DOI: 10.5846/stxb201412302599

叶永昌,周广胜,殷晓洁.1961—2010年内蒙古草原植被分布和生产力变化——基于 MaxEnt 模型和综合模型的模拟分析.生态学报,2016,36 (15): - .

Ye Y C, Zhou G S, Yin X J.Changes in distribution and productivity of steppe vegetation in Inner Mongolia during 1961 to 2010: Analysis based on MaxEnt model and synthetic model. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

1961—2010年内蒙古草原植被分布和生产力变化

—基于 MaxEnt 模型和综合模型的模拟分析

叶永昌^{1,3},周广胜^{1,2,*},殷晓洁^{1,3}

1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:定量评估气候变化对内蒙古草原植被分布及其净第一性生产力的影响有助于理解干旱区域生态系统结构和功能对气候 变化的响应。本研究基于最大熵模型(MaxEnt)评价了气候因子的重要性,进而模拟了 1961—2010 年内蒙古草原植被的地理分 布,同时应用综合模型模拟了净第一性生产力变化。研究表明,湿润指数(MI)、年降水量(P)、最暖月平均温度(T_w)和最冷月 平均温度(T_w)是决定草原植被分布的主导气候因子。1961—2010 年内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原分布面积分别减少 了 5%、1%和 62%,草原面积整体减少了 11%,预示着草原向着荒漠化的方向发展。降水是决定内蒙古草原净第一性生产力变 化的最重要因素。

关键词:内蒙古草原;MaxEnt 模型;植被地理分布;综合模型;净第一性生产力

Changes in distribution and productivity of steppe vegetation in Inner Mongolia during 1961 to 2010: Analysis based on MaxEnt model and synthetic model

YE Yongchang^{1,3}, ZHOU Guangsheng^{1,2,*}, YIN Xiaojie^{1,3}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

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

Abstract: Global temperature and precipitation are undergoing unprecedented change, which has seriously affected the structure and function of steppe ecosystems in Inner Mongolia. The vegetation of this region has been suffering from severe salinization, desertification, and decline in productivity, resulting in severely ecological problems and economic losses. Although numerous studies indicate that desertification is intensifying currently, but the history of vegetation cover and geographical distribution patterns of vegetation are poorly understood. This research attempts to simulate the temporal and spatial changes in the geographical distribution of steppe vegetation based on MaxEnt and changes of net primary productivity (NPP) based on synthetic model in Inner Mongolia during 1961 to 2010. The aim of this research is to provide a valuable method for predicting the potential impact of climate change on vegetation in the future. The results show that moisture index (MI), annual precipitation (P), mean temperature of the warmest month (T_w) , and mean temperature of the coldest month (T_c) are the dominant climatic factors determining the geographical distribution of steppes. The MaxEnt

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB951303);中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题 (XDA05050408)

收稿日期:2014-12-30; 修订日期:2015-12-08

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

model performs well in simulating the geographical distribution of steppe vegetation in Inner Mongolia. The AUC of meadow steppe, typical steppe, and desert steppe are about 0.90 (excellent), 0.85 (very good), and 0.95 (excellent), respectively. The kappa consistencies of meadow steppe, typical steppe, and desert steppe are about 0.95 (excellent), 0.70 (very good), and 0.57 (very good), respectively. The overall kappa value of the entire steppe vegetation is about 0.76 (very good). The areas characterized by steppe vegetation in Inner Mongolia have shrunk during 1961 to 2010. The distribution area decreased to about 5% for meadow steppe, 1% for typical steppe, 62% for desert steppe, and 11% for the entire steppe. The gravity centers of both meadow steppe and typical steppe have moved towards southwest, while the desert steppe moved towards southwest on the initial stage and to the northeast later. Due to these shifts the entire range of steppe are confined within narrow distribution boundary. The area converted from meadow steppe to typical steppe (2.38×10^4 km^2) is less than the area of transformation of the latter to the former (3.57 × 10⁴ km²). The area transformed from desert steppe to typical steppe accounts for 15% of the total area of desert steppe. The change in areas shows that the Inner Mongolia steppe is undergoing desertification. The NPP of the entire steppe, meadow steppe, typical steppe, and desert steppe were 312 gDWm⁻²a⁻¹, 341 gDWm⁻²a⁻¹, 309 gDWm⁻²a⁻¹, and 260 gDWm⁻²a⁻¹ in Inner Mongolia during 1961 to 2010. The change in NPP of the entire steppe followed a decline-increase-decline trend during 1961 to 2010. Regional precipitation is the primary determining factor for the NPP of steppes in Inner Mongolia. The MaxEnt model is one of the bioclimatic envelope models (BEMs) based on the niche theory. BEMs are often used to solve problems in conservation biology, biogeography, ecology, and taxonomy at species level. We have successfully used the MaxEnt model to simulate the geographical distribution of the different steppe vegetation types. This study extends the range of application of BEMs, which has facilitated the understanding of the functional diversities of ecological systems and advanced classification units (above the individual and community level).

Key Words: Inner Mongolia Steppe; MaxEnt model; geographical distribution of steppe vegetation; synthetic model; net primary productivity

CO₂等温室气体浓度增加使得全球温度持续上升,降水格局发生变化^[1],严重影响了陆地生态系统的结构与功能^[2-6]。研究表明,受气候变化的影响,近年来内蒙古草原盐渍化、荒漠化严重^[7-9],退化面积达40%^[10],生产力下降30%—50%^[11],沙尘暴频发^[12],导致了严重的生态问题与经济损失^[13-14]。

气候变化对内蒙古草原植被的影响主要体现在其分布区域及其生产力的变化方面。植被生态学认为,主要的植被类型表现着植被对主要气候类型的适应,每个气候分区都有一套相应的植被类型^[15]。在植被地理分布模拟中,气候相关模型被广泛用于植被分布的模拟^[16]。Phillips 等^[17]以最大熵原理为基础,构建了模拟物种分布的最大熵模型(MaxEnt)。MaxEnt 模型具有良好的模拟效果和友好的使用界面,已经广泛地用于物种分布的预测^[18-22]。植被净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP)是连接生物圈与气候系统的桥梁^[23],衡量了生态系统固定太阳能的速率,即能进入食物链的能量^[24]。常用于模拟 NPP 的气候相关模型有Miami 模型^[25]、Thornthwaite 模型^[25]、Chikugo 模型^[26]和综合模型^[27]。其中,综合模型以与植被光合作用密切相关的实际蒸散为基础,综合考虑了诸因子的相互作用,模拟效果最好,特别是对干旱半干旱地区。该模型已被广泛应用于植被净第一性生产力的模拟^[7, 28-31]。

尽管大量研究指出当前荒漠化在加剧,但对历史植被覆盖和植被地理分布格局知之甚少^[32],通过模型模 拟现有植被分布有利于回答区域尺度上的生态问题^[33]。本研究试图基于 MaxEnt 模型和综合模型模拟 1961—2010 年内蒙古草原植被地理分布和 NPP 的时空变化,以期为进一步预测未来气候变化对植被的潜在 影响提供方法参考。

1 资料和方法

1.1 内蒙古草原植被样本数据

植被分布的样本数据利用 ArcGIS 平台中的 ArcMap 从 1:100 万中国植被图中提取。 来源于《1:1,000,000 中国植被图集》的数字化,该图集 由中国植被图编辑委员会编纂,于2001年由科学出版 社出版。资料主要依据 1949 年以来全国各地进行的植 被调查研究成果,特别是在20世纪80年代进行的大量 的实地调查,能够真实地反映1961—1990年中国植被 的分布状况。首先,将内蒙古地区提取出来,再提取所 需的植被类型,然后通过创建随机点进行随机取样。已 有研究表明,当样本量达到 120 个之后, MaxEnt 模型的 模拟精度趋于稳定[34]。为此,以120个样本点为基数, 依据不同类型植被的面积比例关系,将样本数量设定为 草甸草原 135,典型草原 470,荒漠草原 120 (图 1)。



Fig.1 Geographical distribution of samplings of three vegetation types in Inner Mongolia

1.2 气象数据

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网提供的 1961—2010 年的内蒙古基本、基准地面气象观测站 的日值数据集,包括:站点经伟度、日降水量、日平均气温、相对湿度、气压等要素。采用 Thornton 等^[35]给出 的截断高斯滤波算子空间插值方法,与数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)数据结合,将气候数据 插值成 10km × 10km 分辨率的空间栅格数据,并利用 Thornton 和 Running^[36]提出的方法得到日值空间格点的 太阳辐射数据。基于气候标准年考虑,按照 1961—1990 年、1966—1995 年、1971—2000 年、1976—2005 年、 1981—2010年建立气候标准年数据库。

1.3 气候因子的选取

影响植被地理分布的主要因子有3类:植被的耐寒性;完成生活史所需的生长季长度和热量供应;用于植 被冠层形成和维持的水分供应^[37]。翁恩生和周广胜^[38]详细阐述了用于 BIOME 模型的气候因子在中国植被 分类中的适用性,参考其研究成果,本研究选取最冷月平均温度(T。,1月平均温度)反映植被的耐寒性,用最 暖月平均温度(T_m,7月平均温度)和大于5℃积温(Growing degree days, GDD₅)共同反映热量需求,采用年降 水量(P)和湿润指数(MI=P / PET,年降水量和年潜在蒸散量的比值)表示水分需求,选取气温年较差(T_)反 映气温变幅。年潜在蒸散(Potential Evapotranspiration, PET)采用 Thornthwaite 方法计算得来^[39]。

1.4 MaxEnt 模型

MaxEnt 模型基于贝叶斯定理,利用 Gibbs 分布族将特征集进行加权并作为参数,进行一系列运算得到物 种分布的最大熵联合分布估计而建立^[40]。为了避免偶然误差,将模型迭代次数设定为10次,其它参数不变。 首先模拟 1961—1990 年草原植被的分布,基于模型输出的各因子百分贡献率,筛选贡献更高的因子。以筛选 的气候因子作为主导气候因子重新建模,模拟 1961—1990 年内蒙古草原植被的分布,并对模拟效果进行验 证。然后以 1961—1990 年为基准,预测 1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010 年 4 个时期内草原 植被的分布。MaxEnt 模型默认输出为 logistic 形式,表示某种植被在整个模拟区域每个栅格上的存在概率(P),取值范围为0-1。根据统计学上小概率事件不可能发生的原理,当P<0.1时,认为该类型植被不可能存 在;当 P≥0.1 时,认为该类型植被可以在此格点分布。由于不同类型植被的分布区域存在重叠,因此,规定草 原植被的优先等级:草甸草原>典型草原>荒漠草原。当某个栅格被同时划分为不同类型的植被时,以优先等 级的植被作为该栅格的植被类型。

1.5 综合模型

周广胜和张新时[27]根据植物生理生态学特点及联系能量平衡方程和水量平衡方程的区域蒸散模式,利

用 Efimova 在国际生物圈计划(International Biological Program, IBP)期间获得的世界各地的 23 组森林、草地 及荒漠等自然植被的生产力资料及相应的气候资料,建立了联系植物生理生态学特点和水热平衡关系的植物 的净第一性生产力模型,即综合模型,该模型的计算方法如下:

$$NPP = RDI \frac{rR_n(r^2 + R_n^2 + rR_n)}{(R_n + r)(R_n^2 + r^2)} \times \exp[-(9.87 + 6.25RDI)^{0.5}] \times 100$$

$$R_n = RDI \times r \times L \times 2.38 \times 10^{-4}$$

$$RDI = 0.629 + 0.237PER - 0.00313PER^2$$

$$PER = PET/r$$

$$PET = 58.93BT$$

$$BT = \sum_{t} t/365 \ (0 < t < 30; \implies t < 0 \ m, t = 0; \implies t > 30 \ m, t = 30)$$

其中,NPP 表示净第一性生产力(g DW m⁻² a⁻¹), R_n表示陆地表面所获得的净辐射量(J m⁻² a⁻¹), r 表示年均降水量(mm), L 表示潜热蒸散(2503Jg⁻¹), RDI 表示辐射干燥度, PER 表示年均潜在蒸散与年均降水的比值, BT 表示年均生物温度(℃), t 表示日均温(℃)。

2 结果分析

2.1 主导气候因子筛选及其年际动态

首先采用 MaxEnt 模拟 1961—1990 年内蒙古草原植被的地理分布,通过模型自身的百分贡献率模块对气候因子的重要性进行评价,由于同一因子在三类草原植被中的百分贡献率不完全一致,因此,以某种因子在三种草原植被中百分贡献率的平均值作为衡量其重要性的标准。不同气候因子重要性排序为:湿润指数(MI)>年降水(P)>最暖月平均温度(T_w)>最冷月平均温度(T_e)>气温年较差(T_d)>5℃积温(GGD₅)。其中前四个因子的贡献率分别为 46%、32%、9%和 6%,总和达到了 94%,能够充分解释分布结果。因此,湿润指数、年降水量、最暖月平均温度和最冷月平均温度是决定内蒙古草原植被地理分布的主导气候因子。

内蒙古草原植被主导气候因子动态的最优拟合曲线清晰地展现了气候的变化趋势(图 2)。结果表明,湿 润指数和年降水量呈现出一致的三段式变化:1961—1970年呈下降趋势,1971—1990年为上升趋势,1991— 2010年呈下降趋势。最暖月平均温度则与湿润指数和年降水量呈现出完全相反的变化趋势。最冷月平均温 度在小幅波动中呈现上升趋势。总的来说,伴随着温度的升高和降水的减少,尤其是 1991—2010年,内蒙古 的气候呈现暖干化的趋势。

2.2 MaxEnt 模型的验证

将筛选的四个主导气候因子输入 MaxEnt 模型,再次模拟 1961—1990 年内蒙古草原植被的地理分布,然 后采用 ROC(Receiver operating characteristic curve)曲线下的面积 AUC (Area Under ROC Curve)值和 Kappa 值检验 MaxEnt 模型模拟的准确性。AUC 值和 Kappa 值的评估标准见表 1。将模型迭代次数设定为 10 次,模 型的验证方式选择交叉验证,即随机地将所有数据等分为 10 份,每次以 90%的样本数据作为训练子集,以剩 余的 10%数据作为验证子集。训练子集用于训练模型,获取模型相关参数,构建草原植被与气候因子的最大 熵模型。验证子集用于模拟准确度的验证,且验证子集每次都不重复,最终所有数据都将参与验证。基于验 证子集得到的草甸草原、典型草原和荒漠草原的平均 AUC 值分别为 0.90、0.85 和 0.95,表明 MaxEnt 模型的模 拟准确性达到了非常好和极好的水平。

AUC 值是以样本点的形式对模型进行验证,而 Kappa 值可以从整体上检验模拟的准确度。将模拟的 1961—1990 年内蒙古草原潜在植被分布与植被图对应的区划图进行 Kappa 一致性检验。结果表明,草甸草 原、典型草原、荒漠草原的 Kappa 值分别为:0.95、0.70、0.57,均大于 0.55。整个内蒙古草原植被的 Kappa 一致 性值为 0.76,总体达到了非常好的模拟效果,表明 MaxEnt 模型能够很好地模拟内蒙古草原植被的地理分布。



图 2 1961—2010 年内蒙古草原植被主导气候因子动态

Fig.2 Dynamics of dominant climatic factors of steppe vegetation in Inner Mongolia during1961 to 2010

表 1	AUC 值和 Ka	ppa 值及其与模型准确性的关系

准确度 Accuracy	完美 Perfect	极好 Excellent	非常好 Very Good	好 Good	一般 Fair	较差 Poor	极差 Worthless
AUC	1.0	0.9—1.0	0.8—0.9	0.7—0.8	0.6—0.7	0.5-0.6	0.5
Kappa	1.0	0.7—1.0	0.55—0.7	0.4—0.55	0.2—0.4	0.0-0.2	0.0

Table 1 Relationship between AUC or Kappa and the accuracy of the model

2.3 内蒙古草原植被地理分布变化

基于 MaxEnt 模型模拟结果可以得到 1961—1990、1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010 年 5 个时期的内蒙古草原植被地理分布及其面积变化(图 3 和表 2)。五个时期三种草原植被均有分布,从东北 向西南依次为草甸草原、典型草原和荒漠草原。其中,草甸草原主要分布于两个区域,典型草原主要分布在三 个区域,荒漠草原在西北方向上分布较为离散。

草甸草原 1966—1995 年分布面积相比 1961—1990 年上升了 4%,之后两个时期保持平稳,到了 1981—2010 年,面积又减少了 11%,低于 1961—1990 年的分布水平。典型草原分布面积在 1966—1995、1971—2000、1976—2005 年三个时期呈减小趋势,在 1976—2005 年分布面积最小,相比于 1961—1990 年减少了 12%,1981—2010 年面积开始回升,相比于 1976—2005 年面积增加了 10%,接近于 1961—1990 年水平。荒 漠草原面积在五个时期内呈递减趋势,1966—1995、1971—2000、1976—2005、1981—2010 年相对于其前一时 期面积分别减少了 16%、22%、21%和 26%。50 年间三种草原植被整体分布面积呈缩小趋势,整个草原分布 面积减少了 11%。其中,草甸草原面积减少了 5%,典型草原面积减少了 1%,荒漠草原面积减少了 62%。草 甸草原向典型草原转化的面积(2.38×10⁴ km²)小于后者向前者转化的面积(3.57×10⁴ km²),荒漠草原转化为

典型草原的面积占荒漠草原总面积的15%。

内蒙古草原植被五个时期分布重心的迁移距离和方向清晰地展现了草原植被对气候变化的响应(图4和表3)。结果表明,草甸草原和典型草原整体向西南方向迁移,荒漠草原初期向西南方向迁移,随后逐渐转向东北方向。相对于1961—1990年,草甸草原在1976—2005年迁移距离最远(51km),典型草原在1971—2000年迁移距离最远(74km),荒漠草原在1981—2010年迁移距离最远(73km)。草甸草原、典型草原、荒漠草原迁移较为温和的年份分别是1966—1995年(24km)、1981—2010年(30km)、1966—1995(30km)。



图 3 1961—2010 年内蒙古草原植被地理分布

Fig.3 Distribution of steppe vegetation in Inner Mongolia during 1961 to 2010

表 2 1961—2010 年内蒙古草原植被分布面积变化(100km²)	
--------------------------------------	--

Table 2	Area	changes	of	steppe	vegetation	in	Inner	Mongolia	during	1961	to	2010	(100km	1 ²)
													`	

植被类型	1066 1005	1071 2000	1076 2005	1081 2010	1961—2010		
Vegetation types	1900—1993	19/1—2000	1970—2003	1981—2010	面积 Area	比例 Percent/%	
草甸草原 Meadow steppe	253	31	-45	-440	-201	-5	
典型草原 Typical steppe	-183	-140	-63	347	-39	-1	
荒漠草原 Desert steppe	-157	-173	-129	-130	-589	62	

"-"表示面积减少

表 3 1961—2010年内蒙古草原植被分布范围的重心移动距离(km)和方向

Table 3	Moving distances	(km)	and directions of	gravity	centers of stepp	e vegetation	distribution	in In	ner Mongolia	during	1961 to 20)10
		·/		H ,								

枯油米刑	1966-	-1995	1971-	-2000	1976-	-2005	1981—2010		
Vegetation types	距离 Distance	方向 Direction	距离 Distance	方向 Direction	距离 Distance	方向 Direction	距离 Distance	方向 Direction	
草甸草原 Meadow steppe	24	西南	42	西南	51	西南	29	西南	
典型草原 Typical steppe	49	西南	74	西南	64	西南	30	西南	
荒漠草原 Desert steppe	30	西南	42	南方	40	北方	73	东北	

距离和方向的变化都是相对于 1961—1990 年

2.4 内蒙古草原植被净第一性生产力动态

综合模型的模拟结果清晰地展现了内蒙古草原 NPP 在 1961—2010 年的变化趋势 (图 5)。结果表明,内

36卷



图 4 1961—2010 年内蒙古草原植被分布的重心变化 Fig.4 Changes of gravity centers of steppe vegetation distribution in Inner Mongolia during 1961 to 2010

蒙古整个草原 NPP 的变化主要表现为三段不同的特征。1961—1970 年呈下降趋势,1971—1990 年转为上升 趋势,1991—2010 年则呈现下降趋势,这三个阶段 NPP 的年均值分别为 297gDWm⁻²a⁻¹、313gDW m⁻²a⁻¹、 329gDW m⁻²a⁻¹。其中,草甸草原和典型草原的 NPP 与整个草原的变化趋势相同,而荒漠草原的 NPP 变化趋势相对平稳。1961—2010 年内蒙古整个草原、草甸草原、典型草原和荒漠草原的 NPP 的年均值分别为:312 gDWm⁻²a⁻¹、341 gDWm⁻²a⁻¹、309 gDWm⁻²a⁻¹和 260 gDWm⁻²a⁻¹。

3 讨论

尽管内蒙古草原植被的退化现状不能完全归因于气候变化,但气候变化毫无疑问加速了这一过程,并改 变着草原植被的分布格局^[7]。内蒙古草原处于干旱、半干旱区域,相对于其它自然生态系统,其结构和功能 对气候变化最为敏感。本研究基于 MaxEnt 模型和综合模型分析了 1961—2010 年内蒙古草原植被的分布格 局和净第一性生产力变化,研究结果对于理解气候变化对干旱区域草原植被的影响有重要作用。

净第一性生产力代表着从空气中进入植被的纯碳量,是表征植被活动和陆地生态系统过程的关键参数, 对于理解地表碳循环过程具有重要的意义^[41]。NPP 的影响因素有很多,包括降水、营养物质、土壤属性,以及 一系列生物间相互作用^[42]。通常认为水分是影响内蒙古草原 NPP 最重要的因素, NPP 和年降水与季节性 降水都有显著的相关性^[43-46]。本研究表明,NPP 和温度之间没有显著的相关性,降水(*R*²=0.68,*P* < 0.01)是 决定 NPP 变化的最主要因素,与已有研究结果相似。尽管本世纪初开展了退牧还草的生态工程建设,使原有 的退化草地得到一定恢复,然而这些研究通常是基于样点的围封观测,难以排除气候因子的干扰^[46]。本研究 通过综合模型模拟了内蒙古草原植被在历史气候条件下潜在生产力的动态,表明区域降水的波动是决定植被 潜在生产力的最主要因素。因此,发展草原节水和保水技术是维持草原生态系统功能稳定的关键。

MaxEnt 模型本质上是生物气候包络模型(Bioclimatic Envelope Models, BEMs)的一种, BEMs 利用具有地



图 5 1961—2010 年内蒙古草原植被净第一性生产力动态 Fig.5 Dynamic of NPP in Inner Mongolia during 1961 to 2010

理参考的环境变量和物种分布信息之间的相关性推断物种的生态需求,模拟物种的地理分布^[47],目前已被广 泛应用于解决保护生物学、生物地理学、生态学和分类学中的问题^[48]。但这些应用多数是在物种尺度上,因 为 BEMs 构建的基础是生态位理论,将物种对环境的适应能力看作是环境变量的函数^[17],假设物种当前分布 范围的气候条件代表着物种所需的气候条件,所构建的生物气候包络代表着物种的实际生态位^[49]。但这并 不妨碍学者对这种模型进行全新的应用,用 BEMs 研究植物功能型(Plant Function Types, PFTs)和群落集合 (相对于个体而言)的分布范围^[50]。Pau 等^[51]采用 Maxent 模型对比了夏威夷群岛 C₃和 C₄植物功能型及其相 关的物种集合(将 152 个物种划分为 6 类)的分布范围。南非国家生物多样性研究所(South African National Biodiversity Institute, SANBI)在评估南非生物群区对气候变化的脆弱性时就采用 Maxent 来模拟现在和未来 生物群区的分布范围^[52]。Werneck 等^[53]基于 MaxEnt 构建了生物群区分布模型(Biome Distribution Model, BDM),来模拟北美大陆季节性干热带森林生物群区的分布范围。Deblauwe 等^[54]训练了一个经验预测模型 (MaxEnt)来预测干旱半干旱地区周期性植被的存在概率,探讨了植被的自组织现象。本研究尝试通过 MaxEnt 模型建立气候因子与草原植被类型的关系模型,模拟内蒙古草原植被地理分布对气候变化的响应,同 样取得了较好的模拟效果。这种研究扩展了 BEMs 的应用范围,有助于理解生态系统和高级分类单元(个体 和群落水平之上)的功能多样性^[51]。

MaxEnt 模型的一个优势是可以对环境变量的重要性进行评价。湿润指数和降水的贡献率最高,表明水 分是决定内蒙古草原植被分布格局最重要的因素。气温年较差和5℃积温的贡献率最低,表明内蒙古草原对 热量的波动并不敏感。

基于 Maxent 模型的模拟结果,1961—2010 年整个草原分布面积减少了 11%,尤其是荒漠草原退化面积 较大,与近年来内蒙古草原的实地调查结果相符^[55]。草甸草原面积的减少主要是典型草原向其扩张导致的。 典型草原被草甸草原和荒漠草原取代的面积要小于其向后两种草原扩张的面积,荒漠草原被典型草原取代的 面积仅占荒漠草原总面积的15%,表明部分典型草原和荒漠草原的分布区域不再适宜草原植被生存,整个草 原面积的减少预示着草原向着荒漠化的方向发展。尽管草原植被分布对温度的变化并不敏感,但温度升高会 间接地加速草原退化,因为温度升高使潜在蒸散增加,即使降水不发生改变,植被也会遭受水分亏缺^[56],进而 影响到草原植被分布。

由于本研究没有考虑土地利用和过度放牧等因素,因此研究结果是区域尺度上基于气候适宜性的草原植 被潜在变化,而结合地形、土壤类型、人为活动等因素的研究有待进一步开展。本研究模拟的是历史气候条件 下植被分布状况,80年代之后遥感技术的飞速发展为研究植被覆盖提供了新的手段,如何结合遥感数据进一 步验证模拟的准确性,以及将该方法应用于未来气候情景预测植被结构和功能对未来气候变化的响应,有待 进一步研究。

4 结论

本研究基于 MaxEnt 模型和综合模型模拟了 1961—2010 年内蒙古草原植被的地理分布和净第一性生产 力变化。研究表明,湿润指数(MI)、年降水量(P)、最暖月平均温度(T_w)和最冷月平均温度(T_c)是影响草原 植被地理分布的主导气候因子。MaxEnt 模型能够很好地模拟内蒙古草原植被的地理分布,Kappa 总体一致 性值为 0.76,草甸草原、典型草原和荒漠草原的 Kappa 一致性值分别为 0.95、0.70 和 0.57。1961—2010 年内 蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原分布面积分别减少了 5%、1% 和 62%,草原面积整体减少了 11%,预示着 草原向着荒漠化的方向发展。降水是决定内蒙古草原 NPP 波动的最重要因素。该研究有助于理解内蒙古草 原生态系统结构和功能对气候变化的响应,为进一步预测未来气候变化对草原植被的不利影响提供有价值的 参考。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Summary for Policymakers // Stocker T F, D Qin, G K. Plattner, M Tignor, S K Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex, P M Midgley, eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw M R, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. Bioscience, 2003, 53(10): 941-952.
- [3] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [4] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Biodiversity-Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [5] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of Earth's ecosystems. Science, 1997, 277(5325): 494-499.
- [6] Field C B, Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere-a resource-based approach. Annual Review of Ecology and Systematics, 1992, 23: 201-235.
- [7] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. Global Change Biology, 2011, 17(1): 377-389.
- [8] Wang X M, Chen F H, Dong Z B. The relative role of climatic and human factors in desertification in semiarid China. Global Environmental Change, 2006, 16(1): 48-57.
- [9] Zhou G, Wang Y, Wang S. Responses of grassland ecosystems to precipitation and land use along the Northeast China Transect. Journal of Vegetation Science, 2002, 13(3): 361-368.
- [10] 马瑞芳,李茂松,马秀枝. 气候变化对内蒙古草原退化的影响. 内蒙古气象, 2011, (2): 30-39.
- [11] Meyer N. Desertification and restoration of grasslands in Inner Mongolia. Journal of Forestry, 2006, 104(6): 328-331.
- [12] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 张增祥, 王一谋, 周自江, 鞠洪波, 黄签. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. 地理学报, 2000, 55 (5): 513-521.

- [13] 尹燕亭,侯向阳,运向军. 气候变化对内蒙古草原生态系统影响的研究进展. 草业科学, 2011, 28(6): 1132-1139.
- [14] 苏吉安,朱幼军,哈斯.内蒙古草地生态问题及其对策探讨.中国草地,2003,25(6):68-71.
- [15] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学. 北京: 气象出版社, 2003.
- [16] Roy P S, Joshi P K, Singh S, Agarwal S, Yadav D, Jegannathan C. Biome mapping in India using vegetation type map derived using temporal satellite data and environmental parameters. Ecological Modelling, 2006, 197(1/2): 148-158.
- [17] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [18] 杨志香,周广胜,殷晓洁,贾丙瑞.中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性.生态学杂志,2014,33(6):1429-1436.
- [19] 殷晓洁,周广胜,隋兴华,何奇瑾,李荣平.蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值.生态学报,2013,33(1):103-109.
- [20] 段居琦,周广胜.我国双季稻种植分布的年代际动态.科学通报,2013,58(13):1213-1220.
- [21] 何奇瑾,周广胜.我国玉米种植区分布的气候适宜性.科学通报, 2012, 57(4): 267-275.
- [22] 孙敬松,周广胜.利用最大熵法(MaxEnt)模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化.中国农业气象, 2012, 33(4):481-487.
- [23] Roy J, Saugier B, Mooney H A. Terrestrial Global Productivity. San Diego: Academic Press, 2001.
- [24] Odum E P. Fundamentals of Ecology. Philadelphia: W. B. Saunders, 1976.
- [25] Leith H, R. H. W. Modeling the primary productivity of the world // Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer, 1975: 237-263.
- [26] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. Journal of Agricultural Meteorological, 1985, 40(4): 343-352.
- [27] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [28] Gang C C, Zhou W, Li J L, Chen Y Z, Mu S J, Ren J Z, Chen J M, Groisman P Y. Assessing the Spatiotemporal Variation in Distribution, Extent and NPP of Terrestrial Ecosystems in Response to Climate Change from 1911 to 2000. Plos One, 2013, 8(11).
- [29] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, Yang Z Y. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1/2): 149-157.
- [30] 普宗朝,张山清,王胜兰.近47年天山山区自然植被净初级生产力对气候变化的响应.中国农业气象,2009,30(3):283-288.
- [31] 李镇清,刘振国,陈佐忠,杨宗贵.中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响.草业学报,2003,12(1):4-10.
- [32] Akiyama T, Kawamura K. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration. Grassland Science, 2007, 53(1):
 1-17.
- [33] Wullschleger S D, Epstein H E, Box E O, Euskirchen E S, Goswami S, Iversen C M, Kattge J, Norby R J, van Bodegom P M, Xu X F. Plant functional types in Earth system models: past experiences and future directions for application of dynamic vegetation models in high-latitude ecosystems. Annals of Botany, 2014, 114(1): 1-16.
- [34] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
- [35] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. Journal of Hydrology, 1997, 190(3/4): 214-251.
- [36] Thornton P E, Running S W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 93(4): 211-228.
- [37] Woodward F I. Climate and plant distribution. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [38] 翁恩生,周广胜.用于全球变化研究的中国植物功能型划分.植物生态学报,2005,29(1):81-97.
- [39] 张新时. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(一)——几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13 (1): 1-9.
- [40] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [41] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [42] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431 (7005): 181-184.
- [43] Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of North American shortgrass steppe. Ecological Applications, 1992, 2(4): 397-403.
- [44] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. Science, 2001, 291(5503): 481-484.
- [45] 毛飞, 张艳红, 侯英雨, 唐世浩, 卢志光, 张佳华. 藏北那曲地区草地退化动态评价. 应用生态学报, 2008, 19(2): 278-284.
- [46] Li S, Verburg P H, Lv S, Wu J, Li X. Spatial analysis of the driving factors of grassland degradation under conditions of climate change and intensive use in Inner Mongolia, China. Regional Environmental Change, 2012, 12(3): 461-474.
- [47] Franklin J, Davis F W, Ikegami M, Syphard A D, Flint L E, Flint A L, Hannah L. Modeling plant species distributions under future climates:

how fine scale do climate projections need to be? Global Change Biology, 2013, 19(2): 473-483.

- [48] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.
- [49] Pearson R G, Dawson T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Global Ecology and Biogeography, 2003, 12(5): 361-371.
- [50] Chapman D S, Purse B V. Community versus single-species distribution models for British plants. Journal of Biogeography, 2011, 38(8): 1524-1535.
- [51] Pau S, Edwards E J, Still C J. Improving our understanding of environmental controls on the distribution of C₃ and C₄ grasses. Global Change Biology, 2013, 19(1): 184-196.
- [52] Driver A, Sink K J, Nel J N, Holness S, Van Niekerk L, Daniels F, Madjiet P A, Jonas Z, Maze K. National Biodiversity Assessment 2011: An assessment of South Africa's biodiversity and ecosystems. Synthesis Report. Pretoria: South African National Biodiversity Institute and Department of Environmental Affairs, 2012.
- [53] Särkinen T, Iganci J R, Linares-Palomino R, Simon M F, Prado D E. Forgotten forests-issues and prospects in biome mapping using Seasonally Dry Tropical Forests as a case study. BMC Ecology, 2011, 11(1): 27.
- [54] Deblauwe V, Barbier N, Couteron P, Lejeune O, Bogaert J. The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. Global Ecology and Biogeography, 2008, 17(6): 715-723.
- [55] 邢旗等. 内蒙古草业研究. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2004.
- [56] Hickler T, Vohland K, Feehan J, Miller P A, Smith B, Costa L, Giesecke T, Fronzek S, Carter T R, Cramer W, Kuhn I, Sykes M T. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(1): 50-63.