

1) 因桑斯维特纪念模型考虑因素较全面,且与北京山区 NDVI 的相关性较好,以此模型所计算的植物气候生产力较好地反映了北京山区植物气候生产力的空间分布状况。

2)北京山区植物气候生产力的空间分布趋势是由东向西逐渐降低,有3条明显的等值线,这3条等值线把北京山区植物气候生产力分成了4个不同区域,高值区集中在东北部山区的平谷中部地区、密云南部地区,低值区主要集中在西部山区,包括门头沟西部、延庆、怀柔北部地区。

3)除部分海拔较高的中山区外,水分条件是北京山区植物气候生产力主要限制因子。若通过补充水分的方法使某一地区达到年平均最大蒸散量时,则海拔较低、热量条件较好的缓坡丘陵区 and 盆地需补充的水量较多,补充水量为180~260 mm;而海拔较高的地区,因热量条件的限制,蒸发力较弱,需补充水量较少,为55 mm以下。

4)桑斯维特纪念模型和迈阿密模型的估算值与NDVI的相关系数分别为0.5474和0.4591,均达到0.01的显著水平,说明2种模型估算的植物气候生产力能够较准确地反映北京山区实际气候生产力。

中国农业大学信电学院严泰来教授对本文的修订提出了宝贵的意见,在此表示衷心感谢!

### 参 考 文 献

- [1] 王愿昌. 南小河流域山坡地刺槐林生产潜力分析[J]. 水土保持研究, 1998, 8(4): 89~92
- [2] 高素华, 潘亚茹, 郭建平. 气候变化对植物气候生产力的影响[J]. 气象, 1994, 20(1): 30~33
- [3] 陈南国. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. 自然资源学报, 1987, 2(3): 270~277
- [4] 侯光良, 游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力[J]. 自然资源学报, 1990, 5(1): 60~64
- [5] 郭建平, 高素华, 刘玲. 中国北方地区牧草气候生产潜力及限制因子[J]. 中国农业生态学报, 2002, 10(3): 44~46
- [6] 杨正礼, 杨改河. 中国高寒草地生产潜力与载畜量研究[J]. 资源科学, 2000, 22(4): 73~77
- [7] 贺庆棠, A. Baumgartner. 中国植物的可能生产力农业和林业的气候产量[J]. 北京林业大学学报, 1986, 8(2): 84~97
- [8] 孙长忠, 沈国舫. 我国主要树种人工林生产力现状及潜力的调查研究[J]. 林业科学研究, 2002, 13(6): 613~621
- [9] 欧阳宗继, 赵新平, 赵有中, 等. 山区局地气候的小网格研究方法[J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 144~148
- [10] 张连强, 赵有中, 欧阳宗继, 等. 运用地理因子推算山区局地降水量的研究[J]. 中国农业气象, 1996, 17(2): 6~10
- [11] Laya D, Van Ranst E, Herrero J. A modified parametric index to estimate yield potentials for irrigated alfalfa on soils with gypsum in Quinto[J]. Geoderma, 1998(87): 111~122
- [12] 杨文坎, 李湘阁. 越南北方气候与气候生产力的研究[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 504~515
- [13] 黄承标, 何志远, 庞庭颐. 广西森林气候可能生产力与实际生产力的比较研究[J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2002, 24(3): 355~359
- [14] 程纯枢, 王鹏飞, 冯秀藻. 中国农业百科全书: 农业气象卷[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 401~402
- [15] 刘汉中主编. 普通农业气象学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 110~136
- [16] Kubota F, Ueda S. Environmental factors and productivity in silage corn (*Zea mays* L.). I. Regional differences in the climatic productivity of corn in Hokkaido, Corn Belt of North America[J]. Journal of Japanese Society of Grassland Science, 1981, 27(2): 167~173
- [17] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11~19
- [18] 崔读昌. 中国农业气候学[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1999. 77
- [19] 刘玉洁, 葛成辉编著. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 1~346
- [20] 林培. 农业遥感[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 87~90
- [21] 北京农业大学主编. 概率论与数理统计[M]. 北京: 农业出版社, 1987. 286