

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^{*1}

季劲钧

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101; 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

黄 玫

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101)

刘 青

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

应用大气植被相互作用模式(AVIM)模拟了内蒙古半干旱草原的净初级生产力和生物量。在此基础上,通过气温和降水变化的敏感性控制试验探讨了气候变化对草地初级生产力的影响机理。研究表明,无论是降水或温度的变化对草地的生产力都有显著影响。降水增加,生产力增加。而温度增加,生产力下降。气候变化对生产力影响的机理是:降水增加改善了土壤的水分供给条件,增强了光合速率,从而提高了生产力。温度增高,一方面可以增加光合速率,另一方面却使蒸散加强,土壤变干,光合速率下降,而后一作用过程在半干旱地区大于前者,因而温度增高使生产力下降。单一气候因子敏感性试验表明,温度增高或降低 2 °C,年净初级生产力(NPP)变化约 20%,中纬度半干旱草地地上生物量可以改变 30%以上。降水量变化 50%,年 NPP 改变 37%,地上生物量将改变近 30%。

关键词: 气候变化,净初级生产力,AVIM,半干旱草原。

1 引 言

中纬度半干旱草地是冷干型草原^[1],中国内蒙古草原就属于这一类。由于地处东亚季风北部边缘,具有季风气候的特点——夏季温湿,冬季干冷。草地生长期温度、水分配置适宜,水分利用率较高。不少研究者对内蒙古草地的生产力与气候的关系作了多方面的分析^[2~5],得到在区域上,地上生物量随年平均温度线性递减,随年降水量线性增加;在时间上高温年生产力下降;多雨年生产力增长。另一方面对草地的生产力进行了数值模拟研究^[6~7],并对未来气候情景下中国东北样带草地生产力作了预

测,在温度不变降水增加时,草地生产力增加,降水不变,温度增高时,生产力下降^[8]。这些研究表明内蒙古半干旱草原的生产力形成中,水分胁迫是主要限制因子,同时温度对生产力也有显著影响,是一个负作用因子。这些工作说明气候变化对草地生产力影响的事实,模拟也得到相似的结果,但未能从过程上分析气候变化影响草地生产力的机理。由于场地试验的复杂性,尚缺乏对草地生产力形成的过程试验分析。同时由于所使用的模式未能将地表物理状态的变化与植被生理过程的改变结合在一起,因而缺乏气候影响生产力的机理分析。因此,本文试图应用一个陆地表面生物物理与植物生理过程模型来分析

* 初稿时间:2004年4月12日;修改稿时间:2004年6月25日。

资助课题:国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412500);中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程主干科学计划(CX-IOG-E01-02-04);国家自然科学基金重大项目(49790020)。

作者简介:季劲钧,研究员,主要研究领域:气候学和全球变化。

在不同气候状态下生产力变化过程的机理,以加深对气候影响植物生理过程和生产过程的理解。

2 模式简介和试验设计

2.1 模式简介

用于气候变化对中国半干旱草原生产力变化影响研究的模型是大气植被相互作用模式 (AVIM)^[9~11]。这是一个包含陆地表面大气-植被-土壤之间物理传输过程与植被生长过程相互耦合的动力学模型。模型有 2 个主要模块,物理传输模块 (LPM)和植被生长模块 (PLT)。物理传输模块包含了太阳辐射在大气、植被冠层和土壤表面之间的传输、吸收和反射以及吸收的净辐射能在感热和潜热之间的分配。植被冠层和土壤表面以湍流形式向大

气输送热量和水分。降水经过冠层到土壤表面,根据土壤和大气湿润状况在入渗、蒸发和地表径流之间进行分配。地表的总蒸散由土壤表面的蒸发、叶面的蒸腾和植株蒸发组成。在植物生长模块中包含了光合作用、维持呼吸和生长呼吸、光合产物在器官中的分配、凋落及物候控制和凋落物的分解等。

气候的变化通过大气与植被、土壤之间的能量和水分交换过程决定土壤和植被的温湿状况。这些环境条件和光合有效辐射以及大气中 CO₂ 浓度一起作用于植物的生理过程:光合、呼吸和物候过程,形成净初级生产力 (NPP)。经过干物质的分配使植物生长,进而又改变植被的形态,如叶面积指数等,再改变地表的物理参数,反馈到地面的物理交换过程中去 (图 1)。

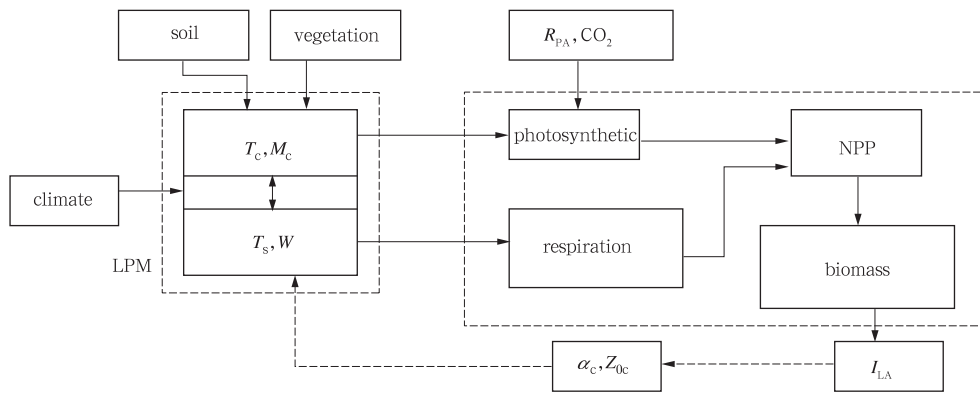


图 1 AVIM 结构图

(T_c, T_s 分别表示植被冠层和土壤温度; M_c 是冠层中的液态水, W 为土壤水分, R_{PA} 是光合有效辐射, α_c 表示冠层反照率, Z_{0c} 为冠层粗糙度, I_{LA} 为叶面积指数)

Fig. 1 Schematic structure of the atmosphere-vegetation interaction model (AVIM)

(T_c and T_s are temperature of canopy and soil, respectively; M_c is the liquid water in canopy, W is soil moisture, R_{PA} is photosynthetic effective radiation, α_c is canopy albedo, Z_{0c} is canopy roughness, I_{LA} is leaf area index)

现在应用的 AVIM 在原模型^[9]的基础上对若干物理和生理过程的参数化做了若干改进。在土壤物理过程部分采用多层 (10 层) 模式和详细水文过程,包含了超渗产流和蓄满产流的机制,因而能更好地模拟土壤湿度和水的输送过程。在植物生长模块采用新的光合速率方案和干物质在植物器官中的分配方案等^[12]。同时已将 AVIM 应用于各种生态系统,建立了系统的植被生理生态参数集,估算了全球植被与大气之间的碳交换^[13]。

AVIM 对植物光合作用的参数化采用了 Farquhar-Collatz 等^[12, 14, 15]的方案,考虑了光合作用的生物化学过程对环境变化的响应,叶子的光合速率

A 由叶绿素的光合酶浓度限制的羧化率 W_c 和光通量限制下的羧化率 W_j 中的小值决定,即

$$A = \min(W_c, W_j) \tag{1}$$

其中

$$W_c = \begin{cases} V_{cmax} & C_4 \\ \frac{V_{cmax}(C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_C(1 + O_i/K_O)} & C_3 \end{cases} \tag{2}$$

$$W_j = \begin{cases} \frac{\alpha}{4} \frac{R_{PA}(C_i - \Gamma^*)}{C_i + 2\Gamma^*} & C_4 \\ \alpha_1 R_{PA} & C_3 \end{cases} \tag{3}$$

式中 V_{cmax} 是 Rubisco 的最大羧化率, C_i 和 O_i 分别是叶子内部 CO₂ 和 O₂ 的浓度, Γ^* 是 CO₂ 的补偿

点, K_C 和 K_O 分别是对 CO_2 和 O_2 相应的 Michaelis-Menten 常数, R_{PA} 是光合有效辐射, α, α_1 是电子传输的量子效率。式(2)和(3)中 C_3, C_4 分别对应 C_3, C_4 植物。

V_{\max} 是温度、土壤水分和叶中含氮量的函数, 取如下形式:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= V_{\max 25} f(N) \cdot f(W_s) \cdot f(T) \quad (4) \\ f(T) &= Q_{10}^{0.1(T_c - 25)} \\ f(W_s) &= (1 - e^{-b|w - w_i|})^{-1} \\ f(N) &= 1 \end{aligned}$$

现暂不考虑羧化率对叶中氮浓度的响应, $Q_{10} = 2.0$, T_c 是叶温, $V_{\max 25}$ 是 V_{\max} 在 $25^\circ C$ 时的值, K_C, K_O 都是叶温的函数。 W_s 是 W 为土壤含水量, W_i 为土壤凋萎湿度, b 为实验拟合参数。

另一方面, 大气中 CO_2 进入叶气孔进行光合作用是一个扩散过程, 因而有

$$A = \frac{1}{1.65 p_s} (C_a - C_i) (g - g_b) \quad (5)$$

其中 C_a 是大气 CO_2 的浓度, C_i 是叶内 CO_2 浓度, p_s 是地面气压, g 和 g_b 分别是气孔导度及其最小值。

由实验得到联系光合速率和气孔导度的一个关系式^[15]

$$g = m \frac{A}{C_a} h_s + b \quad (6)$$

h_s 是叶片周围的相对湿度, m, b 是实验常数。

由式(1), (5)和(6)可以同时解出光合速率和气孔导度。

植被的呼吸分为维持呼吸 R_m 和生长呼吸 R_g 。维持呼吸与器官生物量成正比, 且随温度而变, 生长呼吸正比于器官生物量的增长速率。

$$R_{mi} = R_{mi25} 2.0^{0.1(T_i - 25)} M_i \quad (i = f, s, r) \quad (7)$$

R_{mi} 是器官维持呼吸, f, s, r 分别表示叶、茎和根, R_{mi25} 是在 $25^\circ C$ 时单位生物量的呼吸率, M_i 是器官生物量。 T_i 是冠层温度(对叶, 茎)或土壤温度(对根)。

$$R_{gi} = \eta_i \frac{dM_i}{dt} \quad (8)$$

R_{gi} 是器官生长呼吸速率, $\frac{dM_i}{dt}$ 是器官生物量的增长速率。当 $\frac{dM_i}{dt} < 0$ 时, $R_{gi} = 0$ 。 η_i 是分配系数, $\sum_i \eta_i = 1$ 。

植物的净初级生产率(N_{PP})是总光合与呼吸之差

$$N_{PP} = A_c - \sum_i R_{mi} - \sum_i R_{gi} \quad (9)$$

式中 $A_c = \frac{1 - e^{-K \cdot I_{LA}}}{K} A$ 是冠层总光合; K 为冠层消光

系数; I_{LA} 为叶面积指数; $\sum_i R_{mi}, \sum_i R_{gi}$ 是各器官呼吸之和。

2.2 模式检验

AVIM 已经应用于不同生态系统如长白山森林^[9]、内蒙古草原^[10]和河北小麦^[16]等的模拟, 得到合理的结果。在文献[15]中, 对华北冬小麦返青后到收割全过程的地表水、热、 CO_2 以及叶、茎、根和籽粒生物量进行了模拟并与观测值进行了比较。在文献[13]中给出了全球 1637 个各种生态系统的 NPP 模拟值与观测值的比较, 两者相关系数是 0.86, 超过了 0.01 信度。本文主要目的是讨论气候变化对草地生产力的影响, 验证模式对草地生产力的模拟能力。图 2 为模拟的位于 $48^\circ 46' N, 118^\circ 45' E$, 以羊草、大针茅为主要建群种的内蒙古东北部呼伦贝尔盟典型草原的地上生物量与实际观测值的比较, 其中生物量观测资料来源于邢旗等^[17]的研究。由图可见, AVIM 对草地生物量的模拟与野外观测是基本一致的(1991 年缺生物量观测值)。通过统计分析发现, 两者相关系数达 0.708, 也超过 0.01 信度。

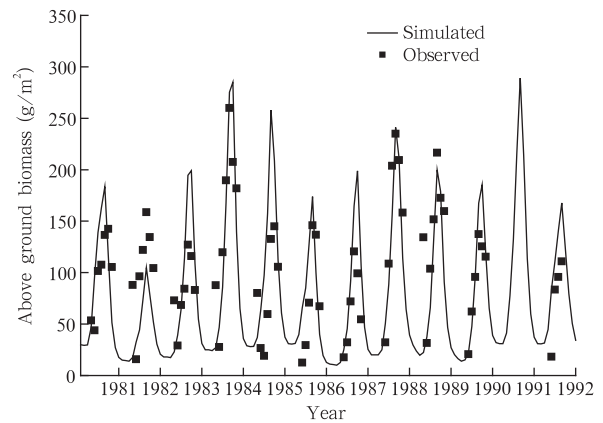


图 2 野外观测地上部生物量与 AVIM 模拟值比较
Fig. 2 Simulated and observed above ground biomass

2.3 试验方法

内蒙古草原实际气候变率和未来可能的变化情景对草地生产力的影响是一系列生物物理和生理过程的结果, 且随着气候的季节变化和生长期不断变化。为分析这些过程, 现将上述模式应用于一个观察点进行 1 a 的模拟试验。试验点选在上述内蒙古东北部呼伦贝尔盟的典型草原 ($48^\circ 46' N, 118^\circ 45' E$), 以羊草、大针茅为主要建群种。选取离试验点最近气候站新巴尔虎右旗 ($48^\circ 13' N, 118^\circ 16' E$) 的气象资料为驱

动。在文献[10]中曾用 AVIM 对内蒙古草原的地表物理状态和草原生理过程的年变化进行模拟分析,本文着重讨论半干旱草原对气候变化的响应机理。

对于内蒙古半干旱草原来说,生产力与降水量有较好的关系,图 3 为观测的内蒙古草原地上生物量(8月)与内蒙古呼伦贝尔草原新巴尔虎右旗气象站 5~8 月总降水量。其相关系数为 0.596,达到 0.053 的显著性水平。显然草地生物量与降水量确有较密切的关系,一般情况下,草地生物量随降水量的增加而加大。

为研究内蒙古草原的气候变化率,在草原上选取 5 个代表站(海拉尔、新巴尔虎右旗、东乌、阿拉善右旗、锡林浩特),分别计算了 1971~2000 年各站多年平均草地生长期(4~9 月)月平均气温及降水量的标准差 S 。计算方法如下

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

表 1 内蒙古草原气象站 1971~2000 年 4~9 月月平均气温、月降水量及标准差
Table 1 Monthly mean temperature and precipitation from April to Sept. and their standard deviation for meteorological stations in Inner Mongolia from 1971-2000

站点	因子	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
海拉尔 49°13'N, 119°45'E	平均气温(°C)	2.40	11.04	17.33	19.92	17.56	10.27
	(标准差)	(1.64)	(1.42)	(1.51)	(1.02)	(1.21)	(1.13)
	降水量(mm)	12.03	21.46	63.34	102.77	90.50	39.96
	(标准差)	(9.33)	(18.32)	(29.77)	(39.11)	(44.14)	(25.18)
新巴尔虎右旗 48°40'N, 116°49'E	平均气温(°C)	3.38	12.20	18.93	21.48	19.07	11.53
	(标准差)	(1.66)	(1.33)	(1.64)	(1.16)	(1.11)	(1.10)
	降水量(mm)	6.40	11.81	39.17	83.88	78.14	30.83
	(标准差)	(6.61)	(10.92)	(22.15)	(54.40)	(54.32)	(23.67)
东乌 45°31'N, 116°58'E	平均气温(°C)	4.06	12.10	18.12	20.96	19.02	11.70
	(标准差)	(1.69)	(1.25)	(1.39)	(1.26)	(1.25)	(1.07)
	降水量(mm)	6.68	19.62	40.47	84.02	59.23	26.16
	(标准差)	(6.15)	(18.05)	(20.72)	(43.63)	(34.94)	(16.12)
阿拉善右旗 39°13'N, 101°41'E	平均气温(°C)	10.50	17.00	21.73	23.95	22.39	16.86
	(标准差)	(1.49)	(1.18)	(0.94)	(1.24)	(0.98)	(1.05)
	降水量(mm)	3.61	9.27	20.53	27.23	28.02	16.96
	(标准差)	(4.28)	(10.15)	(20.58)	(21.46)	(18.35)	(13.42)
锡林浩特 43°57'N, 116°04'E	平均气温(°C)	5.29	12.91	18.45	21.10	19.26	12.50
	(标准差)	(1.77)	(1.03)	(1.27)	(1.38)	(1.30)	(1.22)
	降水量(mm)	7.44	23.28	35.51	77.74	64.70	22.67
	(标准差)	(8.94)	(25.22)	(20.54)	(56.51)	(44.50)	(16.75)

这 5 站代表了内蒙古草原东部和中部草原气候状态和变化率。可见,一般温度变化为 1~2 °C,降水量的变化率相当大,约为降水量的 40%~100%。这是因为该地带处于东亚季风的北部边缘,年际变化率受季风系统变化的强烈影响。为了易于了解不

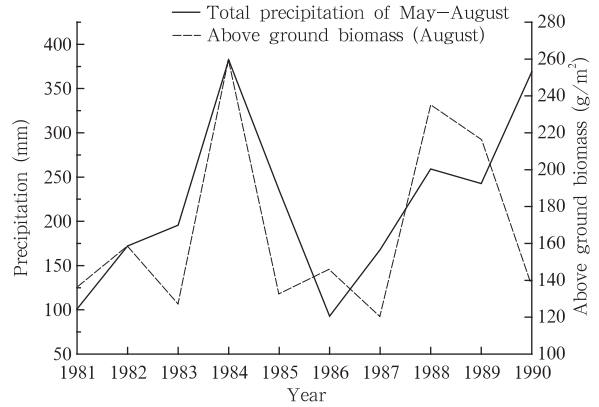


图 3 1981~1990 年内蒙古草原地上生物量(8月)与 5~8 月总降水量

Fig. 3 The above ground biomass of Inner Mongolia steppe in August and the total precipitation from May to August

其中, n 为样本量, x_i 为逐月的气温或降水量, \bar{x} 为降水量或气温的多年平均值,计算结果列于表 1。

同气候环境影响草原生产力的过程,现采用单因子变化的方法进行模拟。根据内蒙古草原的气候变化特点,选取 1985 年(试验区 1971~2000 年的多年平均气温为 1.09 °C,降水量为 265 mm;1985 年平均气温为 0.4 °C,降水量为 270 mm。试验区多年平

均夏季(6~8月)气温为 19.8 °C, 降水量为 201 mm; 1985 年夏季平均气温为 18.5 °C, 降水量为 195 mm) 代表平均气候年。在此基础上, 参考了上述内蒙古草原月平均气温和月降水量的变化幅度及未来可能的气候变化情景^[18], 设计了这样一组模拟试验: (1) 年平均温度增加或减小 1 和 2 °C, 而降水量不变; (2) 温度不变, 降水量增加或减小 25% 和 50%。用气候

变化后模拟的变量与控制年变量之差来分析。

3 结果分析

3.1 温度变化

温度变化 ±1 °C 和 ±2 °C 对草地生产力的影响是相似的, 这里以温度增高或降低 2 °C 为例来分析。如图 4 所示, 整个年变程可分为几个阶段, 3 月底以

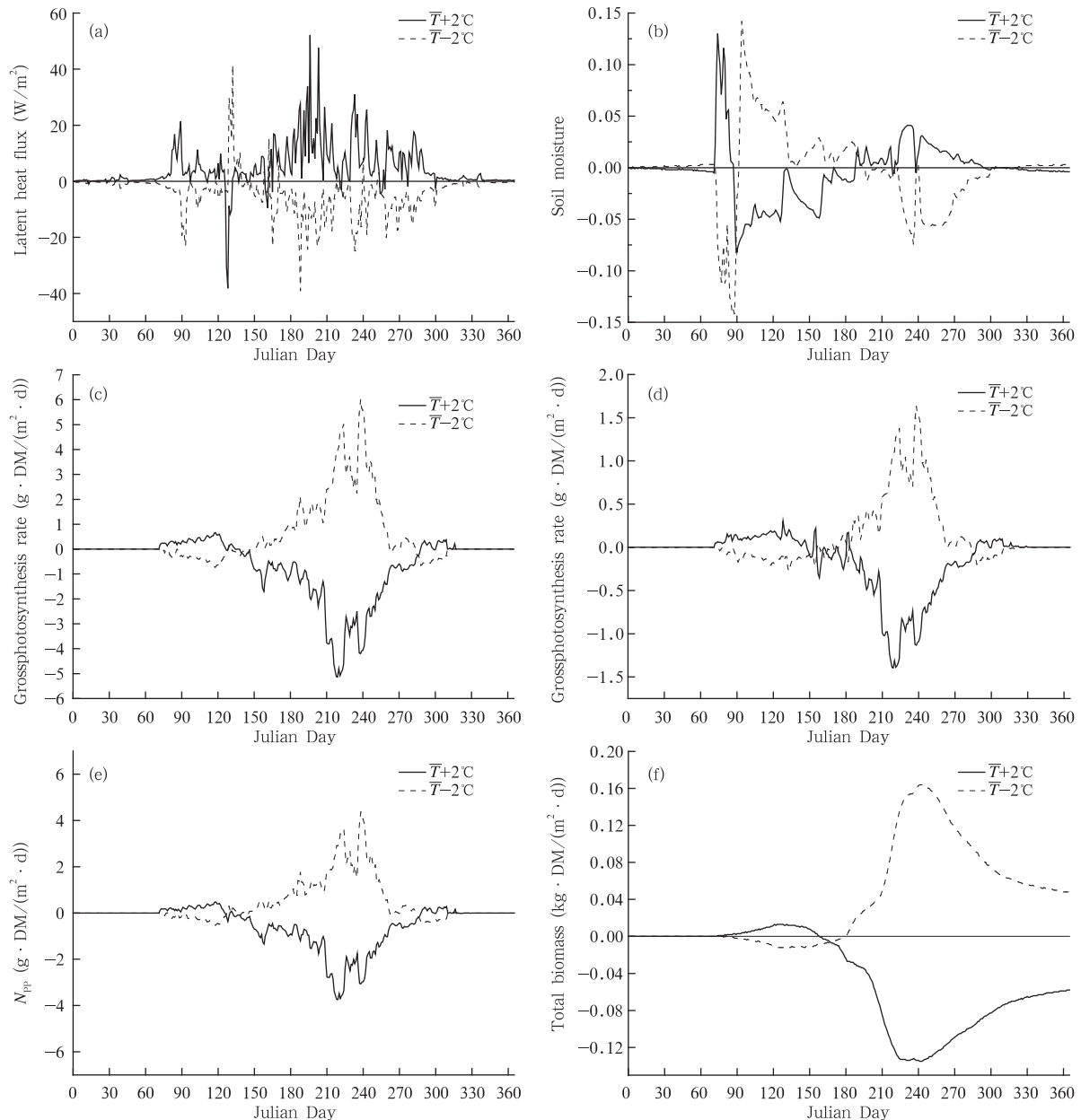


图 4 日平均气温增加或减少 2 °C 时地表物理状况和草地植物生理过程的变化

(a. 潜热通量, b. 土壤湿度, c. 总光合速率, d. 总呼吸速率, e. 净初级生产力, f. 总生物量)

Fig. 4 The response of steppe land surface physical fluxes and physiological process to ±2 °C daily temperature change

(a. latent heat flux, b. soil moisture, c. gross photosynthesis rate, d. gross respiration rate, e. NPP, f. total biomass)

前,该地通常有积雪,温度变化对地面水分、热量通量没有显著影响。由于温度(比正常)增高,融雪时期提前,3月下旬土壤湿度突然增大(图 4b),于是蒸发增强(图 4a);当温度偏低时,融雪时间推迟,在此时段内,土壤湿度偏小,蒸发亦弱(图 4a,b)。4月初至5月中温度增高(降低),光合速率增强(减弱),同时呼吸速率也增强(减弱)。这一阶段,温度对光合

和呼吸过程的直接作用是主要的(图 4c,d)。5月中以后,气温的增加使空气饱和差增大(大气中水汽含量未变)因而蒸散增强(图 4a),土壤湿度随之下降(图 4b),并形成水分胁迫,使光合作用减弱,尽管此时温度升高可直接使光合作用增强,但最终结果仍使光合速率减弱(图 4c),最大差异在 8~9 月,可达 $5 \text{ g} \cdot \text{DM}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,此时叶面积指数也达到最大。10

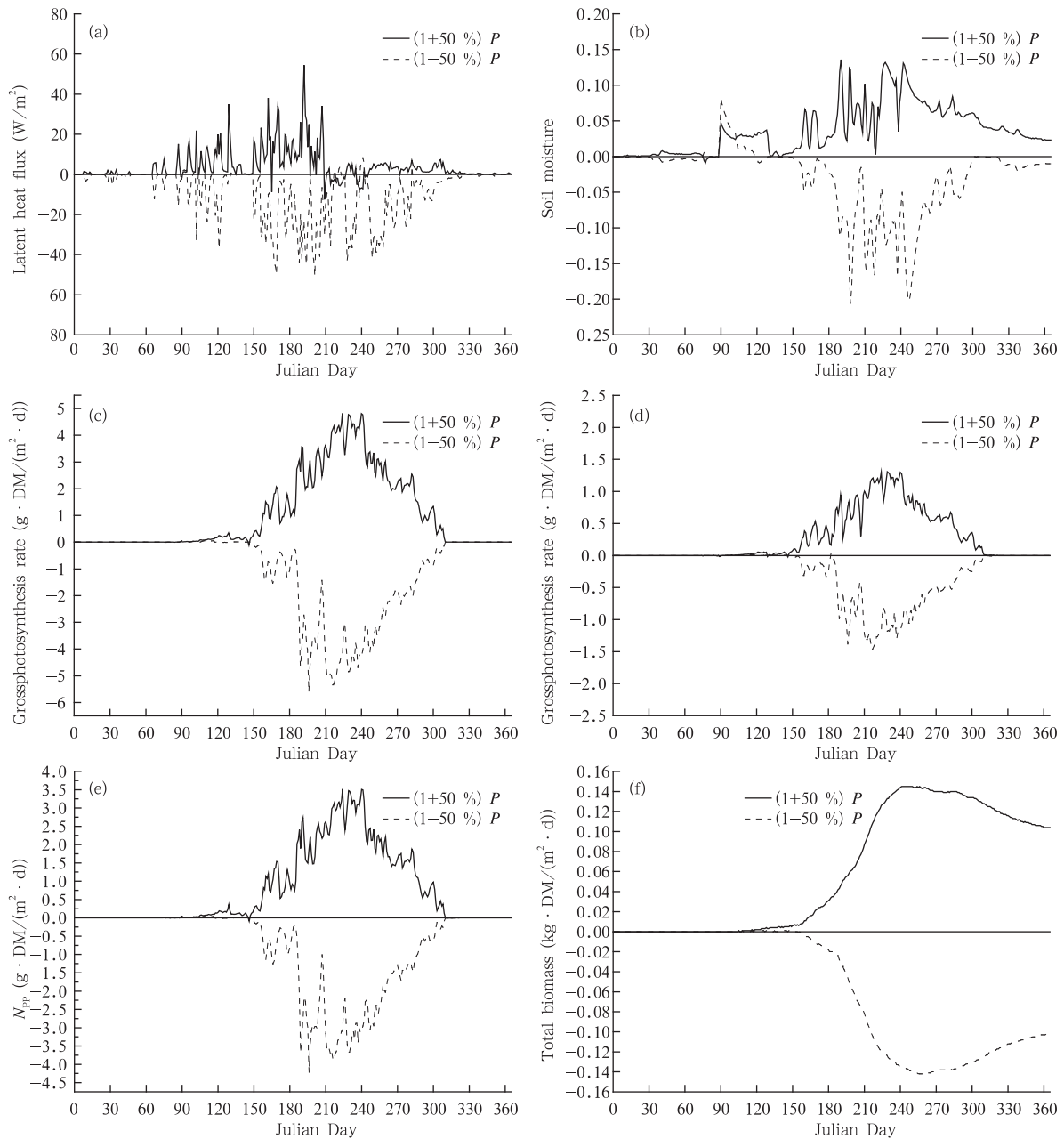


图 5 降水量增加或减少 50% 地表物理状况和草地植物生理过程的变化

(a. 潜热通量, b. 土壤湿度, c. 总光合速率, d. 总呼吸速率, e. 净初级生产力, f. 总生物量)

Fig. 5 The response of steppe land surface physical fluxes and physiological process to $\pm 50\%$ precipitation change

(a. latent heat flux, b. soil moisture, c. gross photosynthesis rate, d. gross respiration rate, e. NPP, f. total biomass)

月上旬以后到 10 月下, 气温很低, 温度对光合速率的直接控制又起主导作用, 增(降)温将增强(减弱)光合速率。在呼吸过程中, 维持呼吸正比于温度, 生长呼吸正比于生物量的变化, 如式(7)和(8)。从图 4d 可以看到 5 月中开始增(降)温呼吸速率减弱(增强), 最大呼吸差异出现在 8 月, 可达 $14 \text{ g} \cdot \text{DM}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 一直到 10 月出现了转变。这是因为增温时光合速率减弱, 相应地生长呼吸也弱, 同时生物量的下降, 维持呼吸也随着下降了。生理过程综合的结果是生产力的变化(图 4e), 从整个生长季节来说, 由于温度增高(降低)使光合速度减弱(增大), 而呼吸增强(减弱), NPP 与总光合速率有相似的变化趋势, 高温, NPP 减少, 低温, NPP 增大, 同时生物量在增温状态下, 5 月中以后, 一直低于正常值, 最大差值出现在 8 月底, 约为 13.0%, 直至 10 月以后, 此时地上部分已经凋落, 但地下部分仍然保持偏差的趋势(图 4f)。这就是温度变化怎样经过地表物理过程和状态的变化影响植物生理过程, 从而导致影响草地生产力变化的过程机理。

3.2 降水变化

降水变化 $\pm 25\%$ 和 $\pm 50\%$ 对草地生产力变化也是相似的。这里的分析以降水 $\pm 50\%$ 为例。

从图 5a 可见降水增加(减少)在整个非冰冻期地面蒸散将增强(减弱), 变化的幅度与降水过程有关。土壤湿度与降水过程有相应的变化。4 月以后降水增大时, 土壤湿度增大, 随后逐渐下降(图 5b), 但在 8 月以后, 由于土壤湿度达到一定值, 降水的增

加对蒸发的影响就很小了(图 5a)。地面蒸发加大的同时, 土壤湿度下降。土壤湿度增加(减小)直接影响羧化率式(4), 从而使光合速率增强(减弱)(图 5c)。光合作用对降水变化的响应最大值出现在雨季, 在 7~8 月光合速率的偏差可达 $3 \text{ g} \cdot \text{DM}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以上。降水变化对呼吸的直接影 响较小。由于降水增大, 光合作用增强, 故生长呼吸增大; 但同时又使冠层和土壤温度下降, 维持呼吸也下降。这两种呼吸过程的响应相反, 相互抵消。所以总效应不强, 正负响应取决两种组成的相对大小。总的来说, 降水的变化对生产力的影响是正的效应。草地生产力随降水增大而增加, 降水减小而减小(图 5e)。总生物量的变化对降水也是正响应, 降水增多生物量增大, 9 月达最大, 为 $140 \text{ g}/\text{m}^2$ 。而且地下生物量的变化一直延续到冬天(图 5f)。

表 2 列出温度、降水不同变化下年 NPP 和 8 月地上、地下生产量以及与正常值偏差百分比。草地 NPP, 温度增加, NPP 减小, 但对相同的变温, 增温比降温时变化大, 地上和地下的生物量有不同的变化趋势, 温度变化 2°C , 地上生物量将变化 30% 以上, 而地下生物量变化约 14% , 地上生物量的相对变化大于地下部分, 因后者绝对量大于前者。降水的变化直接影响草地生产力和生物量, 生产力对气候干湿变化的敏感性很强, 例如年降水量变化 50% , 草地生产力将改变 30% 以上。这样的变化在夏季风北部边缘的半干旱区是完全可能的。

表 2 年初级生产力、8 月地上生物量及地下生物量对温度和降水变化的响应

Table 2 The response of net primary production (NPP) and steppe biomass (above and below ground in August) to temperature and precipitation change

	年 NPP ($\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)	百分比	地上生物量 (kg/m^2)	百分比	地下生物量 (kg/m^2)	百分比	
温度	-2 $^\circ\text{C}$	357.22	19.54%	0.231	35.88%	0.607	13.60%
	-1 $^\circ\text{C}$	329.9	10.4%	0.199	17.06%	0.571	7.13%
	正常	298.83		0.170		0.533	
	+1 $^\circ\text{C}$	267.9	-10.35%	0.147	-13.53%	0.498	-6.57%
	+2 $^\circ\text{C}$	228.23	-23.63%	0.119	-30.00%	0.454	-14.82%
降水量	-50%	186.6	-37.56%	0.123	-27.65%	0.457	-14.26%
	-25%	244.58	-18.15%	0.150	-11.76%	0.500	-6.19%
	正常	298.83		0.170		0.533	
	+25%	355.31	18.90%	0.192	12.94%	0.573	7.50%
	+50%	409.88	37.16%	0.218	28.24%	0.614	15.20%

4 讨论和结论

气候变化影响生态系统生产力是一个复杂的过程,对这些过程的深入了解有助于对生态系统生产力的估计、预测和管理。通过实验室和实际场地的实验研究探测气候环境对生态系统的生理生态过程的影响机理是最基础的方法,但同时进行物理的、生物化学的各种过程长时间(如植物生长期)的观测是相当复杂,不易实现的。当前发展起来的基于生态系统生理生态各个过程基础上的动态的生态系统模式和地表物理传输模型相结合的模式为研究气候变化影响生态系统的过程机理提供了一种可能,这可以在一定程度上揭示在变化的气候环境下生产力形成的过程。本文就是应用 AVIM 对中纬度半干旱草原生产力对气候变化响应的过程进行了初步分析。其中具体的响应机理可能只适用于中纬度半干旱草原,但所运用的模拟和分析方法也同样适用于其他生态系统。

中纬度半干旱草原是一种气候-生态系统过渡带,对气候变化很敏感^[19]。模拟试验的结果表明,无论是降水或温度的变化对草地的生产力都有显著影响。降水增加,主要通过土壤改善了水分供给条件,增强了光合速率,从而提高了生产力。这与不少作者所得到的结果是一致的^[6~8]。而温度增高,情况就比较复杂。因为温度不仅直接影响光合、呼吸速率,而且增温使蒸散加强,土壤变干,因而降低光合速率,而后一作用过程在半干旱地区大于前者,结果是增温使生产力下降,这也与高琼等^[8]的研究相同。

上面模式计算结果显示,温度增高或降低 2℃,年 NPP 变化 20%左右,地上生物量可以改变 30%以上,而降水量变化 50%,年 NPP 甚至改变 37%,而地上生物量将改变近 30%。这些都是单一气候因子作用的结果。实际上气候状况的变化是综合的,温度、降水、日照等的变化都会直接或间接影响生态系统的生理、生态过程,从而改变生产力^[20~21]。这些过程都是需要进一步分析研究的。

参考文献

[1] Ojima D S, Xiao X, Chuluun T, et al. Asian grassland biogeochemistry: factors affecting past and future dynamics of

Asian grasslands. Asian Change in the Context of Global Climate Change. In: Galloway J N, Melillo J M eds. International Geosphere-Biosphere Publication Series 3. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 128-144

[2] 李永宏,莫文红,杨持等. 内蒙古主要草原植物群落地上生物量和理论载畜量及其与气候的关系. 干旱区资源与环境, 1994, 8(4): 43~50

Li Yonghong, Mo Wenhong, Yang Chi, et al. Aerial biomass and carrying capacity of steppe vegetation in Inner Mongolia and their relations with climate. J Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 1994, 8(4): 43-50

[3] 郭健勋,祝廷成. 气候因子对东北羊草草原群落产量影响的分析. 植物学报, 1994, 36(10): 790~796

Guo Jianxun, Zhu Tingcheng. Effect of climatic factors on the yield of *Aneurolepidium chinense* (Trin) keng community. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 1994, 36(10): 790-796

[4] 王义凤. 内蒙古典型草原的生物量与生产力. 植物杂志, 1993, 4: 10~11

Wang Yifeng. Productivity and biomass of typical steppe in Inner Mongolia. J Plant (in Chinese), 1993, 4: 10-11

[5] 李银枝. 呼伦贝尔草原初级生产力与气象条件关系的分析. 中国草地, 1991, 1: 42~66

Li Yinzi. The relationships between primary productivity and meteorological variables in Hulunbeier steppe. Grassland of China (in Chinese), 1991, 1: 42-46

[6] 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. 植物学报, 1996, 38(1): 45~52

Xiao Xiangming, Wang Yifeng, Chen Zuozhong. Dynamics of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin river basin of Inner Mongolia and their response. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 1996, 38(1): 45-52

[7] 王玉辉,周广胜. 松嫩平原羊草群落生产力的模拟研究. 见:周广胜等编. 中国东北样带(NECT)与全球变化. 北京:气象出版社, 2002. 145~155

Wang Yuhui, Zhou Guangsheng. Modelling study of productivity of *Aneurolepidium chinense* (Trin) Keng Community in Songnen plain. In: Zhou Guangsheng ed. Global Change and Northeast China Transect (NECT). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 145-155

[8] 高琼,喻梅,张新时等. 中国东北样带对全球变化响应的动态模拟——一个遥感信息驱动的区域植被模型. 植物学报, 1997, 39(9): 800~810

Gao Qiong, Yu Mei, Zhang Xinshi, et al. Dynamic modelling of Northeast China Transect responses to global Change: A regional vegetation model driven by remote sensing information. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 1997, 39(9): 800-810

[9] Ji Jinjun. A climate-vegetation interaction model: simulating

- physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, 22:445-451
- [10] 季劲钧, 余莉. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究. *大气科学*, 1999, 23(4):439-448
Ji Jinjun, Yu Li. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface. *Chinese J Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 1999, 23(4): 439-448
- [11] Ji Jinjun, Hu Yuchun. A simple landsurface process model for use in climate study. *Acta Meteor Sinica*, 1989, 3: 344-353
- [12] 吕建华, 季劲钧. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 I. 物理通量和参数. *大气科学*, 2002, 26(1):111-126
Lu Jianhua, Ji Jinjun. A simulation study of atmosphere-vegetation interactions over the Tibetan Plateau Part I: Physical fluxes and parameters. *Chinese J Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2002, 26(1): 111-126
- [13] Li Yinpeng, Ji Jinjun. Model estimates of global carbon flux between vegetation and the atmosphere. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18:807-818
- [14] Farquhar, G D S von Caemmerer, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 1980. 149:79-90
- [15] Collatz G M, Ribao-Carbo, Ball J A. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J Plant Physiol*, 1992, 19:519-538
- [16] 季劲钧, 胡玉春. 一个植物冠层物理传输和生理生长过程的多层模式. *气候与环境研究*, 1999, 4(2):152-164
Ji Jinjun, Hu Yuchun. A multi-level canopy model including physical transfer and physiological growth processes. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 1999. 4(2): 152-164
- [17] 邢旗, 吕新龙. 内蒙古典型草原地上生物量动态研究. 见: 李博主编. 中国北方草地畜牧业动态监测研究(一). 北京: 中国农业科技出版社, 1993. 160-166
Xing Qi, Lu Xinlong. Study on the variation of above ground biomass of typical steppe in Inner Mongolia. In: Li Bo ed. *Dynamic monitoring studies on the animal agriculture of north China grasslands (1)*. Beijing: Agriculture Science and Technology press, 1993. 160-166
- [18] 王绍武, 赵宗慈. 未来 50 年中国气候变化趋势的初步研究. *应用气象学报*, 1995, 6(3):333-342
Wang Shaowu, Zhao Zongci. A study of the trend of climatic change during the period of next 50 years. *Quart J Appl Meteor (in Chinese)*, 1995, 6(3): 333-342
- [19] 叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究. 第二部分. 北京: 地震出版社, 1992. 14
Ye D Z, Chen B Q. *Pilot Study of Global Change in China Part 2*. Beijing: Earthquake Press, 1992. 14
- [20] 周广胜, 王玉辉, 白莉萍等. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展. *气象学报*, 2004, 62(5):692-707
Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, Bai Liping, et al. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(5): 692-707
- [21] 王遵娅, 丁一汇, 何金海等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2):228-236
Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(2):228-236

**MODELING STUDIES OF RESPONSE MECHANISM OF STEPPE
PRODUCTIVITY TO CLIMATE CHANGE IN MIDDLE
LATITUDE SEMIARID REGIONS IN CHINA**

Ji Jinjun

*(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Huang Mei

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Liu Qing

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The impact of climate and environment on productivity of ecosystems is a complex process. Thorough understanding of these processes is helpful for estimation, prediction and management of productivity of ecosystems. The current coupled model of ecophysiological and physical transfer processes provides a useful tool for simulating response mechanism of ecosystem to climate and environment. It is possible to explore, to a certain extent, the formation process of ecosystem productivity in a changing climate.

AVIM used in this study is a dynamical land surface process model that involves both physical transfer processes between soil, vegetation and the atmosphere and plant ecophysiological processes. Therefore, AVIM is capable of calculation of surface fluxes of energy and water and output of carbon flux and productivity.

Semiarid steppe in middle latitude is transient climate-ecosystem zone that is sensitive to climate change. The response mechanism of steppe productivity (Net Primary Productivity, NPP) in semiarid areas to temperature and precipitation change was simulated with the AVIM. The results showed that changes of both temperature and precipitation had significant influence on NPP. The increasing of precipitation could increase NPP while the increasing of temperature could decrease NPP. The reason for this is thought that the increasing of precipitation could improve soil water stress and therefore enhance the photosynthesis rate. Increase in temperature could increase both photosynthesis and respiration rates on the one hand, on the other hand, it also decreases soil moisture due to increased evapotranspiration and thus results in the decrease in the photosynthesis rate. Since water condition plays a key role for plant the photosynthesis in semiarid region, so the total effects of temperature increasing caused a decrease in NPP.

Sensitive tests show that for semiarid steppe in China, ± 2 °C temperature change could resulting in a variation of about 20% annual NPP and at least 30% above ground biomass. 50% change of precipitation could create 37% and 50% annual change of NPP and above ground biomass respectively.

Key words: Climate change, Net primary production, AVIM, Semiarid steppe.