

内蒙古锡林河流域羊草草原净初级生产力及其对全球气候变化的响应*

袁飞^{1,3,*} 韩兴国² 葛剑平³ 邬建国^{1,2,3,4}

(¹ 美国亚利桑那州立大学生命科学学院和全球可持续研究所, Tempe, AZ 85287; ² 中国科学院植物研究所, 北京 100093; ³ 北京师范大学景观生态学和可持续性科学研究中心, 北京 100875; ⁴ 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心, 呼和浩特 010021)

摘要 利用 CENTURY 模型对内蒙古锡林河流域羊草草原在未来气候变化以及大气 CO₂ 浓度增高条件下的年地上净初级生产力 (annual aboveground net primary productivity, ANPP) 动态进行了模拟研究。结果表明: CENTURY 模型可以较好地预测 ANPP 的变化。进一步的情景模拟发现, 虽然全球气候变化所引起的温度和降水改变、以及大气 CO₂ 浓度升高都会影响 ANPP, 但降水是关键的影响因子。多个全球气候模型 (GCM) 预测该地区未来降水量会减少, 故可能导致其 ANPP 降低, 但在以下气候变化情景下研究区 ANPP 可能会升高: 1) CO₂ 浓度倍增, 温度升高 2 °C, 降水保持不变或增加 10% ~ 20%; 2) CO₂ 浓度保持不变, 温度升高 2 °C, 降水增加 20%。气候变化将对内蒙古锡林河流域羊草草原产生显著影响。

关键词 羊草草原 气候变化 地上净初级生产力 CENTURY 模型

文章编号 1001-9332(2008)10-2168-09 中图分类号 Q149; S812 文献标识码 A

Net primary productivity of *Leymus chinensis* steppe in Xilin River basin of Inner Mongolia and its responses to global climate change. YUAN Fei^{1,3}, HAN Xing-guo², GE Jian-ping³, WU Jian-guo^{1,2,3,4} (¹ School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe AZ 85287, USA; ² Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ³ Center for Landscape Ecology and Sustainability Science (CLESS), Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ⁴ Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science (SUCCESS), Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China) - Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(10): 2168-2176.

Abstract: CENTURY model was utilized to simulate the annual aboveground net primary production (ANPP) of *Leymus chinensis* steppe, a dominant community type in Xilin River basin of Inner Mongolia steppe region. The results showed that the model performed reasonably well in predicting the dynamics of the ANPP. The scenario-based simulations indicated that though the variations of air temperature and precipitation due to global climate change as well as the elevated CO₂ would significantly affect the dynamics of the ANPP, precipitation was the key affecting factor. Several GCM models had predicted that the precipitation in this region would decrease in the future, and consequently, it was likely that the ANPP would also decrease. Nevertheless, the simulation results showed that while the ANPP decreased in most climate change scenarios, it might also increase in the following climate change scenarios: 1) if the atmospheric CO₂ concentration was doubled, air temperature was increased by 2 °C, and precipitation was kept unchanged or increased by 10%-20%, and 2) if the atmospheric CO₂ concentration was kept unchanged, air temperature was increased by 2 °C, and precipitation was increased by 20%. Overall, it was evident that climate change would have significant effects on the steppe in Xilin River basin of Inner Mongolia.

Key words: *Leymus chinensis* steppe; climate change; ANPP; CENTURY model.

* 美国自然科学基金资助项目 (Grant No. DEB-0618193).

** 通讯作者. E-mail: fyuan@asu.edu

2008-03-10 收稿, 2008-07-22 接受.

自然植被的净初级生产力与非生物因子,特别是与气候的关系,是研究生态系统结构与功能的一个关键环节^[1-2]. 生态系统结构主要研究生态系统中生物体(如植物和动物)与非生物因子(如温度、降水)的组成、配制和相互关系;生态系统功能则着重于生态系统内部及其与景观基底之间的能量流动和物质循环过程,地上净初级生产力(ANPP)是表征生态系统功能的一个重要指标^[3-5]. 地上净初级生产力及其动态不仅能够反映生态系统初级生产者的生长与发育状况,而且可以表征供给消费者和分解者的能量,其对所有涉及到能量流动和生物地球化学循环的生态系统过程均具有重要作用.

干旱、半干旱区占全球陆地面积的40%,世界人口的四分之一以上居住于此. 内蒙古草原是全球最大草原区——欧亚草原的一部分,在内蒙古草原开展全球气候变化与大气CO₂浓度升高对干旱、半干旱区生态系统功能影响的研究至关重要. 有关内蒙古锡林河流域植被的空间分布规律以及与气候因子的关系已有许多研究^[6]. Wu等^[7]在对20世纪50—80年代锡林河流域生态学研究的综述中表明,水热条件和地形是影响该流域植被空间分布的主要因子,且该区降雨和温度的空间分布规律均呈现出从东南向西北减少的趋势. 白永飞等^[8]用样带法调查了内蒙古锡林河流域草原群落植物功能群组成沿水热梯度的变化,结果发现,随海拔高度的降低,降水量逐渐减少,干燥度和热量逐渐增加,植物生态类群功能群组成中中旱生植物的作用逐渐减弱,而旱生植物的作用明显增强. Fay等^[2]在北美Konza高草原进行了3年的野外降水控制试验发现,在保持年降水量不变的情况下,改变降水发生时间以及间隔会使ANPP减少约10%. 王其兵等^[9]的研究证明,温度升高对草原生态系统凋落物的分解过程有着显著影响:在气温升高2.7℃、降水基本保持不变的气候背景下,草甸草原、羊草(*Leymus chinenses*)草原和大针茅(*Stipa grandis*)草原凋落物的分解速度分别提高了15.38%、35.83%和6.68%. Morgan等^[10]的研究显示,在未来温度升高2.6℃的情况下,美国矮草草原的生产力将增加.

模型方法已被广泛应用于研究气候变化条件下植被功能性状的变化. 周广胜等^[11]根据植物生理生态学特点与水热平衡关系的植物第一性生产力模型对中国自然植被的第一性生产力在全球气候变化情况下的变化进行了模拟分析表明,在气温增加2℃或4℃、降水增加20%时,自然植被净第一性生产

力均有所增加,湿润区增幅较大、干旱、半干旱区增幅较小. 肖向明等^[12]通过CENTURY模型的模拟研究认为,内蒙古锡林河流域典型草原生产力和土壤有机质含量对气候变化非常敏感,气候变化会使羊草草原和大针茅草原初级生产力和土壤有机质含量下降. Wang等^[13]利用CENTURY模型探讨了气候变化下中国东北羊草草甸草原的净初级生产力动态,发现净初级生产力的变化很大程度上决定于温度和降水变化的量以及大气CO₂浓度.

目前,由于对全球气候变化以及内蒙古草原地区气候变化的认识尚不完善,对未来温度和降水格局变化的认识还不十分明晰^[14],对生态系统功能与气候变化的反馈机制还没有完全了解,仅通过GCM模型提出的气候变化条件下预测未来内蒙古锡林河流域羊草草原植被功能的变化是不够的,还需深入研究大气CO₂浓度升高以及多种气候变化条件下生态系统功能的变化. 为此,本文选取对全球气候变化较为敏感、并且具有重要经济价值的内蒙古锡林河流域羊草草原为研究对象,利用CENTURY模型模拟气候变化下羊草草原地上净初级生产力的动态,为探讨羊草草原生态系统对全球气候变化的响应机理,准确预测羊草草原在气候变化下的发展趋势提供借鉴与依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区为位于内蒙古锡林河流域白音锡勒牧场境内的中国科学院草原生态系统定位研究站羊草草原永久试验样地(43°32'58" N, 116°40'34" E). 该样地建于1979年,面积400 m × 600 m,是全球变化研究中中国东北样带(NECT)的中心区域,以及中国生态研究网络(CERN)的重要研究基地. 该区属大陆性温带半干旱气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润;年均温-1.4℃~2.0℃;1980—1999年期间的年均降水量346 mm(图1). 样地中的羊草群落有植物约86种,分属28科67属,常见种约45种,其中,广旱生根茎禾草羊草(*Leymus chinenses*)占优势,其次为大针茅(*Stipa grandis*)、荩草(*Koeleria cristata*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等旱生密丛禾草. 4月上中旬(日均气温稳定在0℃以上),牧草开始返青;5月中下旬(日均气温≥10℃),牧草进入积极生长期;9月中下旬,牧草停止生长,总生长期约150~160 d. 研究区土壤为暗栗钙土,土层厚度达1 m以上^[6,15].

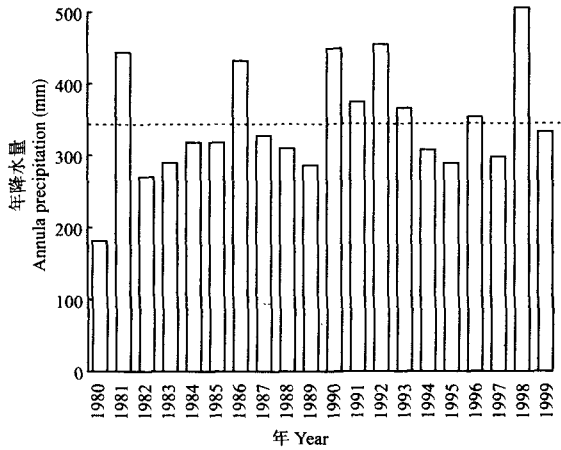


图1 1980—1999年内蒙古白音锡勒牧场的年降水量
 Fig. 1 Annual precipitation during 1980–1999 in Baiyinxile Livestock Farm of Inner Mongolia.
 虚线表示20年的年均降水量 The dashed line represented average annual precipitation for the 20 years.

1.2 资料来源

本研究数据来源于1980—1999年间中国科学院植物研究所提供的实际观测资料。其中,1980—1989年包含生长季逐月的生物量(干质量)、年地上净初级生产力(annual aboveground net primary productivity, ANPP)、最高地上现存生物量(peak live aboveground biomass, PLAB)等数据,用于模型参数的校正;1990—1999年的ANPP数据用于模型验证。建模所需的月均最高温度、月均最低温度和月均降水量来源于1970—1982年内蒙古白音锡勒牧场气象站的观测资料和1983—2000年内蒙古草原生态系统定位研究站的气象数据,这两个气象站在地理位置上仅相隔1 km,气象数据没有明显差异,可以表征研究区的气候格局。

1.3 研究方法

1.3.1 CENTURY 模型 CENTURY (Version 4.0) 模型^[16-17]是研究草原、农作物和森林生态系统C、N、P动态过程的模拟模型。模型运行的时间步长为一个月,所需参数有:月均最高和最低温度、月均降水量、土壤质地和土层厚度、植被类型和大气CO₂水平等。模型输出包括碳和氮通量、净初级生产力以及土壤有机质含量等^[18]。

CENTURY模型所需的样地初始化参数如表1、表2所示。其中,DRAIN参数可描述土壤水分的运输能力,被设置为1(1表示最大排水能力,0表示无排水能力);土壤容重、土壤持水力、土壤萎蔫点参数可由CENTURY模型网站^[19]的相关数据计算得到;土壤pH值参见陈佐忠等^[20]的研究;外部土壤氮输入参数根据Gilmanov等^[21]介绍的KHOM样地

表1 模型的初始化参数
 Tab. 1 Initial input parameter of the model

参数名称 Parameter	参数值 Parameter value	说明 Description
研究地点情况及控制参数 Site condition and control parameter		
SAND	0.60	砂粒含量 Sand content value
SILT	0.19	粉砂含量 Silt content value
CLAY	0.21	粘粒含量 Clay content value
BULKED	1.32	0~20 cm 土壤容重 Bulk density for 0~20 cm soil (g·cm ⁻³)
pH	7.56	表层(0~20 cm)土壤 pH 值 pH for 0~20 cm soil
NLAYER	7	土壤层厚度 Depth of soil layer
NLAYPG	2	植被根区厚度 Depth of vegetation rooting zone
DRAIN	1	土壤排水能力 Soil drainage ability
ASILT	0.11	土壤萎焉系数 Soil wilting capacity
AFIFL	0.25	土壤持水能力 Soil field capacity
外界营养输入参数 External nutrient input parameter		
epnfa(1)	0.2100	由年降水量决定的大气氮固定量方程的截距 Intercept value of the function for atmospheric nitrogen fixation determined by annual precipitation
epnfa(2)	0.0027	由年降水量决定的大气氮固定量方程的斜率 Slope value of the function for atmospheric nitrogen fixation determined by annual precipitation
epnfs(1)	-0.8600	由年降水量决定的非生物固氮量方程的截距 Intercept value of the function for non-symbiotic biological fixation determined by annual precipitation
epnfs(2)	0.0660	由年降水量决定的非生物固氮量方程的斜率 Slope value of the function for non-symbiotic biological fixation determined by annual precipitation

表2 气象参数
 Tab. 2 Climate parameter

月份 Month	月均降水量 Average month precipitation (mm)	月均最低温度 Average month minimum temperature (°C)	月均最高温度 Average month maximum temperature (°C)
1	0.3774 ± 0.3307	-29.2029	-13.0371
2	0.3771 ± 0.2657	-25.9943	-8.6857
3	0.6380 ± 0.4091	-15.9629	-0.3171
4	0.9449 ± 0.7302	-5.3457	11.2343
5	2.9449 ± 1.8637	2.0400	19.0400
6	5.7843 ± 2.6194	8.1000	23.6000
7	9.9960 ± 5.4483	12.0971	25.7000
8	7.3911 ± 3.4739	9.9629	24.1171
9	3.3674 ± 1.8379	2.5971	18.7029
10	1.5397 ± 1.4498	-5.9857	10.2943
11	0.6760 ± 0.6569	-16.5000	-1.2686
12	0.4080 ± 0.2814	-25.3943	-10.3886

确定。该样地与羊草样地处于同一纬度带(47.17°N),虽该样地的年降水量(441 mm)略高于羊草样地,但对土壤氮值的影响不大;初始的土壤有机质库参数以及各库的C/N根据文献^[22]计算得到;潜在的植物地上部分生产力参数根据模型的经验值计算得到,考虑到植物呼吸损失的碳量,将该值设为250 g C·m⁻²·month⁻¹;植物生长的理想温度参数由

1970—2000 年最热月的平均温度计算而得,植物生长的最高适宜温度为多年最高气温平均值;植物地上部分木质素含量为 6.3%,据此值可计算木质素和大气降水关系的参数。

1.3.2 模型的敏感性分析 将参数化值代入模型的参数文件中,样地的管理措施设为连续的多年轻度放牧,模型运转 5 000 年,使土壤有机质达到稳定状态.以土壤有机质的平衡态作为初始水平,将 1980—1989 年的气象参数值代入模型,管理措施为无放牧,继续运行模型.由于 ANPP 采用月最大地上生物量与当月的立枯生物量之和计算得到,因此选择植物地上部分生物量和立枯生物量对模型进行校正。

模型校正主要是检验模拟值与观测值之间的吻合程度,反复检验模拟结果,调整模型标准参数,直至模拟值与观测值之间不存在统计学上的显著差异.本文采用两种方法验证 CENTURY 模型的校正结果:1)模拟值与观测值进行线性回归分析;2)误差平方根(RMSE)。

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n (X_{\text{mod}} - X_{\text{msd}})_i^2 / n \right]^{1/2}$$

式中: X_{mod} 为模拟值; X_{msd} 为观测值; i ($i=1,2,\dots,10$)为年份 1980—1989。

敏感性分析的基本思路是每次变化模型中的一个或几个参数,观察参数变化对模型行为的影响.依据模拟结果,确定最敏感参数,并通过调整这些参数的赋值,使模拟结果与实际观测数据在统计学意义上达到较好的一致性. Metherell 等^[22]指出,使用 CENTURY 模型对 ANPP 模拟时,比较敏感的参数包括干湿沉降输入的氮量、样地非生物固氮量和潜在的植物地上生产力.根据研究区的实际情况,本文选择的敏感参数有表 1 中所示的 epnfa(1)、epnfa(2)、epnfs(1)、epnfs(2)和潜在的植物地上生产力[prdx(1)].在内蒙古典型草原区,几乎没有任何实测的资料用以估算干湿沉降氮的输入量和非生物固氮量.由于 Parton 等^[17]研究的样地 Shortandy 位于哈萨克斯坦境内,地理坐标为 52° N、71° E,1 月的最低温度为 -24.6 °C,7 月的最高温度为 27.2 °C,年均降水量 351 mm,其地理位置和气候特征与本研究区相近.为此,本文根据 Parton 等^[17]采用的干湿沉降氮输入量以及非生物固氮量值作为基准进行参数的敏感性分析. Parton 等^[17]建议,对于草原生态系统,潜在的植物地上生产力应在 200~300 g C · m⁻² · month⁻¹,本文取 250 g C · m⁻² · month⁻¹。

1.3.3 模型验证 通过对比分析 1990—1999 年的模拟结果与同期的实地观测数据,评价模型的模拟精度.将 1990—1999 年的气象数据、校正后的各类参数等代入模型中,管理措施仍为围栏没有放牧状态,运行模型,并对输出的结果进行分析.由于缺少 1990—1999 年野外实测的月生物量数据,本文依据同期 ANPP 值做模拟评价,仍采用模型校正部分所介绍的方法。

1.4 数据处理

利用 SPSS 15.0 软件对 1980—1999 年的 PLAB 观测值与 CENTURY 模型的模拟值、1990—1999 年 ANPP 的观测值与 CENTURY 模型的模拟值以及 1980—1999 年地上生物量的观测值与模拟值进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 模型参数的敏感性分析

在其他参数保持不变的情况下,对表 1 中 4 个参数以及 prax(1)在基准值的基础上分别做 6 种变化:±1%、±5%和±10%,对模型输出的 1980—1989 年的 ANPP 平均值与参数基准值下的模拟结果进行误差分析.由图 2 可以看出,epnfa(1)和 epnfa(2)在±1%和±5%变化范围内,ANPP 模拟值的偏离都不是很大(<20%),但在±10%变化时,ANPP 值的偏差>50%.epnfs(1)在变化+1%、-10%后,ANPP 值的偏差较大(>60%),其他情况下则偏差不大(<20%).当 epnfs(2)在±1%变化时,ANPP 值偏差较大(>20%),其他变化条件下的 ANPP 偏差不是很明显(<20%).prdx(1)对模拟结果的影响较大,只有在-5%的变化时,ANPP 值偏差<5%,其他情况均>20%,甚至超过 60%.说明 prdx(1)的变化对模拟结果的影响最大,其敏感度最高,该值的设置应为 250 g C · m⁻² · month⁻¹.epnfa(1)和 epnfa(2)对模型的输出较为敏感,在±1%的变化范围内调整参数值以校正模型;epnfs(1)和 epnfs(2)的调整范围在 1%~5%。

2.2 模型校正

根据研究区羊草样地 1980—1989 年的观测数据,比较分析模拟的 PLAB、ANPP 和地上生物量的季节动态。

PLAB 的观测值(X)与模拟值(Y)的线性回归方程为: $Y = 0.78X + 29.30$ ($R^2 = 0.55, n = 10$) (图 3),其误差平方根值 $RMSE = 35.60$ g · m⁻²。

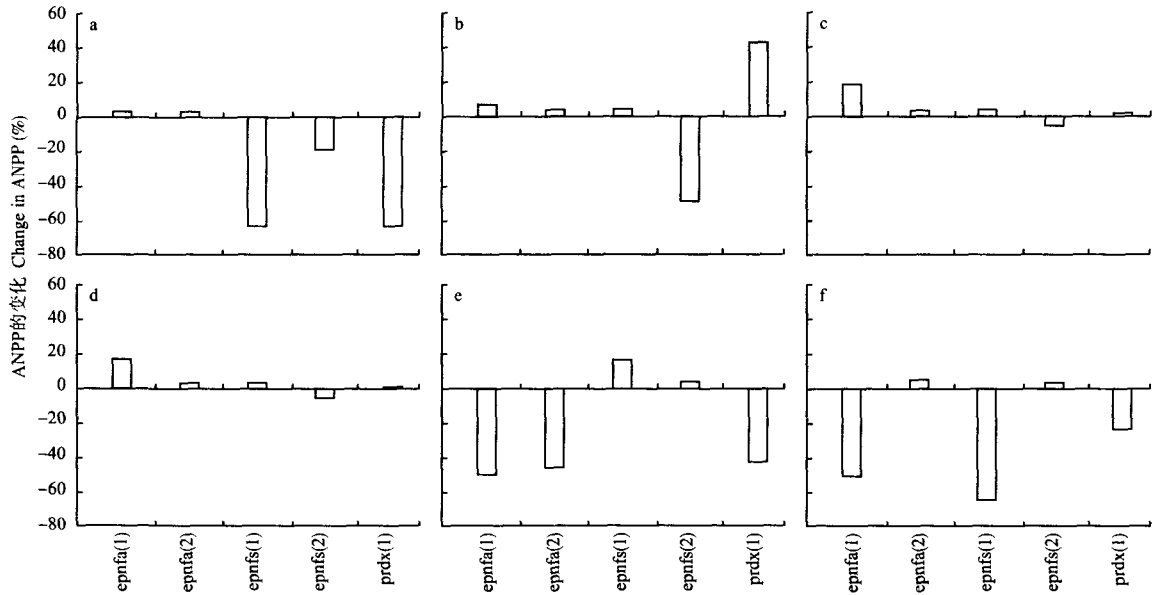


图2 模型参数的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of model parameters.

a) 参数值增加1% 1% increase in parameter values; b) 参数值减少1% 1% decrease in parameter values; c) 参数值增加5% 5% increase in parameter values; d) 参数值减少5% 5% decrease in parameter values; e) 参数值增加10% 10% increase in parameter values; f) 参数值减少10% 10% decrease in parameter values.

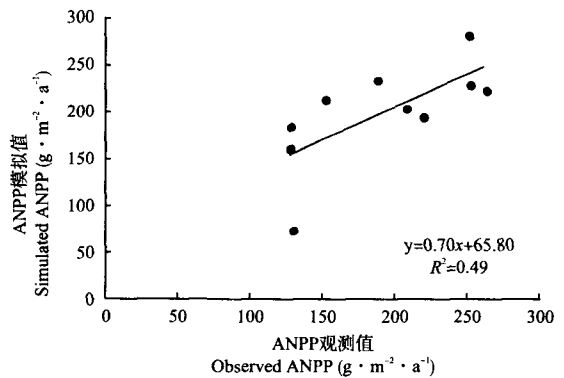
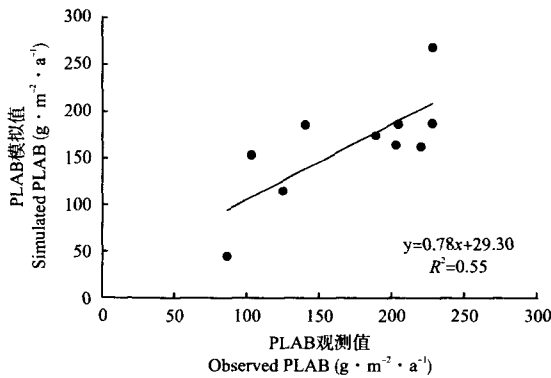


图3 羊草样地 PLAB、ANPP 的模拟值与观测值

Fig.3 Simulated and observed value of PLAB and ANPP in *L. chinensis* site (1980–1989).

ANPP 的观测值 (X) 与模拟值 (Y) 的线性回归方程为: $Y = 0.70X + 65.80$ ($R^2 = 0.49, n = 10$) (图3), 其误差平方根值 $RMSE = 37.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 其中, 1980 年 PLAB 的模拟值比观测值高近 90%, 原因可能是该年降水量较小, 而 CENTURY 模型对降水量的敏感性又不是很强的缘故.

CENTURY 模型较好地模拟了 1980—1989 年间羊草草地上生物量的季节动态 (图 4). 利用 1980—1989 年每年 5—9 月的地上生物量观测值 (X) 与相应的模拟值 (Y) 进行线性回归分析, 得到线性回归方程为: $Y = 0.76X + 30.70$ ($R^2 = 0.55, n = 43$).

模型校正结果表明, 经过参数的敏感性分析以及参数值调整, 模型的模拟值可较好的与 1980—1989 年研究区 PLAB、ANPP 以及地上生物量值的观测值吻合.

2.3 模型验证

1990—1999 年研究区羊草样地 ANPP 观测值 (X) 与模拟值 (Y) 的线性回归方程为: $Y = 0.71X + 81.80$ ($R^2 = 0.47, n = 10$) (图 5), 其误差平方根 $RMSE$ 为 $32.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 虽然其 $RMSE$ 值较高, 但 1990—1999 年间最大的 ANPP 观测值为 $264.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 误差仅有 10.4%, 对于以月为时间步长的 CENTURY 模型来说, 该 $RMSE$ 值是可以接受的^[17].

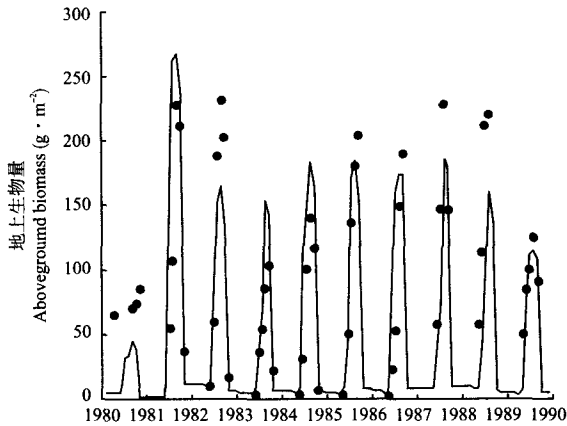


图4 1980—1989年羊草样地地上生物量观测值与模拟值的比较

Fig. 4 Comparison between the observed and simulated value of biomass for *L. chinensis* site (1980–1989).

—模拟值 Simulated values; · 观测值 Observed values.

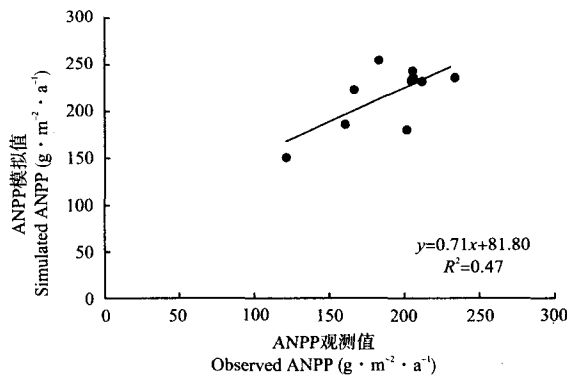


图5 羊草样地 ANPP 的模拟值与观测值

Fig. 5 Simulated and observed value of ANPP in *L. chinensis* site (1990–1999).

2.4 未来气候变化对羊草草原的影响

气候变化对生态系统初级生产力具有重要影响,已成为近年来全球变化研究的热点.气候变暖是当今全球性的环境问题,大气中 CO_2 浓度的不断增加对全球气候变化起着极其重要的作用,两者的协同作用影响着植被地上净初级生产力^[23].

IPCC(2002)^[24]排放情景预测,21世纪的大气 CO_2 浓度和全球平均表面温度都将升高. IPCC 第三次评估报告(TAR)指出,排放情景特别报告(SRES)中有6个例证的情景预测,到2100年,大气 CO_2 浓度将达到 $540 \sim 970 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而在工业化前和2000年却分别约为 280 和 $368 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 1990—2100年间全球平均地面气温较20世纪观测到的变暖中值高约2~10倍.21世纪全球年均降水量会增加,但在区域尺度上的增加或减少都有可能,主要在5%~20%之间变化.因此,本文以1980—1999年的实

测气象数据为基础,模拟了未来的几种可能气候变化情景下研究区羊草草原 ANPP 的变化:1)温度和降水均不发生变化(TP);2)单纯的气候变化,包括 $T_{i2}P$ 、 $T_{i2}P_{i10}$ 、 $T_{i2}P_{d10}$ 、 $T_{i2}P_{i20}$ 、 $T_{i2}P_{d20}$ 、 $T_{i4}P$ 、 $T_{i2}P$ 、 $T_{i4}P_{i10}$ 、 $T_{i4}P_{d10}$ 、 $T_{i4}P_{i20}$ 、 $T_{i4}P_{d20}$,其中,T、P分别表示温度和降水,下标i、d分别表示升高和降低,下标中的数字表示降水和温度升高或降低的值;3)温度和降水不发生变化, CO_2 从 $350 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 倍增到 $700 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (TPC);4)气候变化与 CO_2 倍增的协同作用,包括 $T_{i2}PC$ 、 $T_{i2}P_{i10}C$ 、 $T_{i2}P_{d10}C$ 、 $T_{i2}P_{i20}C$ 、 $T_{i2}P_{d20}C$ 、 $T_{i4}PC$ 、 $T_{i4}P_{i10}C$ 、 $T_{i4}P_{d10}C$ 、 $T_{i4}P_{i20}C$ 、 $T_{i4}P_{d20}C$,其中,T、P、C分别表示温度、降水和 CO_2 浓度,下标i、d分别表示升高和降低,下标中的数字表示降水、温度和 CO_2 浓度升高或降低的值.

以2140年为预测点,依据1980—1999年20年间实际观测气象数据所表征的温度与降水因子的格局特点,在大气 CO_2 浓度不发生变化情况下,利用40年的过渡期,逐渐改变各因子的值,达到预期的气候变化格局;然后,重复这样的20年尺度的格局4次,以期获得稳定的气候情景,提高模拟结果的可靠性.据此,设置未来可能的诸气候参数值.以未来大气 CO_2 浓度和降水格局保持不变、温度升高 2°C 为例,1980—1999年的年均温度格局如图6所示.假设40年后平均气温将比1980—1999年升高 2°C ,即2000—2039年间,每年的年均温度分别比前一年高 0.05°C ,2039年的年均温度较1999年高

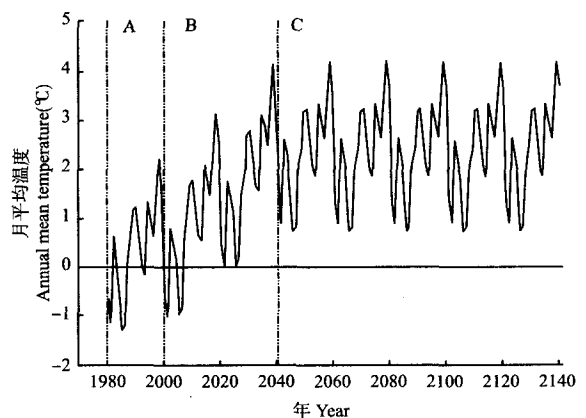


图6 模拟试验中年均温度随时间序列的变化

Fig. 6 Change of time series in annual mean temperature used in the simulation experiments.

该时间序列利用1980—1999年20年的温度格局产生,年均温度经过40年的过渡升高了 2°C . The time series was generated using the 20-year weather patterns between 1980 and 1999, and the annual mean temperature was increased by 2°C over 40 years through a ramp function. A: 目前气候格局 Current climate pattern; B: 气候变化“过渡”带“Ramp” transient climate change; C: 年平均温度升高 2°C 气候变化格局 Climate change pattern for annual mean temperature which is increased by 2°C .

2 ℃. 为了提高模型结果的可靠性,这种格局重复 4 次,一直到 2139 年.

预测结果表明(图 7),在气候条件不变的情况下(TP),2140 年内蒙古羊草草原 ANPP 为 $107.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 大气 CO_2 浓度不变、温度升高 2 ℃、降水增加 20% 后,ANPP 将从 $107.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升为 $110.59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,增幅为 3.18%;在其他气候变化情景下,内蒙古羊草草原 ANPP 均会降低,降幅最大的气候情景为温度升高 4 ℃、降水减少 20%,ANPP 仅为 $58.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,降幅达 45.56%;降幅最小的气候情景为温度升高 2 ℃、降水量增加 10%,ANPP 下降至 $105.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,降幅达 2.01%. 在降水量保持不变、温度升高 2 ℃情景下,ANPP 降低了 10%;在降水量保持不变、温度升高 4 ℃时,ANPP 降低了 34.5%,说明温度升高不利于 ANPP 的积累.

当大气 CO_2 浓度倍增后,不同气候变化情景下羊草草原 ANPP 的变化趋势与大气 CO_2 浓度不变的情景相似,但总体上都有所增加. 并且,有 3 个气候变化情景导致 ANPP 高于自然情形:1) 温度升高 2 ℃,降水保持不变;2) 温度升高 2 ℃,降水增加

10%;3) 温度升高 2 ℃,降水增加 20%. ANPP 增加最为明显的气候情景为大气 CO_2 浓度倍增、温度升高 2 ℃、降水增加 20%,此时的 ANPP 值为 $127.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,较气候不发生变化下增加了 18.97%. 大气 CO_2 浓度倍增,ANPP 最低值出现在温度升高 4 ℃、降水量降低 20% 的气候情景下,此时的 ANPP 值为 $67.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,较气候不发生变化的 ANPP 减少了 37.26%.

3 讨 论

气候变化已成为全球性问题,了解全球及不同区域气候变化对人类赖以生存的生态系统可能产生的影响已成为全球变化研究的焦点. 大气 CO_2 浓度升高,以及全球变化影响下的温度和降水的改变,都会显著地影响内蒙古羊草草原年地上净初级生产力及其动态. 本研究表明,CENTURY 模型能较好地模拟羊草草原 ANPP 的季节变化和年际波动. 模拟结果表明,锡林河流域羊草草原生产力对气候变化较敏感,利用实际观测的气象资料模拟获得的年净初级生产力随气温和降水的变化而呈现出一定的变化规律. 在大气 CO_2 浓度不变而气候发生变化的情景下,除了温度升高 2 ℃、降水增加 20% 的气候情景能促进 ANPP 增加 3.18% 外,其他情景均使 ANPP 有所减少,减幅在 2.01% ~ 45.56%. 这一发现与中国东北羊草草原的研究结果相似^[13]. 中国东北羊草草原在大气 CO_2 浓度保持不变、气候发生变化的前提下,ANPP 将降低 8% ~ 46%.

气候情景变化下 ANPP 值较大气 CO_2 浓度保持不变下 ANPP 值平均高 15.10% 的现象表明,在气候变化情景下,大气 CO_2 浓度倍增对内蒙古锡林河流域羊草草原具有一定的“施肥”效应,这与许多大气 CO_2 倍增单因子实验相似. 例如,在北美 Sonoran 荒漠生态系统对 C_3 和 C_4 植物进行大气 CO_2 浓度增加、ANPP 反馈效果的模拟研究发现,随着 CO_2 浓度的持续增加,ANPP 值持续升高^[25]. 另外,在 9 个不同的草原生态系统进行大气 CO_2 倍增实验,平均地上生物量增加了 14%^[26]. 有研究指出,大气 CO_2 浓度倍增可以使植物蒸腾速率降低,植物根和茎的碳氮比增加. Pepper 等^[27] 利用 DAYCENT 和 G'DAY 模型模拟了大气 CO_2 浓度倍增对美国科罗拉多州 CPER 草原的影响,DAYCENT 模拟结果显示 CO_2 倍增提高了土壤含水量,进而增加了初级生产力、土壤分解速率和土壤氮矿化率;G'DAY 模型显示 CO_2 倍增,土壤水质和分解速率少量提高,土壤氮矿化率降

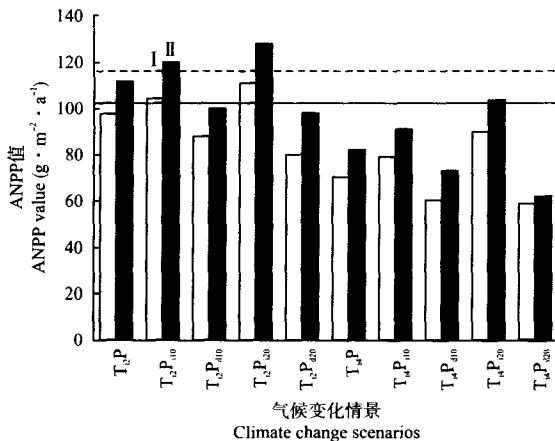


图 7 不同气候变化情景下 ANPP 值

Fig. 7 ANPP value under different climate change scenarios.

I: CO_2 浓度不变时 CO_2 concentration is unchanged; II: CO_2 浓度倍增时 CO_2 concentration is doubled. T, P, C 分别表示温度、降水和 CO_2 浓度 T, P, and C represented temperature, precipitation and CO_2 concentration, respectively. 下标 i 和 d 分别表示升高与减少 The subscripts i and d represented increase and decrease, respectively. T₂P 指温度升高 2 ℃ 而降水不变 T₂P represented the temperature was increased 2 ℃ while the precipitation was unchanged. 依此类推 The rest may be deduced by analogy. 实线表示自然情况下 2040 年 ANPP 值, 虚线表示温度和降水保持不变、大气 CO_2 浓度倍增下 2040 年 ANPP 值 The solid line indicated the value of ANPP under natural conditions in 2040, and the dashed line indicated the value of ANPP at the scenario of constant temperature and precipitation, doubled atmospheric CO_2 concentration in 2040.

低,初级生产力由于氮利用效率的提高而增加。肖向明等^[12]认为,由于大气 CO₂ 的“补偿”作用,使得在 CO₂ 浓度倍增和气候变化情景下,内蒙古锡林河流域羊草草原初级生产力的降幅显著降低。加拿大气候中心(CCC)的大气环流模型预测,CO₂ 浓度倍增后,锡林河流域平均温度上升 6.3 °C、年降水量增加 6%,与同样气候变化、CO₂ 浓度不变情景下的 ANPP 进行比较,ANPP 降幅从 30% 变为 10%。

本研究中温度升高 4 °C 时 ANPP 的降幅较温度升高 2 °C 明显。其原因可能是温度升高虽然可以提高植物光合速率,但由于蒸散加强和土壤变干导致植物光合速率下降,加之在干旱半干旱地区后者常常强于前者,因此,温度升高使得羊草草原生产力下降。在温度、降水和大气 CO₂ 浓度 3 个环境因子中,降水对 ANPP 的影响最大。降水量增加或减少 10%~20%,ANPP 均表现出很大波动。Ni 等^[28]利用 GCM 模型预测,到 21 世纪末,内蒙古草原区冬季降水量将增加,夏季降水量将减少。因此,内蒙古羊草草原 ANPP 在未来有可能降低。由于 CENTURY 模型对降水的波动不是很敏感(过湿年份的预测值偏低,而过干年份的预测值又偏高),由全球气候变化而引起的降水量变化对内蒙古草原生态系统的影响可能比本研究中的模拟结果更加显著^[29]。因此,今后采用 CENTURY 模型研究内蒙古草原生态系统动态时应对该模型中有关定量关系进行适当修改。

致谢 数据收集与论文写作过程中得到白永飞、黄建辉、潘庆民、武昕原的帮助,两名匿名评审者、牛建明、李国旗和易成波对文稿提出了重要的修改意见,一并感谢。

参考文献

- [1] Chapin FS III, Matson PA, Mooney HA. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2002
- [2] Fay PA, Carlisle JD, Knapp AK, *et al.* Productivity response to altered rainfall patterns in a C₄-dominated grassland. *Oecologia*, 2003, **137**: 245–251
- [3] Aguiar MR, Sala OE. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, **14**: 1–5
- [4] Bai YF, Han XG, Wu JG, *et al.* Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia Grassland. *Nature*, 2004, **431**: 181–184
- [5] Ives AR, Carpenter SR. Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 2007, **317**: 58–62
- [6] Li B (李 博), Yong S-P (雍世鹏), Li Z-H (李忠厚). The vegetation of the Xilin River basin and its utilization// Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, ed. Research on Grassland Ecosystem No. 3. 1988: 84–183 (in Chinese)
- [7] Wu JG, Loucks OL. The Xilingele grassland// US National Research Council, ed. Grasslands and Grassland Sciences in Northern China. Washington, DC: National Academy Press, 1992: 67–84
- [8] Bai Y-F (白永飞), Li L-H (李凌浩), Wang Q-B (王其兵), *et al.* Changes in plant species diversity and productivity along gradients of precipitation and elevation in the Xilin River basin, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(6): 667–673 (in Chinese)
- [9] Wang Q-B (王其兵), Li L-H (李凌浩), Bai Y-F (白永飞), *et al.* Effects of simulated climate change on the decomposition of mixed litter in three steppe communities. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(6): 674–679 (in Chinese)
- [10] Morgan JA, Lecaïn DR, Mosier AR, *et al.* Elevated CO₂ enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C₃ and C₄ grasses of the Colorado short-grass steppe. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 451–466
- [11] Zhou G-S (周广胜), Zhang X-S (张新时). Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1996, **20**(1): 11–19 (in Chinese)
- [12] Xiao X-M (肖向明), Wang Y-F (王义凤), Chen Z-Z (陈佐忠). Dynamic of net primary productivity and soil organic carbon of typical grassland ecosystems in Xilin River, Inner Mongolia, and its responses to climate change. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1996, **38**(1): 45–52 (in Chinese)
- [13] Wang YH, Zhou GS. Modeling responses of the meadow steppe dominated by *Leymus chinensis* to climate change. *Climatic Change*, 2007, **82**: 437–452
- [14] Ruosteenoja K, Tuomenvirta H, Jylhä K. GCM-based regional temperature and precipitation change estimates for Europe under four SRES scenarios applying a super-ensemble pattern-scaling method. *Climatic Change*, 2007, **81**: 193–208
- [15] Lü Y-Z (吕怡忠), Zhao Y-P (赵玉萍), Xia R-J (夏荣基). Characteristics of humus in chestnut soil at Xilin River basin, Inner Mongolia// Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, ed. Research on Grassland Ecosystem No. 4, 1992: 171–180 (in Chinese)
- [16] Parton WJ, Stewart WB, Cole CV. Dynamics of C, N,

- P and S in grassland soils: A model. *Biogeochemistry*, 1988, **5**: 109–131
- [17] Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, *et al.* Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 785–809
- [18] Gao L-P (高鲁鹏), Liang W-J (梁文举), Jiang Y (姜勇), *et al.* Dynamics of organic C in black soil of Northeast China, simulated by CENTURY model. I. Accumulation of soil organic carbon under natural condition. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(5): 771–776 (in Chinese)
- [19] Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University. Soil Calculator [EB/OL]. (2000-05-16) [2008-02-08]. <http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>
- [20] Chen Z-Z (陈佐忠), Wang S-P (汪诗平). Ecosystem of Typical Steppe in China. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Gilmanov TG, Parton WJ, Ojima DS. Testing the “CENTURY” ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing a wide climatic/soil gradient. *Ecological Modelling*, 1997, **96**: 191–210
- [22] Metherell AK, Harding LA, Cole CV, *et al.* CENTURY Soil Organic Matter Model Environment, Technical Documentation, Agroecosystem Version 4.0. Fort Collins: Colorado State University, 1993
- [23] Pan Y-D (潘愉德), Melillo JM, Kicklighter DW, *et al.* Modeling structural and functional responses of terrestrial ecosystems in China to changes in climate and atmospheric CO₂. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(2): 175–189
- [24] IPCC. Climate Change 2001. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- [25] Shen WJ, Wu JG, Grimm NB, *et al.* Effects of urbanization-induced environmental changes on ecosystem functioning in the Phoenix metropolitan region, USA. *Ecosystems*, 2008, **11**: 138–155
- [26] Mooney HA, Canadell J, Chapin FS III, *et al.* Ecosystem physiology responses to global change// Walker B, Steffen W, Canadell J, eds. The terrestrial Biosphere and Global Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 590–619
- [27] Pepper DA, Del Grosso SJ, McMurtrie RE, *et al.* Simulated carbon sink response of shortgrass steppe, tall-grass prairie and forest ecosystems to rising CO₂, temperature and nitrogen input. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**: 1–20
- [28] Ni J, Zhang XS. Climate variability, ecological gradient and the Northeast China Transect (NECT). *Journal of Arid Environments*, 2000, **46**: 313–325
- [29] Hou Y-Y (侯英雨), Liu Q-H (柳钦火), Yan H (延昊), *et al.* Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in 1982–2000. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1546–1553 (in Chinese)

作者简介 袁飞,男,1979年生,博士研究生.主要从事生态学模型和景观生态学研究,发表论文2篇. E-mail: fyuan@asu.edu

责任编辑 杨弘
