

# 羊草草原碳循环过程的模拟与验证

程 迁<sup>1,2</sup>, 莫兴国<sup>1\*</sup>, 王永芬<sup>2</sup>, 林忠辉<sup>1</sup>

(1 中国科学院 地理科学与资源研究所 水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 根据内蒙古典型羊草草原碳通量和生物量观测数据, 验证 VIP (Vegetation Interface Processes) 模型, 并模拟分析 1958) 2007 年该生态系统碳循环特征及其与环境因子的相关关系。结果显示: VIP 模型能够较准确地模拟地上生物量 ( $R^2 = 0.170$ ) 和净生态系统生产力 NEP ( $R^2 = 0.157$ ) 的变化趋势。羊草草原生态系统总初级生产力 (GPP)、净初级生产力 (NPP) 和生态系统呼吸 ( $R_e$ ) 在 1958) 1973 年间下降, 1973) 1993 年间增长, 1993 年后又出现下降的趋势。与环境因子的相关性分析表明, GPP、NPP 和  $R_e$  随  $CO_2$  和降水的增多而增大, 随温度升高和降水的减少而降低, 其中降水量与碳通量相关性最高, 呼吸与温度、降水、 $CO_2$  均存在一定程度的正相关关系。NEP 年际变化较大, 主要受控于年降水量, 以 228 mm 为界, 年降水量大于此值时, NEP 为正的较大。

**关键词:** 气候变化; 碳循环; VIP 模型; 羊草草原

中图分类号: Q145 文献标志码: A 文章编号: 1000- 3037(2010)01- 0060- 11

草原生态系统是陆地生态系统最重要的组分之一, 具有对气候变化敏感、碳收支年际波动大等特点, 在未来气候变化条件下可能发生较大变化<sup>[1]</sup>, 在全球碳循环和气候变化响应中发挥重要作用<sup>[2]</sup>。草原生态系统碳收支是生态学家关注的热点, 近年来相关研究得到了广泛开展。例如, Scott 等对 2003 年美国圣保罗河畔的半干旱草原净生态系统生产力 (Net ecosystem production, NEP) 进行了测定, 结果为  $63 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[3]</sup>; Kuchark 等报道了 2001) 2004 年美国威斯康星州南部的原始草原和人工草原的 NEP 分别为  $-114 \sim -119 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $-2.3 \sim -1.3 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[4]</sup>; Flanagan 等分析了加拿大北部草原 NEP 测定结果, 认为从 1998- 06 到 2000- 12 草原共积累了  $111.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其中大部分是在湿润的 1998 年积累的, 1999 年仅吸收了  $21 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而 2000 年则释放了  $18 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[5]</sup>; Ma 等报道了 2000 到 2006 年加拿大稀树草原及其附近开放草原 NEP 的范围分别为  $56 \sim 155 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $-144 \sim -88 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[6]</sup>; Barcza 等对匈牙利西部半天然半人工草原碳交换的研究表明该区域为净碳汇, 1999 年吸收了  $54 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2000 年吸收了  $232 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[7]</sup>。Freitag 等利用同位素示踪法对西非稀树草原碳通量的研究表明, 草原基本处于碳平衡状态或为微弱的碳源<sup>[8]</sup>。可见草原生态系统碳收支在不同土壤、气候条件下存在较大差异。

收稿日期: 2008- 08- 14; 修订日期: 2009- 09- 20

基金项目: / 8630 计划课题 (2006AA10Z228); 科技部 / 9730 中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究项目 (2002CB412500); 中国科学院地理科学与资源研究所创新三期领域前沿课题 / 人类干扰和自然变化双因子驱动的生态系统模型研究 0 (06GU0607SZ)。

第一作者简介: 程迁 (1983- ), 女, 吉林省吉林市人, 硕士, 主要从事生态系统模型研究。

\* 通信作者, E-mail: moxg@igsnrr.ac.cn

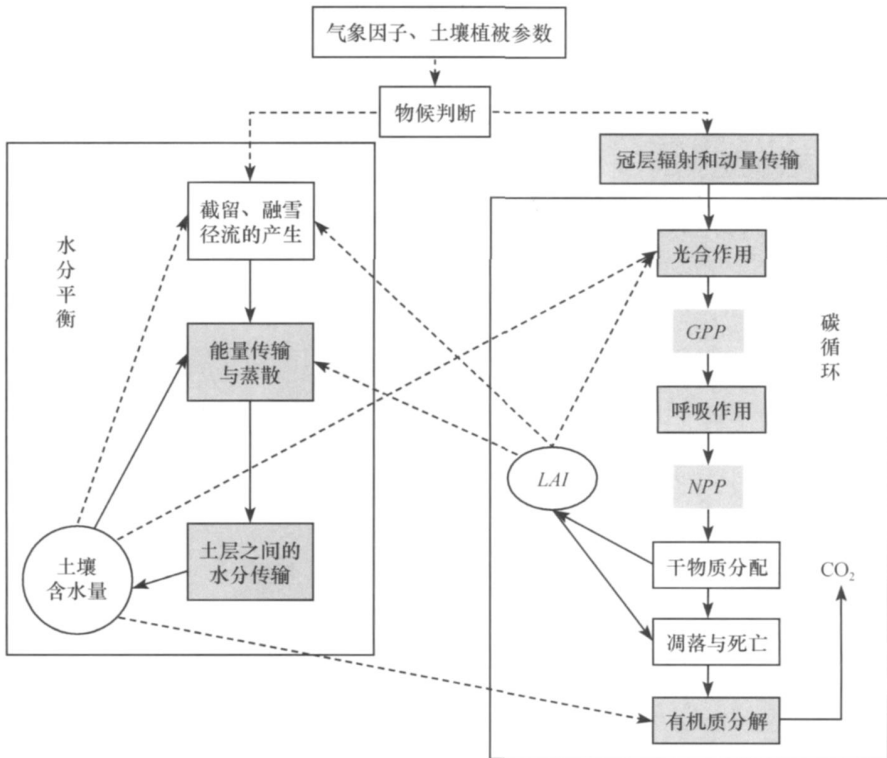
致谢: 感谢中国生态系统研究网络中心提供通量数据, 感谢国家气象局国家气象信息中心气象资料室提供气象数据。

我国草原占国土面积的 41.67% (中国统计年鉴, 2007), 主要类型为温带草原, 其中尤以内蒙古羊草草原最具代表性、典型性, 是研究植被对全球气候变化响应的典型区域。该地区气候变化明显, 自 1957 年以来, 年均温升高了 215e, 降水年际波动较大, 极端事件发生的频率和强度均有所增加。这样的气候变化条件给草原生态系统碳循环带来很多不确定性, 羊草草原碳循环如何响应值得关注。

基于过程的生态系统模型是研究碳循环的有效方法之一, 尤其在植被对气候变化响应研究中发挥了重要作用。VIP (Vegetation Interface Processes) 模型是自主开发的生态系统模型<sup>[920]</sup>, 模型基于生理生化过程描述了植被的光合作用; 在能量传输方面采用三源模式, 对蒸腾和蒸发进行了区分; 在动量传输过程中实现了气孔导度与光合作用的耦合。模型在对无定河流域<sup>[11]</sup>、卢氏流域<sup>[12]</sup>、华北农田<sup>[13]</sup>、内蒙古草原<sup>[14]</sup>等地水文过程和作物产量的模拟中均取得了较好的效果, 但在草地碳循环研究方面尚未得到应用。本文拟利用 VIP 模型对内蒙古羊草草原碳循环进行模拟, 在检验模型的基础上, 分析羊草草原碳收支变化特征以及植被对环境因子的响应机制, 以期增强对草地碳循环的认识。

### 1 模型简介

VIP 模型在模拟能量传输、水分平衡、植被光合作用、呼吸作用、干物质分配、土壤有机质分解转化等过程的基础上, 计算光合作用强度、初级生产力、土壤 - 植被 - 大气之间碳水交换通量以及植被和土壤中的碳储量。其基本框架如图 1 所示。



注: 图中灰色部分为小时步长, 其他为日步长; 实线箭头代表物质的传递方向, 虚线箭头代表存在影响关系。

图 1 VIP 模型结构简图

Fig 1 Framework of the VIP Model

对碳循环的模拟关键在于对光合作用和生态系统呼吸的准确估算。衡量生态系统碳吸收或释放的关键特征量 NEP, 即为总初级生产力 (Gross primary production, GPP) 与生态系统总呼吸 (ecosystem respiration,  $R_e$ ) 的差值。

$$NEP = GPP - R_e \quad (1)$$

GPP 以及与之相关的净辐射的计算在文献 [15] 和 [12] 中有详细阐述。生态系统呼吸  $R_e$  为生长呼吸  $R_g$ 、维持呼吸  $R_m$  和异养呼吸  $R_h$  之和, 即

$$R_e = R_m + R_g + R_h \quad (2)$$

### 11.1 干物质分配

模型假设草类只有根和叶两类器官, 同化产物只在两者之间分配。分配过程采用干物质累积方程进行描述, 即:

$$\frac{dM_i}{dt} = A_i GPP - R_{g_i} - R_{m_i} - D_i \quad (i = l, r) \quad (3)$$

其中,  $l, r$  分别代表叶和根。M 为干物质质量, D 为枯黄凋落率, A 为光合产物分配系数, 计算公式如下:

$$A = \exp(-kLAI) \quad (4)$$

$$A_r = 1 - A_l \quad (5)$$

$$LAI = SLA @ W_l \quad (6)$$

光合产物的分配是随着发育阶段的不同而变化的。在萌发、返青阶段分配到叶的同化产物比例较大, 返青期以后分配到根的比例会逐渐增加。因此, 在植物的不同生长阶段采用不同的经验系数  $k$  值以调整分配的比例。这里从萌芽到返青为第 1 阶段, 返青以后为第 2 阶段。LAI 为叶面积指数, SLA 为比叶重,  $W_l$  为叶生物量。

$R_g$  占 GPP 的比例固定, 即:  $R_g = EGPP$ , 这里 E 取 0.125,  $R_m$  由叶面呼吸  $R_{m_l}$  和根系呼吸  $R_{m_r}$  两部分组成, 即

$$R_{m_l} = \frac{G(T_a)W_l}{2cn_l} \quad (7)$$

$$R_{m_r} = \frac{G(T_s)W_r}{cn_r} \quad (8)$$

其中, G 为呼吸系数,  $T_a$  为气温,  $T_s$  为土壤温度,  $cn$  为碳氮比,  $W_r$  为根生物量。

草类根系的枯死过程由周转周期  $S$  (年) 计算,

$$D_r = \frac{1}{365S} W_r \quad (9)$$

叶片的凋落过程受到温度的影响, 当温度低于植物的低温耐受限度  $T_{dead}$  时, 植被叶片全部死亡。当温度高于  $T_{dead}$  时, 凋落的速度由如下经验公式表示,

$$D_l = W_l \left[ \frac{d - d_{sen}}{450 - d_{sep}} \right]^2 \quad (T_a > T_{dead}) \quad (10)$$

$$D_l = W_l \quad (T_a \leq T_{dead}) \quad (11)$$

$D_l$  为第  $d$  天凋落的叶量,  $d$  为日序,  $d_{sen}$  为叶片开始凋落的日序。

### 11.2 异养呼吸

异养呼吸  $R_h$  释放的  $CO_2$  主要来自于土壤有机质的分解过程。模型将土壤有机质按照分解速率的不同分为: 表面结构碳、表面代谢碳、根系结构碳、根系代谢碳、腐殖质碳、惰性

碳、表层微生物碳、土壤微生物碳等 8 个碳库。每个碳库有各自的分解和转化参数。释放总碳量为 8 个碳库释放碳量的和。即:

$$R_h = \sum_{m=1}^8 K_m dC_{pm} \quad m = 1, 2, \dots, 8 \quad (12)$$

其中  $K$  是被分解的有机碳转化为  $CO_2$  的比例,  $C_p$  为碳库储碳量。各碳库分解速率与土壤温度和水分直接相关:

$$dC_{pm} = K_m f(T) f(w) C_{pm} \quad m = 1, 2, \dots, 8 \quad (13)$$

其中,  $K$  为 30e 时含碳物质分解速率,  $f(T)$ 、 $f(w)$  分别为温度  $t$  和土壤含水量  $w$  的函数。

### 113 物候判断

物候模拟是对植被开始萌发的时间  $d_{start}$  和开始衰老的时间  $d_{sen}$  进行估算。这里  $d_{sen}$  由积温判断, 自萌发开始大于 0e 积温累计超过积温阈值  $GDD_s$  的日序即为  $d_{sen}$ 。  $d_{start}$  的计算采用 Yuan 等的草本物候算法<sup>[16]</sup>。当下列不等式成立时, 草类开始萌发:

$$GDD(T_0) + ak_{water} + b \leq GDD_c \quad (14)$$

$GDD(T_0)$  是大于  $T_0$  的积温,  $T_0$  为生长临界温度, 这里取 0e。  $GDD_c$  为植被开始萌发的积温阈值,  $a$  和  $b$  为参数。  $k_{water}$  为水分有效性, 由根层含水量  $w_{root}$ 、凋萎系数  $w_{wilt}$  和田间持水量  $w_{fc}$  算得:

$$k_{water} = \frac{w_{root} - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}} \quad (15)$$

另外, 假设在植被萌发阶段, 根系生物量会向叶转移, 转移量的大小与  $k_{water}$  成正比。

## 2 研究地点概况

### 211 研究地点

中国科学院内蒙古草原生态系统定位站羊草样地 (43b32dN, 116b40eE) 位于内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域。这里的羊草草原较好地代表了欧亚大陆温带草原的性状。自 1979 年开始, 样地作为定位站的永久围栏试验区未受到放牧的影响。

该地区气候属于典型的温带大陆性气候, 年平均气温为 215e, 年平均降水量为 350143mm, 年内降水的 89% 集中在 4) 9 月。 1957 至 2007 该地年均温以 0105e # a<sup>-1</sup> 的速度持续上升, 降水量年际分布差别较大, 变异系数为 0132。 土壤类型为典型的暗栗钙土, 厚度 100~ 150cm。 土壤有机质主要分布在 0~ 15 cm 土壤层, 含量在 11% ~ 31% 之间<sup>[17]</sup>, 土壤剖面中无明显钙积层。 受气候和土壤因素影响, 植被以广旱生根茎禾草羊草 (*Leymus chinensis*) 为建群种, 优势种包括冰草 (*Agropyron cristatum*)、大针茅 (*Stipa grandis*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、寸草苔 (*Carex duriuscula*) 等。

### 212 数据及其处理

模型输入变量包括土壤特征参数、 $CO_2$  浓度和日气温、降水、风速、相对湿度、气压和日照时数。 土壤特征参数主要由文献查得, 气象数据来自锡林浩特气象站,  $CO_2$  浓度是从 CRU (Climatic Research Unit) 下载的南极 1957) 2007 年  $CO_2$  浓度实测数据。 用于模型验证的生物量和碳通量数据来自中国生态系统研究网络内蒙古草原生态系统定位站。 碳通量数据由涡度相关系统测得, 此系统包括一个三维超声波测风仪 (CSAT3, Campbell Scientific Inc, MS, USA) 和一个开路  $CO_2/H_2O$  远红外  $CO_2$  气体分析仪 (LI-7500, LI-COR Inc, NE, USA), 测量距地面 215 m 高的  $CO_2$ 、潜热和感热通量。 通量数据采样频率是 10Hz 每

半小时输出一次。数据采集后经过密度校正、坐标旋转和数据筛选等处理。

### 3 模拟初始化及参数设置

模型中大部分参数沿用模型原参数,修改的参数如表 1所示。部分参数率定方法如下:物候模拟中参数  $a$ 和  $b$ 利用白永飞等 1993年在羊草样地实测的 9种牧草返青日期<sup>[18]</sup>和模型模拟得到的土壤水分数据拟合得到;对于 GDD<sub>s</sub>的值,根据白永飞等<sup>[18]</sup>实测的羊草群落主要物种结实期积温阈值,确定其数值范围在 1 774~ 2 005e 之间,依此进一步率定得到。分配模块经验参数  $k$ 值的确定考虑了两方面的影响,一是受  $k$ 值直接影响的 LAI 模拟值与实测值的一致性,另一方面是草原生态系统地上地下生物量的比值与实际变化范围要相符合。通过模拟值与实测值比较,调整  $k$ 值大小,得到从萌芽到返青  $k$ 取 0.12,返青以后  $k$ 取 0.17。

表 1 模型参数取值  
Table 1 Parameters and their values in the model

参数名	符号	取值	来源	参数名	符号	取值	来源
草原萌发的临界值	GDD <sub>c</sub>	50e	文献 [19]	枯萎积温阈值	GDD <sub>s</sub>	1 800e	率定
低温耐受限度	T <sub>dead</sub>	- 5e	文献 [19]	田间持水量	w <sub>fc</sub>	0.248	文献 [21]
物候参数	$a$	40	率定	凋萎系数	w <sub>wilt</sub>	0.069	文献 [21]
物候参数	$b$	10	率定	土壤饱和导水率	k <sub>sat</sub>	77.27 cm/s	文献 [22]
比叶重	SLA	10 m <sup>2</sup> # kg <sup>-1</sup>	实测	最大羧化速率	V <sub>max</sub>	60 Lmo CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /s	率定
根周转周期	S	1.82 年	文献 [20]	分配经验参数	$k$	0.2/0.7	率定

### 4 模型验证

将气象数据重复代入模型运转 1 000 年,达到土壤有机质库的平衡,然后在此基础上模拟碳循环过程,得到模拟结果。由于模型对羊草草原净辐射和水分过程的模拟结果在王永芬等的研究中已得到检验 ( $R^2$  值分别为 0.197和 0.180)<sup>[14]</sup>,这里仅就碳循环过程变量进行验证。本文利用实测的 1980) 1987年地上生物量<sup>[23]</sup>校准模型,图 2为模拟值与实测值的比较。由图 2(a)可见,在大部分年份模拟值均与实测值具有较好的一致性, $R^2 = 0.170$ ,趋势线斜率为 0.196,标准偏差为 181.24 gC# m<sup>-2</sup>,与 CENTURY 模型模拟效果  $R^2 = 0.171$  较为接近<sup>[24]</sup>,比 AVIM 模型对呼伦贝尔草原的模拟效果好 ( $R^2 = 0.150$ )<sup>[25]</sup>。但仍存在不足,图中 1981年生物量模拟值严重偏低(去除 1981年的数值后,标准偏差为 111.89 gC# m<sup>-2</sup>),这主要是由于 1980年下半年至 1981年 6月中下旬降水稀少(1980年 10月至 1981年 6月中旬总计 261.6 mm),土壤水分较低,严重的干旱致使植被返青后生长缓慢,直至降水增多时才开始迅速生长,而物候判断中,衰老仅由积温控制,未考虑其他因素的影响,因此模拟的植被衰老期较实际提前,导致生物量偏低。可见水分变化在物候的模拟中具有重要影响,应该作为参考因子在模拟中予以考虑。另外植被在干旱条件下生理适应机制的模拟,对于提高模型在极端干旱气候条件下的模拟效果也将有所帮助。

为验证模型模拟效果,分别将 2000) 2006年实测地上生物量和 2004年碳通量观测数据与模型结果进行了对比。图 2(b)为 2000) 2006年地上生物量模拟值与实测值的比较,两者的  $R^2$  为 0.132,说明模型基本能够反映地上生物量的变化。图 3为 2004年 NEP 模拟值与实测值的比较,5 002组有效数据对比结果显示  $R^2$  为 0.157,趋势线斜率 11.05,与 EALCO

模型对中亚热带人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量的模拟效果 ( $R^2 = 0.168$ )<sup>[26]</sup> 较为接近, 模拟的 NEP 与涡度相关法的实测结果一致性较好。模型估算的 1958) 2004年 NPP 平均值为  $343122 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ , 与我国羊草草原净初级生产力的总体平均水平  $344168 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$  非常接近, 与李凌浩等通过 1979) 1992年生长季内地上地下生物量实测资料估算的  $391.7 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ <sup>[27]</sup> 相差 12.4%。

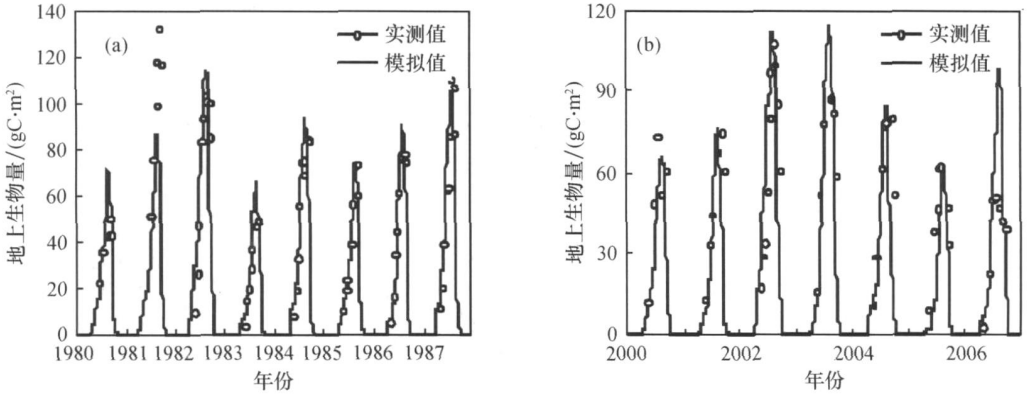


图 2 地上生物量模拟值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison between the simulated and the observed aboveground biomass

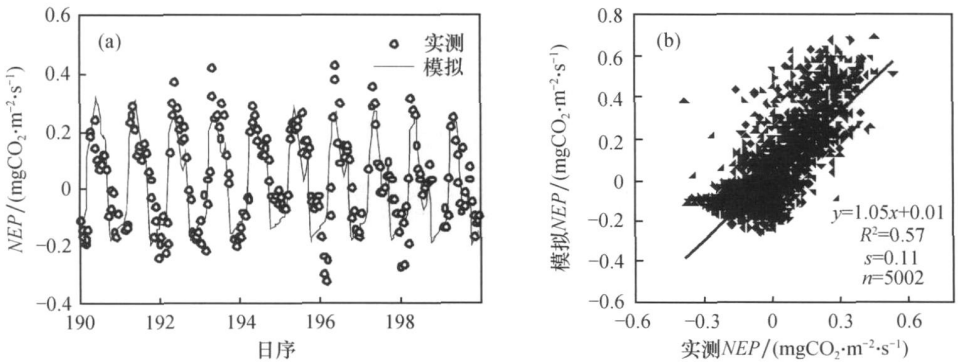


图 3 NEP 小时模拟值与实测值的对比

Fig. 3 Comparison between the simulated and observed hourly NEP

### 5 草地碳平衡分析与讨论

#### 5.1 碳平衡特征

1958) 2007年内蒙古典典型羊草草原年均温以  $0.05 \text{ e} \# \text{ a}^{-1}$  的速度增长, 降水量年际变化明显。GPP 和 NPP 在 1958) 1973 年间下降, 1973) 1993 年升高, 1993) 2007 年又出现下降趋势。李镇清等<sup>[28]</sup> 的研究也表明 1993 年后 NPP 出现明显下降的趋势。呼吸的变化趋势与 GPP 较为相似, 但变幅较小, 为  $68 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2}$ , 相对较稳定。GPP、NPP、NEP 年际波动较大, 变幅分别为  $160 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2}$ 、 $113 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2}$  和  $120 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2}$  (如图 4)。从 GPP 和  $R_e$  模拟结果的多年平均值来看 (图 5), GPP 为  $644 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ ,  $R_e$  为  $649 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ , NEP 50 年平均值为  $-5.5 \text{ gC} \# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ , 其中 26 年 NEP 为负, 24 年为正, NEP 为负的 26 年降水

平均值为 191 mm, NEP 为正的 24 年平均降水量为 261 mm。NEP 和降水量之间线性回归方程为  $y = 1158x - 360186$  ( $y$  代表 NEP,  $x$  代表降雨) ( $R^2 = 0.153$ ), 按此方程年降水量 228 mm 时 NEP 为 0, 年降雨量大于此值, NEP 为正的较大, 小于此值, NEP 为负的较大。过去 50 年 NEP 模拟值的趋势线方程为  $y = -0.18x - 0.51$ , 有轻微下降趋势。在 NEP 的数值估算方面, Li 等<sup>[1]</sup>利用 4 种方法计算了蒙古放牧草原的 NEP 值在  $-23 \sim 20 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$  之间, 李凌浩等利用历史数据估算的结果为  $26.9 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ <sup>[23]</sup>, CENTURY 模型模拟的 1980) 1989 年平均值为  $191.88 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ <sup>[29]</sup>, 李凌浩等利用实测的生态系统输入和 CENTURY 模型模拟的呼吸算得的 1980) 1989 年草原实测积累率  $391.72 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ <sup>[30]</sup>。本文模拟的 1980) 1989 年平均值为  $-171.52 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2} \# \text{ a}^{-1}$ , 与前面的研究结果相比偏低。其原因可能有两方面: 一是由于模型对于极端干旱年份的第二年(如 1981 年)的模拟过程中出现对生产力严重低估的现象; 二是对生态系统呼吸的估算偏高, 这是由于前面研究中呼吸量多利用 CENTURY 模型得到, CENTURY 模型在估算土壤碳库时主要考虑的是 0~20 cm 土层内的有机碳量, 估算值在  $4691 \sim 4758 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2}$  之间, 而 VIP 模型考虑的有机碳为根层碳含量, 其估算值为  $7266 \sim 7468 \text{ gC}\# \text{ m}^{-2}$ , 有机碳含量的明显差别是造成呼吸量较高, 进而导致 NEP 偏低的直接原因。

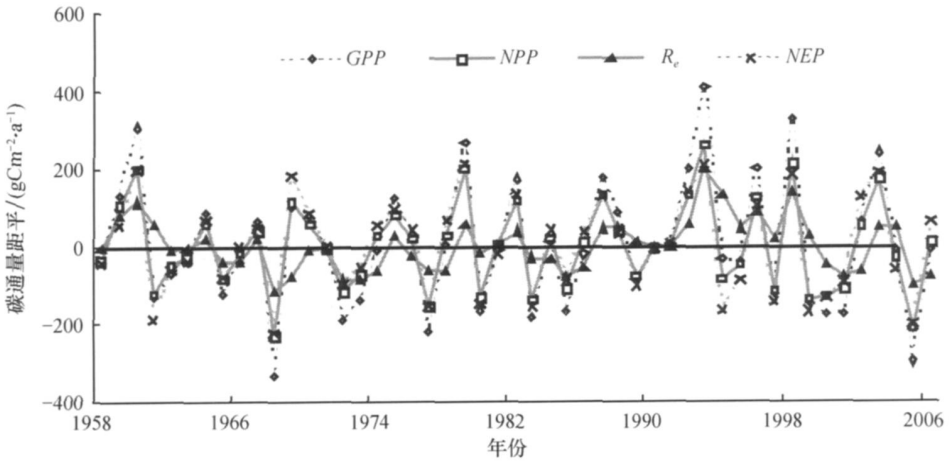


图 4 1958—2007 年羊草草原生态系统碳通量距平图

Fig. 4 Anomalies of carbon budget in *Leymus chinensis* steppe from 1958 to 2007

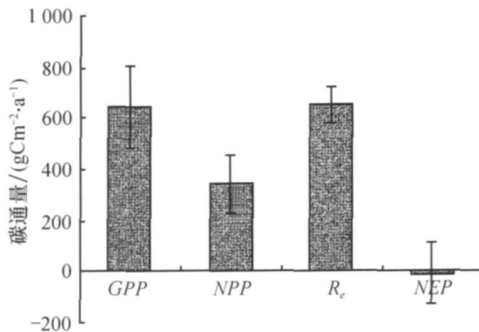


图 5 1958—2007 年碳平衡各分量的均值和波动范围

Fig. 5 The mean and range of carbon budget components from 1958 to 2004

## 512 草地碳循环对环境因子的响应

为了明确草地碳循环对于  $\text{CO}_2$  浓度、温度 (T)、降水 (P) 变化的响应机制, 分别在现实状态、 $\text{CO}_2$  浓度不变 (恒定在 1957 年水平)、T 不变 [ $T = T_{\text{实际}} - 0105 \text{ @}(\text{年份} - 1957)$ , 其中 0105 是平均每年温度的增幅]、降水增多 10%、降水减少 10% 5 种情景下模拟草原系统碳循环的变化。表 2 是各情景下模拟的碳通量 50 年平均值, 随着  $\text{CO}_2$  质量分数从 1957 年的  $314 \text{ @}10^{-6}$  升高到 2007 年的  $380 \text{ @}10^{-6}$  左右,  $\text{CO}_2$  的 / 施肥效应 0 明显, GPP、NPP 分别增长了 91% 和 912%, 同时  $R_e$  也增加了 8 2%, 这主要是因为生物量的增加直接带动了维持呼吸和生长呼吸的增加, 而植物体死后凋落物量的增加导致了  $R_h$  的升高。因此  $\text{CO}_2$  升高对草地生态系统碳吸收和碳释放均有促进作用。温度的升高一方面会刺激营养物质的矿化和生长季节长度的增长, 促进植物的生长和碳的固定, 另一方面会加速生物圈的新陈代谢, 导致短时间内更多  $\text{CO}_2$  气体释放到大气中。但在干旱的内蒙古草原, 温度升高促使草地干旱状况加剧, 水分胁迫对 GPP、NPP、 $R_e$  的抑制抵消了温度升高对于碳通量各分量的促进作用, 因此随着温度的升高碳通量各分量均出现了下降趋势。降水是草地植被生长的限制因子, 对土壤呼吸变化的影响仅次于土壤温度, 情景分析显示: 降水增加 10% 和减少 10% 分别使 GPP、NPP、 $R_e$  升高和降低 313% ~ 317% 和 410% ~ 418%。综上, GPP、NPP、 $R_e$  随降水的增多而增大, 随温度升高和降水的减少而减小。进一步对碳循环各通量与环境因子进行相关性分析, 结果显示: 在干旱地区, 水分是限制植被生长的关键因素。与温度和  $\text{CO}_2$  含量相比, 降水量与碳循环各变量之间均具有较高的相关性, 与 GPP、NPP、 $R_e$  的相关系数分别为 0164 0165 0153。王玉辉等利用 CENTURY 模型在松嫩羊草草原的研究显示 NPP 与降水之间相关系数为 0192<sup>[31]</sup>。李凌浩等研究表明温度和降水是影响土壤呼吸的关键因子, 可以解释土壤呼吸变化的 70%<sup>[32]</sup>, 本文中  $R_e$  与温度和降水相关系数分别为 0153 和 0132。

表 2 草原碳通量对环境因子的响应 ( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )Table 2 Effects of environmental factors on carbon fluxes in grassland ( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

情景	情景描述	GPP	NPP	$R_e$	NEP
1	现实状态 (三者都变)	6431.91	3431.22	6491.39	- 51.49
2	$\text{CO}_2$ 不变	5821.83 (- 91.5%)	3111.81 (- 91.2%)	5951.85 (- 81.2%)	- 131.02
3	T 不变	6601.60 (21.6%)	3601.47 (51.0%)	6531.28 (01.6%)	71.32
4	P 升高 10%	6671.98 (31.7%)	3551.83 (31.7%)	6701.70 (31.3%)	- 21.72
5	P 减少 10%	6131.23 (- 41.8%)	3271.54 (- 41.0%)	6181.50 (- 41.8%)	- 51.27

## 6 结论

草原生态系统对气候变化敏感, 碳收支年际波动较大, 在陆地生态系统碳循环中占有重要地位。内蒙古羊草草原地处生态脆弱地带, 气候变化显著, 在未来气候变化下碳循环发生变化的可能性较大, 因此加强该生态系统对气候变化响应机制的研究具有重要意义。本文利用生态系统模型 VIP 对内蒙古典型羊草草原生态系统碳循环过程进行了模拟, 并在此基础上分析了羊草草原碳循环特征。结果显示: VIP 模型能够较准确地模拟地上生物量 ( $R^2 = 0170$ ) 和 NEP ( $R^2 = 0157$ ) 的变化趋势。内蒙古羊草草原在 1958) 2004 年生产力年际波动较大, 1958 至 1973 年生产力降低, 1973 至 1993 年增加, 1993 年以后又出现下降的趋势。 $R_e$  变化趋势与生产力相同。在环境因子中, GPP、NPP、 $R_e$  随  $\text{CO}_2$  和降水的增多而增大, 随温度升高和降水的减少而减小, 其中降水量与碳循环各通量相关性最高, 呼吸与温度、降水存在



一定程度的正相关。内蒙古羊草草原碳收支年际波动较大,在不同的年份有吸收也有释放,其变化与降水关系密切,以 228 mm 为界,年降水量大于此值时,NEP 为正的较大,反之较小。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Li S G, Asama J, Eugster W, et al. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia[ J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1942-1955.
- [ 2 ] Ni J. Carbon storage in grasslands of China[ J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 2052-218.
- [ 3 ] Scott R L, Human T E, Williams D G, et al. Ecohydrological impacts of woody plant encroachment: Seasonal patterns of water and carbon dioxide exchange within a semi-arid riparian environment[ J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 3112-324.
- [ 4 ] Kucharik C J, Fayran N J, Cahill K N. A paired study of prairie carbon stocks, fluxes, and phenology: Comparing the world's oldest prairie restoration with an adjacent remnant[ J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1222-139.
- [ 5 ] Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland[ J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 5992-615.
- [ 6 ] Ma S Y, Baldocchi D D, Xu L K, et al. Interannual variability in carbon dioxide exchange of an oak/grass savanna and open grassland in California[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147: 1572-171.
- [ 7 ] Barcza Z, Haszpra L, Kondo H, et al. Carbon exchanges of grass in Hungary[ J]. *Tellus*, 2003, 55B: 1872-196.
- [ 8 ] Freitag H, Ferguson P R, Dubois K, et al. Water and carbon fluxes from savanna ecosystem of the Volta River watershed West Africa[ J]. *Global Planet Change*, 2007, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.08.003.
- [ 9 ] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 气候变化对无定河流域生态水文过程影响的模拟研究[ J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 4999-5007. [MO Xingguo, LN Zhonghui, LU Su Xia. Climate change impacts on the ecohydrological processes in the Wuding River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 4999-5007.]
- [ 10 ] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SWAT crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain[ J]. *Ecological Modelling*, 2005, 183: 3012-322.
- [ 11 ] 莫兴国, 郭瑞萍, 林忠辉. 无定河流域 1981—2001 年植被生产力和水量平衡对气候变化的响应[ J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(4): 4772-486. [MO Xingguo, GUO Ruiping, LN Zhonghui. Responses of gross primary productivity and water balance components in Wuding River region, the eastern part of the Loess Plateau from 1981 to 2001. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(4): 4772-486.]
- [ 12 ] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin[ J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 1252-142.
- [ 13 ] 莫兴国, 薛玲, 林忠辉. 华北平原 1981—2001 年作物蒸散量的时空分异特征[ J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 1812-187. [MO Xingguo, XUE Ling, LN Zhonghui. Spatio-temporal distribution of crop evapotranspiration from 1981 to 2001 over the North China Plain. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 1812-187.]
- [ 14 ] 王永芬, 莫兴国, 王艳芬, 等. 内蒙古草原生态系统蒸散及其主要分量的年际和季节变化[ J]. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1052-1060. [WANG Yongfen, MO Xingguo, WANG Yanfen, et al. Interannual and seasonal variation in ecosystem evapotranspiration and its composition in Inner Mongolia steppe, China. *Acta Botanica Sinica*, 2008, 32(5): 1052-1060.]
- [ 15 ] Mo X G, Liu S X. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 203-222.
- [ 16 ] Yuan W P, Zhou G S, Wang Y H, et al. Simulating phenological characteristics of two dominant grass species in a semi-arid steppe ecosystem[ J]. *Ecology Research*, 2007, 22: 784-791.
- [ 17 ] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[ J]. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 545-551. [WANG Yanfen, CHEN Zuozhong, Tieszen L T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguok, Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545-551.]
- [ 18 ] 白永飞, 徐志信. 典型草原 9 种牧草生长发育规律的研究[ J]. *中国草地*, 1994, 6: 212-27. [BAI Yongfei, XU Zhixin.]

- xin Study on the growth and development patterns of nine varieties of herbage in the steppe region. *Grassland of China*, 1994, 6: 21227. ]
- [ 19] 魏玉蓉, 潘学标, 敖其尔, 等. 草原牧草物候发育模型的应用研究: 以锡林郭勒草原为例 [ J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 1172121 [ WEI Yu2rong PAN Xu2biao Ao2qier et al. Application research of grass phenophase models in grassland A case study from Xilin Gol grassland. *Chinese Journal of Eco2Agriculture*, 2007, 15(1): 1172121 ]
- [ 20] 陈佐忠. 锡林河流域地形与气候概况 [ M ] / 草地生态系统研究 (第 3 集). 北京: 科学出版社, 1988 13222. [ CHEN Zuo2zhong Topography and climate condition in Xilin River Basin // Research on Grassland Ecosystem. Beijing Science Press, 1988 13222 ]
- [ 21] 李绍良. 草原土壤水分状况与植物生物量关系的初步研究 [ M ] / 草原生态系统研究 (第 1 集). 北京: 科学出版社, 1985 1962201. [ LI Sha2liang Study on the relationship between soil moisture and plant biomass in grassland // Research on Grassland Ecosystem. Beijing Science Press, 1985: 1962201. ]
- [ 22] 牛海山, 李香真, 陈佐忠. 放牧率对土壤饱和导水率及其空间变异的影响 [ J]. 草地学报, 1999, 7(3): 2112216. [ NIU Hai2shan LI Xiang2zhen, CHEN Zuo2zhong Effects of stocking rate on soil saturated hydraulic conductivity and its spatial variation. *Acta Agrestia Sinica*, 1999, 7(3): 2112216. ]
- [ 23] 李博, 雍世鹏, 李忠厚. 锡林河流域植被及其利用 [ M ] / 草原生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1988: 842183. [ LI Bo YONG Shi2peng LI Zhong2hou. The vegetation of the Xilin River basin and its utilization // Research on Grassland Ecosystem. Beijing Science Press, 1988: 842183. ]
- [ 24] 肖向明, 王义凤, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应 [ J]. 植物学报, 1996, 38(1): 45252 [ XIAO Xiang2ming WANG Yi2feng CHEN Zuo2zhong Dynamic of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin River basin of Inner Mongolia and their response to climate change. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1): 45252. ]
- [ 25] 季劲钧, 黄玫, 刘青. 气候变化对中国中纬度半干旱草原生产力影响机理的模拟研究 [ J]. 气象学报, 2005, 63(3): 2572266 [ JI Jin2jun, HUANG Mei, LIU Qing Modelling studies of response mechanism of steppe productivity to climate change in middle latitude semiarid region in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(3): 2572266. ]
- [ 26] 米娜, 于贵瑞, 王盘兴, 等. 基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量季节变异的模拟 [ J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 111921131 [ MINA YU Gu2ruj WANG Pan2xing et al. Modeling seasonal variation of CO<sub>2</sub> flux in a subtropical coniferous forest using the EALCO model. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 111921131 ]
- [ 27] Li L H, Han X G, Wang Q B, et al. Soil carbon balance in a native temperate grassland in the Xilin River Basin of Inner Mongolia [ J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(6): 7402742.
- [ 28] 李镇清, 刘振国, 陈佐忠, 等. 中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响 [ J]. 草业学报, 2003, 12(1): 4210 [ LI Zhen2qing LIU Zhen2guo CHEN Zuo2zhong et al. The effects of climates changes on the productivity in the Inner Mongolia steppe of China. *Acta Prata2turae Sinica*, 2003, 12(1): 4210 ]
- [ 29] Xiao X M, Ojima D S, Parton W J et al. Modelling of biomass and soil organic matter of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa grandis* steppe [ J]. *Res Grassland Ecosystem*, 1997, 5: 1182129
- [ 30] 李凌浩, 刘先华, 陈佐忠. 内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究 [ J]. 植物学报, 1998, 40(10): 9552961 [ LI Ling2hao LIU Xian2hua CHEN Zuo2zhong Study on the carbon cycle of *Leymus chinensis* steppe in the Xilin River basin. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(10): 9552961. ]
- [ 31] Wang Y H, Zhou G S. Modeling responses of the meadow steppe dominated by *Leymus chinensis* to climate change [ J]. *Climatic Change*, 2007, 82: 4372452
- [ 32] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究 [ J]. 植物生态学报, 2000, 24(6): 6802686. [ LI Ling2hao WANG Q2bing BAI Yong2fei et al. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by overgrazing and climate. *Acta Phytocologia Sinica*, 2000, 24(6): 6802686 ]

## Simulation of the Carbon Cycle in the Meadow Steppe Dominated by *Leymus Chinensis*

CHENG Qian<sup>1, 2</sup>, MO Xingguo<sup>1</sup>, WANG Yongfen<sup>2</sup>, LIN Zhonghui<sup>1</sup>

(1. Key Lab. of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences  
and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The Vegetation Interface Processes (VIP) model was used to simulate carbon cycle in the typical steppe dominated by *Leymus chinensis* in Inner Mongolia. The characteristics of carbon cycle and the relationship between carbon cycle and environmental factors were analyzed. Results showed that the model is successful in simulating variation of the aboveground biomass and net ecosystem production (NEP). Ecosystem primary production and respiration ( $R_e$ ) were decreasing during 1958 to 1973, and then kept increasing until 1993, after that decreased again. Sensitivity analysis showed the carbon cycle variation is more related with precipitation than other environmental factors, and  $R_e$  is influenced by all the three factors. Increase in the gross primary production (GPP), net primary production (NPP) and  $R_e$  are attributed mainly to the increasing precipitation and  $CO_2$  concentration, the increase in temperature and decrease in precipitation make them decrease. There are great interannual variations of carbon budget during 1958 to 2007 in the study site. There is a close relationship between NEP and precipitation, showing that NEP turns from negative to positive while annual precipitation is greater than 228 mm.

**Key words** climate change response; carbon cycle; Vegetation Interface Processes model; *Leymus Chinensis*