

气候变暖对高寒草甸气候生产潜力的影响*

李英年 王启基 赵新全 沈振西

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 利用多年定位测定的草地生产力资料及同步气象因素观测数据, 建立现实状况下光、温、水影响草地气候生产潜力模型:

$$Y = F_1(Q) \cdot F_2(T) \cdot F_3(P)$$
$$= K \sum_{t=1}^n [(-b \cdot \exp(a + b \sum t / \sum t_{\max})) / (1 + \exp(a + b \sum t / \sum t_{\max}))^2]$$
$$\cdot [W_0 / \sum t_{\max}] \cdot \sum t \cdot \begin{cases} 0 & T < 0 \\ T/20 \cdot 0.6658 & 0 < T < 20 \\ 1 & T > 20 \end{cases}$$

在分析现实高寒草甸气候生产力分布与环境条件关系的同时, 根据该模型模拟计算未来气温升高 2 和 4 , 降水增加 10% 和 20% 状况下的气候生产力情景。在上述两种气候情景下, 未来草地生产力分别出现降低(10%)和升高(1%)的两种可能。气候变暖在一定程度上减少和缓和低温对高寒草甸牧草生长的不利影响, 但地表及植被的蒸散量的加大远比降水增加的快, 水分则成为牧草生长的限制因素。

关键词: 气候变化; 高寒草甸; 气候生产潜力

来自 GCM 模拟全球变化输出结果表明, 全球气温确实在升高(王绍武等, 1995)。由于 GCM 已成为模拟全球变化的重要工具和手段, 其输出结果的完整性、一致性和可操作性等特点, 在评价气候变化对农林牧业、水资源、生态系统等潜在影响中有特别的价值。研究表明, GCM 输出结果作为一种分析和解释气候变化引起诸如农作物耕作带、植被主要类型交错带分布及迁移、农业生产格局演替变化规律, 以及生产潜力等方面的手段是切实可行的。

青藏高原广大地区分布有高寒蒿草草甸, 牧草生长发育及其生产力高低受自然环境的制约极为明显, 在草地投入甚少的状况下, 其产量的高低与环境条件息息相关。全球气候变暖的过程中, 目前这种生产格局和生产力水平变化趋势发生何种变化是许多专家、学者所研究的重要课题。本文通过假设高寒草甸未来气候变化一定幅度的情景下, 探讨草地气候生产潜力水平以及变化趋势, 为高寒草甸生态系统的优化组合和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点、资料及思路

本研究根据中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)多年的测定资料, 分析和解释现实状况下, 高寒草甸气候生产力分布状况以及对环境条件的需求, 确定建立光、温、水影响下气候生产力的基本模式。并根据 GCM 输出参数及其它研究结果, 模拟计算了未来气候下高寒草甸气候生产力的变化规律。

* 国家与中国科学院“九五”特别支持(KZ95T—04—03, KZ951—A 1—204—04) 研究项目资助

1.2 现实状况下草地气候生产力的确定及对环境条件要求的分析

光、温、水以及土壤营养成分和人为管理是植物生长必不可缺少的几个主要因素。因此,不少学者提出了许多农业气候生产潜力的数学模型(江爱良, 1988; 黄秉维, 1985), 一般用阶乘形式给出:

$$Y = F_1(Q) \cdot F_2(T) \cdot F_3(P) \cdot F_4(N) \cdot F_4(M) \quad (1)$$

式中: Y 为植被气候生产潜力 (g/m^2); $F_1(Q)$ 为光合潜力值 (g/m^2); $F_2(T)$ 为温度订正函数 ($0 \sim 1$); $F_3(P)$ 为水分订正函数 ($0 \sim 1$); $F_4(N)$ 、 $F_4(M)$ 分别为土壤养分及生产管理水平所影响下的水平系数 ($0 \sim 1$)。

高寒草甸地区受特殊的地理环境因素影响, 相当时期内土壤理化性态基本保持不变, 社会投入甚微, 牧草产量的波动变化主要受制于自然环境条件的波动(李英年等, 1997; 李英年等, 1995)。因此对天然草地土壤养分及生产管理水平所影响下的水平系数可视为常数, 即设定 $F_4(N) = F_4(M) = C$ ($0 < C < 1$)。这样对于牧草生产潜力影响可理解为光、温、水这三个主要气候因子所制约, 三个因子中我们把光看作是最为本质的要素, 而把温、水看作是促进或限制光合作用的因素来考虑。由此可用以下三方面分别进行讨论。

1.2.1 牧草光合生产潜力 $F_1(Q)$ 的确定

牧草光合生产潜力 $F_1(Q)$, 可写成如下形式:

$$F_1(Q) = k/q \cdot \int_0^t \eta \cdot Q_t \cdot dt \quad (2)$$

式中: η 为牧草生长发育期间 t 时刻太阳能转换为生物能的利用系数, k 为除去无机物所占比例后的经济利用系数, 黄秉维(1985)指出牧草的利用系数一般为 0.92。 Q 为干物质发热量, Q_t 为生理辐射总量。

高寒草甸牧草在生长发育的过程中, 其干物质积累过程遵循自然增长规律, 服从逻辑斯谛(Logistic)曲线方程(王启基等, 1998):

$$W = W_0 / (1 + \exp(a + b \sum t)) \quad (3)$$

式中: W 为任一时刻牧草干物质积累量, W_0 为生长过程中最大的干物质积累量, $\sum t$ 为随时间进程中的自变量参数, 本文取日平均气温稳定通过 0 的积温, a 、 b 是与变量有关的回归系数。

W_0 可用下式确定(李英年, 1998)

$$W_0 = [2W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 - W_2^2 \cdot (W_1 + W_3)] / [W_1 \cdot W_3 - W_2^2] \quad (4)$$

其中, W_1 、 W_2 、 W_3 分别为任三个等距自变量(取观测时间长度)所对应的牧草地上生物量。

对(3)式进行标准化处理, 得出一标准干物质增长曲线:

$$W/W_0 = 1 / (1 + \exp(a + b \sum t / \sum t_{max})) \quad (5)$$

式中: $\sum t_{max}$ 是牧草在整个生育过程中所需要 0 的积温之总和, 依(4)式一样来确定。对(5)式求导有:

$$dW/d\sum t = [(-b \cdot \exp(a + b \sum t / \sum t_{max})) / (1 + \exp(a + b \sum t / \sum t_{max}))^2] \cdot [W_0 / \sum t_{max}] \quad (6)$$

令 $V_t = dW/d\Sigma t$, 则(6)式为干物质积累速度公式。 V_t 为任一时刻的干物质积累速度。

任一时刻干物质积累量可以写为: $W_t = \eta \cdot Q_t/q$, 所以有 $dW_t = d(\eta \cdot Q_t)/q$ 。 光能利用率在不同生长发育期间是不一致的, 但在一定短的时间内可以认为是常数。 从而有 $dW_t = dQ_t \cdot \eta/q$, 联系(6)式有:

$$\begin{aligned} V_t &= \eta/q \cdot dQ_t/d\Sigma t \\ &= [(-b \cdot \exp(a + b\Sigma t/\Sigma_{tmax})) / (1 + \exp(a + b\Sigma t/\Sigma_{tmax}))^2] \\ &\quad \cdot [W_0/\Sigma_{tmax}] \end{aligned} \quad (7)$$

可以看出, 光能利用系数的时间动态演变与干物质增长速度的时间演变具有一致性。 由此得出:

$$\begin{aligned} \eta &= [(-b \cdot \exp(a + b\Sigma t/\Sigma_{tmax})) / (1 + \exp(a + b\Sigma t/\Sigma_{tmax}))^2] \\ &\quad \cdot [W_0/\Sigma_{tmax}] \cdot (\Sigma t / Q) \cdot q \end{aligned} \quad (8)$$

时间步长取旬为单位, 则 Σ_k 、 Q 分别表示了每旬日平均气温稳定通过 0 的积温和生理辐射量; η 为每旬平均光能利用系数; W_0 和 Σ_{tmax} 可由(4)式估算。 在海北站地区作者以过去几年牧草地上生物量的动态变化状况, 利用多年牧草产量较理想年份的资料, 得出有 $W_0 = 438.5061$; $\Sigma_{tmax} = 1154.15 \cdot d$; $W_0/\Sigma_{tmax} = 0.3799$ 。 对回归系数 a 、 b 作者曾作过讨论(李英年, 1998), 分别取 2.6072 和 -4.4410 。 为此, 依(1)式得出光合生产潜力有:

$$\begin{aligned} Y_1(Q) &= k \sum_{i=1}^n [(-b \cdot \exp(a + b\Sigma t/\Sigma_{tmax})) / (1 + \exp(a + b\Sigma t/\Sigma_{tmax}))^2] \\ &\quad \cdot [W_0/\Sigma_{tmax}] \cdot \Sigma t \end{aligned} \quad (9)$$

$i = 1, 2, \dots, n$, 为旬的进程序列, 自 5 月上旬算起, 到高寒草甸植被地上生物量达最高的 8 月下旬为止, 共 12 旬。 (9) 式表明, 根据每旬日平均气温稳定通过 0 的积温 Σt 及总积温积累值 Σt (海北站日平均气温 0 积温到 8 月下旬的多年平均为 $950.5 \cdot d$), 便可以计算出光合生产力。

1.2.2 温度影响订正系数 $F_2(T)$ 的确定 对高寒草甸牧草生长发育状况多年观测发现, 在水分基本保证的条件下, 日平均气温达 0 时牧草便可进入萌动发芽, 虽然有短时低于 0 以下的温度出现, 但对牧草生长影响微小, 特别是土壤充分湿润的情况下, 短时 -8 的低温不致影响牧草生长的正常发育(李英年, 1998)。 因而可取 0 作为牧草生长中光合作用的下限温度, 即当温度为 < 0 时, 牧草尚未发芽, 叶面积为零, 光合作用为零。 而牧草在生长过程中随叶面积增大光合作用逐渐加大。 高寒草甸分布区域, 年极端最高气温一般在 25 左右, 最热月平均气温多低于 10 。 因此, 对光合作用达最大时的温度变化可取 20 , 此值可理解为光合作用的最适温度, 这样有温度影响函数 ($F_2(T)$) 的表达式:

$$F_2(T) = \begin{cases} 0 & T < 0 \\ T/20 & 0 \leq T < 20 \\ 1 & T \geq 20 \end{cases} \quad (10)$$

T 为平均气温。 因光合作用只在白天进行, 故这里取白天的平均气温, 通过计算海北站 5~8 月日间(08~20 时)平均气温为 9.8 。

1.2.3 水分影响订正系数 $F_3(P)$ 的确定 由于高寒草甸地区,自然降水量是牧草生长发育的主要水分来源,区域降水相对丰富。植被类型特殊,表现出根系发达、盘根错节,有较强的持水和滞水能力,土壤水下渗微弱,故可不考虑渗漏量的影响。其水分的散失,主要表现在植株蒸腾和地表蒸发上。因此对水分影响函数,作者仅考虑降水和蒸散二者的变化影响,即用降水与蒸发力的比值来确定水分影响系数($F_3(P)$),有:

$$F_3(P) = P/E_0 \quad (11)$$

式中: P 为年总降水量(mm); E_0 为年总蒸散力(mm),可由彭曼(Penman)公式经气压(或海拔高度)订正后的估计值来确定(欧阳海等,1990)。考虑到牧草产量是指牧草即将进入枯黄阶段,地上生物量达最高时的产量值,海北站地区一般出现于8月下旬到9月上旬,所以年界可以取在8月底,即降水量、蒸散力为上年度9月到本年度的8月的合计值。就1980—1997年平均来讲,海北站地区年降水量为589.2mm,而蒸散力约为884.9mm。即水分订正系数($F_3(P)$)约为0.6658。

由此得出高寒草甸牧草受光、温、水影响的气候生产力模式有:

$$\begin{aligned}
 Y &= F_1(Q) \cdot F_2(T) \cdot F_3(P) \cdot F_4(N) \cdot F_4(M) \\
 &= k \sum_{t=1}^n \left[\frac{(-b \cdot \exp(a + b \sum t / \sum t_{\max}))}{(1 + \exp(a + b \sum t / \sum t_{\max}))^2} \right] \\
 &\quad \cdot [W_0 / \sum t_{\max}] \cdot \sum t \\
 &\quad \cdot \begin{cases} 0 & T < 0 \\ T/20 \cdot 0.6658 & 0 \leq T < 20 \\ 1 & T \geq 20 \end{cases} \quad (12)
 \end{aligned}$$

利用模式采用海北站地区1980—1996年平均资料(见表1)。对草地气候生产力进行模拟计算有 $F_1(Q) = 1626.42 \text{ kg/m}^2$; $F_2(T) = 0.491$; $F_3(P) = 0.6658$ 。牧草平均气候生产力为 531.69 g/m^2 。由于未考虑土壤性态、人为管理等因素的影响,发现气候生产力比多年实际观测的平均牧草产量值稍高。但可证实效果是显著的。利用该模式作为估算草地气候生产力是可行的。

2 未来气候变化对草地气候生产力的影响

2.1 GCM 模式的结果输出及气候变化的设定

GCM 研究结果表明, CO_2 倍增后新的气候条件下,平均气温将升高 $2.7 \sim 5.6$,生长季延长 $28 \sim 80 \text{ d}$,积温可增加 $834 \sim 2055$ · d(Humme, 1992; Schuhradt 等, 1989; Santer, 1985)。这些环境参数的改变将导致牧草种类组成及其生产力的变化。在实际当中,气候的变化是属于一个缓慢和渐进的过程,相当长的时期内,植被类型不可能发生急剧的转变过程,只能随着时间的推移而逐步被取代。张新时等(1993)利用GCM模式的输出结果认为,未来在 CO_2 倍增时气候变化有气温上升 2 或 4 ,降水增加 10% 和 20% 的可能。因而本文在设定气候变化幅度时认为有以上2种可能结果,即未来气候变化有:(1)气温上升 2 ,降水增加 10% , (2)气温上升 4 ,降水增加 20% 。并设定植被类型仍保持目前的水平结构。

2.2 未来气候变化对草地气候生产力的影响

2.2.1 在进行上述计算时,假设太阳总辐射不发生变化。温度升高时,日平均气温稳定通过

表 1 海北站地区 5~ 8 月逐旬积温及旬白天平均气温()

Table 1 The average temperature of every ten days and the accumulated temperature of every ten days at Haibei station during May-Aug

月份 Month 旬 A period of ten days	5 月 May			6 月 June			7 月 July			8 月 Aug		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΣT	48.3	85.7	145.4	212.5	287.9	374.0	465.5	564.4	676.6	779.6	865.8	950.5
D	5.9	6.0	7.3	8.5	9.9	10.2	11.6	12.3	12.1	11.9	11.4	10.4
$F_1(Q)$	14.4	25.6	43.4	63.3	85.8	111.5	138.8	168.2	201.7	232.4	258.1	283.3

注 Note: A: 上旬 The first ten days of a month; B: 中旬 The second ten days of a month; C: 下旬 The last ten days of a month; O: 旬序列 Sequence of a period of ten days; ET: ΣT 0 积温($\cdot d$) Accumulated temperature of 0 ($\cdot d$); D: 昼平均气温() Daytime mean air temperature(); $F_1(Q)$: 光合潜力值(g/m^2) Photosynthetic potential value(g/m^2)

0 的积温(ΣT)由现实状况日平均气温分布值上升 2 或 4 来求算。可能蒸散力(E_0)可由海北站地区过去多年观测的气温建立以下回归方程确定:

$$E_0 = 0.76(2123.78 + 572.91T_{\#}) \tag{13}$$

其中: $T_{\#}$ 为年均气温, 0.76 是将水面蒸发量转化为可能蒸散力经气压订正后的转换系数, 经显著性检验均达极显著水平($n=15, r=0.7303, P<0.01$)。

通过计算气温上升 2 或 4 时, 日均气温稳定通过 0 的积温到 8 月下旬分别可增加到 1226 $\cdot d$ 和 1534 $\cdot d$ 左右(见表 2), 比现实状况分别增加 275 $\cdot d$ 和 583 $\cdot d$, 分别提高 29% 和 53%。同样对可能蒸散力及水分订正系数可由变化后的温度、降水等幅度在现实状况的基础上叠加确定, 对 $\Sigma t/\Sigma t_{max}$ 及 $W_0/\Sigma t_{max}$ 的比值由于气候变暖后二者同时在增加, 故比例系数仍取和现实状况一样。

表 2 现实状况与未来气候变暖后高寒草甸气候生产力变化

Table 2 The potential values of photosynthesis of alpine meadow climatic productivity under the actual conditions and the climatic warming in future

气候情景 Climate sight	现实状况 State of reality	未来状况 State of future		未来状况 State of future	
		T+2	R(1+10%)	T+4	R(1+20%)
R	582	640		698	
T	-1.7	0.3		2.3	
E	686	1745		2616	
ΣT	951	1226		1534	
Y	532	479		538	

注 Note: R: 降水量(mm) Precipitation(mm); T: 年平均气温() A verage annual air temperature(); E: 年蒸散力(mm) A nnuual evapotranspiration of year(mm); ΣT : ΣT 0 的积温($\cdot d$) Accumulated temperature of 0 $\cdot d$ (); Y: 牧草气候生产潜力(g/m^2) Climate produce potential of forage(g/m^2)

2.2.2 气候变暖的同时, 热量增加, 延长了无霜期, 可使牧草生长期延长, 产草量随之提高。但通过利用未来气候变化有气温上升 2 或 4 , 降水分别增加 10% 和 20% 的两种可能计算, 海北站地区在上述二种气候变暖情景的假设下, 高寒草甸牧草气候生产潜力与现实状况

相比有很大的区别(见表2)。草地气候生产力估算值分别为 $479\text{g}/\text{m}^2$ 和 $538\text{g}/\text{m}^2$ 。气温上升 2°C 、降水增加10%,牧草气候生产力下降10%左右;而气温上升 4°C 、降水增加20%时,牧草产量则有所提高,但仅提高1%左右。表明在全球气候变暖后高寒草甸牧草生产力水平变化格局有所不同。这主要与降水的影响关系较大。当气温上升 2°C 、降水增加10%,植被的蒸散力大于降水的补给量,干旱胁迫加重,因而水分成为牧草生长的限制因素,只有降水在同期增加15%以上这种限制才能得到缓解。当气温上升 4°C 、降水增加20%,在降水量增加较高的假设下,产草量比现实状况才有所提高,但并非明显,只提高1%左右。因而,从某种角度来讲,如果气温上升,降水增加的可能较小,将造成高寒草甸分布区域地表及植被蒸散力的加大远比降水量的增加更快,使区域干旱现象明显,水分的不足终究将限制草地生产力的提高。

3 结 语

3.1 高寒草甸地区在一定时期内,土壤理化形态基本保持不变,加之社会投入甚微,牧草产量受人为因素变化甚微。产草量在多年平均值上下波动,主要受自然环境条件的影响。对牧草生产潜力的影响可理解为光、温、水3个主要气候因子所制约。由此,利用3个主要气候因子,建立影响高寒草甸牧草气候生产潜力的模拟模型,经比较分析其效果是好的。

3.2 利用模式对高寒草甸地区假设未来气温上升 2°C 和 4°C 、降水相应增加10%和20%的情景下,模拟估算后发现气候生产力有较大的区别。降水增加较少时,牧草产量可能降低,在降水增加较多的情景下,牧草产量才有所提高。预示未来气候状况下,若降水增加较多,加之温度升高,利于牧草生产力的提高。若降水增加较少,植被蒸腾所造成的水分散失比降水的补给量更快,导致牧草生长发育对水分的需求不能满足,将成为牧草产量提高的限制因素。

3.3 未来气候变暖虽然在一定程度上减少和缓解低温对高寒草甸牧草生长的不利影响,但气候变暖的同时与之有相配合的降水亦须随之增加,才能提高牧草产量。为此,对于青藏高原高寒草甸分布地区,在未来的气候变化过程中,对气候干旱现象应给予高度重视。

参 考 文 献

- 1 王启基,王文颖,邓自发,1998 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配 植物生态学报,22(3): 222~ 230
- 2 王绍武,叶瑾琳,1995 近百年全球气候变暖的分析 大气科学,19(4): 549~ 553
- 3 江爱良,张福春,1988 中国农业气候生产力的一个模式 中国农业气象,9(1): 16~ 18
- 4 李英年,王启基,周兴民,1995 矮蒿草草甸地上生物量与气象因子的关系及其预报模式的建立 见:高寒草甸生态系统(第4集),北京:科学出版社,1~ 10
- 5 李英年,周兴民,王启基,曹广民,1997. 地温影响高寒草甸牧草产量的效应分析 草地学报,5(3): 168~ 174
- 6 李英年,1999 高寒草甸植物地上生物量生长过程的某些特征 中国农业气象,19(4): 44~ 47
- 7 张新时,杨奠安,倪文革,1993 植被的PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(三),几种主要方法与PEP程序介绍 植物生态与地植物学报,13(1): 97~ 109
- 8 黄秉维,1985 中国农业生产潜力—光合潜力 见:地理集刊(第17期),北京:科学出版社,37~ 43
- 9 欧阳海,郑步忠,王雪娥,简慰民,1990 农业气候学 气象出版社,229~ 237

- 10 Hummel M, Zhao Zongci, Leemans R, et al, 1992 Climate change due to the greenhouse effect and its implications for China WWF, Switzerland, 57
- 11 IPCC, 1996 Climate Change The science of climatic change (in) Houghton J T, Filho L G M, Callander B A, Harris N, Kattenberg A, Maskell K eds Cambridge: Cambridge University Press: 572
- 12 Santer B, 1985 The use of general circulation models in climate impacts of CO₂-induced climate change on west European agriculture Climate Change, 7: 71~ 93
- 13 Schuhardt S L, Cushman R M, Boden T A, 1989 A county-level approach to regional resource analysis based on climate simulation J. Climate, 2: 113~ 130

The Influence of Climatic Warming on the Climatic Potential Productivity of Alpine Meadow

Li Yingnian Wang Qiji Zhao Xinquan Shen Zhenxi

(Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001)

Abstract: The model was set up with the data observed at the fixed position for many years and the data of climatic factors observed simultaneously to indicate the climatic production potentiality of range under the influence of actual light, temperature and water, etc

$$Y = F_1(Q) \cdot F_2(T) \cdot F_3(P)$$

$$= k \sum_{t=1}^n [(-b \cdot \exp(a + b \sum t / \sum t_{max})) / (1 + \exp(a + b \sum t / \sum t_{max}))^2]$$

$$\cdot [W_0 / \sum t_{max}] \cdot \sum t \cdot \begin{cases} 0 & T < 0 \\ T/20 \cdot 0.6658 & 0 < T < 20 \\ 1 & T \geq 20 \end{cases}$$

The relation between the distribution of actually climatic productivity of alpine meadow and the environmental conditions was analyzed, and the climatic productivity is calculated when air temperature increased by 2 and 4 and precipitation increased by 10% and 20%, respectively. The results showed that the range productivity would be decreased by 10% or increased by 1% under above two climatic scenario. Climatic warming could decrease or buffer the unfavorable effect of low temperature on the growth of herbs on the alpine meadow to a certain degree. The increase in evaporation of the earth's surface and vegetation was quicker than the increase of precipitation, therefore, water would be the crucial factors of growth of herbs.

Key words: Climatic change; Alpine meadow; Climatic production potentiality