

全球气候变化对松嫩草原水热生态因子的影响

邓慧平^{1,2}, 刘厚凤³

(1. 湖南师范大学国土学院, 长沙 410081; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 山东师范大学地理系, 济南 250014)

摘要: 根据 4 个大气环流模式 CO₂ 倍增试验结果并结合土壤水量平衡模型, 气候-草原生产力统计模型及逐日气温、降水随机模拟技术评估了未来 100a 温室效应引起的气候变化对松嫩草原土壤蒸散、土壤水分、干旱频率、活动积温、草原生产力及极端气象事件的影响。主要结论如下: 土壤蒸散 7~8 月份有较大幅度的增加而旱季(10~4 月份有所减少, 年蒸散将增加; 土壤水分各月均将减少, 干旱频率明显增加; $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温明显增加; 草原生产力下降 2%~4%; 极端高温和低温明显上升, 极端低温事件大大减少而高温事件明显增加。

关键词: 全球气候变化; 土壤水量平衡; 草原生产力; 极端事件; 松嫩草原

Impacts of global climate changes on the water and heat factors in the Songnen Steppe

DENG Hui-Ping^{1,2}, LIU Hou-Feng³ (1. College of Land and Resource, Hunan Normal University, Changsha, 410081, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Department of Geography, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: The impacts of global climate changes on soil water balance, accumulated temperature, drought frequency, steppe productivity and extremes are investigated in the Songnen Steppe with model calculation results are as follows: 1) According to the four GCMs model outputs, in the Songnen Steppe, temperature will rise 2.8~7.5 °C and precipitation will increase by 10% or so by the end of next century. 2) With a soil water balance model, evapotranspiration and soil water content are calculated under 1×CO₂ and 2×CO₂ respectively. The annual soil evapotranspiration will increase. During dry season, soil evapotranspiration will decrease, but during the raining season it will increase, especially, in July and August. Available soil water will decrease and drought frequency increase under four GCMs scenarios. 3) Accumulated temperature and lasting days will increase a lot. The annual temperature rise 4 °C (GISS), $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ will accumulated temperature rise 366~438 °C·d and lasting days will increase by 15~17d. 4) With a yield-relative evapotranspiration model, forage production will decrease by 2%~4%. 5) Using daily temperature and precipitation stochastic simulation techniques, daily maximum and minimum temperature and precipitation are generated under 1×CO₂ and 2×CO₂ and changes of extremes are analysed. The extreme high temperature and low temperature will rise greatly and extreme precipitation events increase a little bit

Key words: Global climate change; soil water balance; accumulated temperature; steppe production; extremes; Songnen Steppe

文章编号: 1000-0933(2000)06-0958-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

基金项目: 中国科学院创新工程重大资助项目(KZXI-Y-02)

收稿日期: 1998-12-18; 修订日期: 1999-10-20

作者简介: 邓慧平(1962—), 男, 江苏人, 博士。主要从事气候变化影响研究。

近百年来(1880~1990年),全球平均气温上升了 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$,全球平均降水量增加了 21mm ^[1]。根据一些气候模式按照大气中温室气体增加情况计算的气候变暖的速率,全球平均温度每10年要增加 $0.2\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernment Panel on Climate Change, IPCC),截止1996年公布的研究成果,预计到2100年大气中 CO_2 浓度将达 500×10^{-6} (接近工业化前的两倍),而全球平均地面气温将比1990年上升 $1\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,全球平均降水增加 $3\%\sim 15\%$ ^[3]。未来100年间全球气候的变化及其影响已成为全球关心的问题,近十年来国际上已广泛开展了全球气候变化及其影响研究工作。

松嫩草原位于我国东北的中部,其地理范围大致在北纬 $43^{\circ}30'\sim 48^{\circ}40'$ 和东经 $121^{\circ}30'\sim 126^{\circ}20'$ 之间,是我国重要的温带草原。自1950年以来,松嫩草原冬、春季气温上升了 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,秋季气温上升了 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季气温变化较小,约上升了 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,全年气温上升 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;降水50年代中期至70年代中期趋于减少,而后再回升,呈现的是近40a左右的波动^①。40多年来的气候变化对松嫩草原牧草产量,土壤水分以及干旱和极端低温等对畜牧业有较大影响的极端事件均产生了一系列影响^①。据大气环流模式 CO_2 倍增数值试验结果:松嫩草原降水可能增加 10% 左右,而气温可能上升 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。未来100年间 CO_2 倍增引起的气候变化对松嫩草原活动积温,生长日数,土壤水分,牧草产量以及干旱,极端高温和极端低温等极端事件的影响目前尚未见有较系统的研究报道。本文旨在根据大气环流模式(General circulation models, GCMs)预测的未来气候情景,结合松嫩草原土壤水量平衡模型、牧草产量-气候统计模型以及逐日气温、降水随机模拟技术对上述种种影响进行较系统的评估。

1 松嫩草原未来气候情景

未来气候情景采用的是IPCC推荐由国家研究项目(Country study program)提供的4个GCMs CO_2 倍增“平衡响应”结果。4个大气环流模式分别是:美国宇航局高达实验室(Goddard institute for space studies, GISS)、美国普林斯顿大学地球物理流体动力学实验室(Geophysical fluid dynamics laboratory, Princeton University, GFDL)、美国俄勒冈州立大学(Oregon State University, OSU)和英国气象局(United Kingdom Meteorological office, UKMO)模式。对于松嫩草原,4个模式给出了降水一致增加的结果,且各个模式预测的年降水增加百分率 $\Delta P(\%)$ 大致相同,在 10% 左右,四季降水增加百分率亦大致相同;对于气温,4个模式预测结果是一致增温,但增温幅度 $\Delta T(\text{ }^{\circ}\text{C})$ 相差较大。4个模式中,UKMOGCM预测的增温幅度最大,在松嫩草原范围内,年平均气温增加 $7.5\sim 7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,OSUGCM预测的增温幅度最小,年平均气温增加 $2.7\sim 2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,GFDL GCM预测的年平均气温增加 $5.6\sim 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,GISSGCM预测的年平均气温增加 $3.7\sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于松嫩草原范围较小,气候条件差异不大,本文选用长岭站($E123.97^{\circ}$, $N44.25^{\circ}$)气温和降水的变化代表松嫩草原未来气温和降水的变化。该点气温变化值 $\Delta T(\text{ }^{\circ}\text{C})$ 和降水增加百分率 $\Delta P(\%)$ 由距该点最近的4个网格点上的值取距离加权平均获得(表1)。

2 全球气候变化对松嫩草原水热生态因子的影响

2.1 全球气候变化对土壤水量平衡的影响

2.1.1 土壤水量平衡模型 松嫩草原水份交换主要以垂直方向为主^[4],对于水分交换以垂直方向为主的平原地区,根系层土壤水量平衡方程为^[5]:

$$W_2 = W_1 + Pa + I + U - (R_s - D - E) \quad (1)$$

式中, W_2 为时段末土壤根系层有效水量; Pa 为到达土壤的降水量; I 为灌溉水量; U 为进入根系层的毛管上升水量,又称潜水蒸发量; R_s 为地表径流量; D 为流出根层的深层渗漏量; E 为土壤蒸散量。以上各量单位均为 mm ,本文计算时段取月。对于松嫩草原,径流系数很小,径流量 R_s 忽略不计。在天然状况下,灌溉量 I 为零。此外忽略冠层截留量,到达土壤的降水量近似取为降雨量 P 。因此(1)式可简化为:

$$W_2 = W_1 + P + U - E - D \quad (2)$$

万方数据

① 邓慧平.全球气候变化对松嫩草地水、热资源的影响.博士后出站报告.东北师范大学草地所,1997.5

表 1 松嫩草原未来气候情景(2×CO₂~1×CO₂)
Table 1 Future climate scenarios in the Songnen Steppe

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
GISS	ΔT(°C)	5.6	3.7	10.5	4.8	3.3	2.7	3.1	2.9	4.6	2.6	6.2	3.7
	ΔP(%)	0.0	0.0	10.0	5.1	10.8	10.5	10.1	9.0	9.6	6.6	9.0	0.0
OSU	ΔT(°C)	3.1	4.3	2.7	3.4	2.3	3.6	2.2	2.4	3.1	2.9	2.7	2.7
	ΔP(%)	0.0	0.0	0.0	10.5	8.5	10.6	11.2	9.5	9.8	9.7	9.1	0.0
GFDL	ΔT(°C)	6.5	5.1	5.0	5.5	4.5	5.0	3.8	4.8	5.6	6.1	6.5	7.0
	ΔP(%)	0.0	0.0	0.0	10.0	9.1	10.5	9.8	8.4	11.0	9.5	9.0	0.0
UKMO	ΔT(°C)	6.3	6.0	9.3	12.3	10.7	6.1	4.7	4.4	6.3	8.1	10.7	7.7
	ΔP(%)	15.3	15.9	13.1	11.9	12.8	12.4	10.4	8.1	9.0	11.7	18.0	16.5

潜水蒸发量 U 与自由水面蒸发量 E_o 具有以下的关系^[6]:

$$U = CE_o \quad (3)$$

式中, C 为潜水蒸发系数。

深层渗漏水量 D 可由下式确定^[6]:

$$D = aP \quad (4)$$

式中, a 为 6~9 月份降水入渗系数, 其它月份 a 值取零。

土壤蒸散量 E 可由下式计算:

$$E = E_p \frac{W}{W_o}$$

$$E = E_p \quad W \leq W_o$$

$$W > W_o \quad (5)$$

式中, W 为计算时段内平均有效水分, W_o 为根系层田间有效持水量, E_p 为草地蒸发力。

在 $W < W_o$ 时, 设 $W = (W_1 + W_2)/2$ 代入(5)式并结合(2)、(3)和(4)式得:

$$W_2 = \frac{1}{(1 + \frac{E_p}{2W_o})} W_1 (1 - \frac{E_p}{2W_o}) + (1 - a)P + CE_p \quad (6)$$

潜水蒸发量 U 和深层渗漏水量 D 与地下水埋深及根系层土层厚度和土壤质地有关。本文在进行土壤水量平衡计算时将土壤分为黑土、黑钙土、草甸土; 地下水埋深分为小于 3m 和大于 3m, 大于 3m 则潜水蒸发量忽略不计。参考有关文献确定根系层厚度, 根据根系层土壤质地确定根系层田间有效持水量 W_o ^[4]; 对层状土壤, 将各土层 W_o 和各土层厚度取加权平均确定根系层 W_o 值。根据土壤质地确定 a 和 c 值^[6]。土壤类型及有关参数见表 2。

W_1 值用常用的挑选法确定^[8], 自由水面蒸发量根据改进的 Penman 方程计算^[9], 将各月水面蒸发量乘以草地折算系数换算成草地蒸发力^[8]。

2.1.2 计算结果 首先根据长岭站 1953~1995 年历年各月气候资料进行土壤水量平衡气候本底计算(1×CO₂), 然后将各月气温、降水加上未来各月气温、降水的变化值再重新计算土壤水量平衡各分量。从气候本底计算的土壤蒸散和土壤水分年内、年际变化结果来看是符合实际情况的^[10,11]。表 3 给出了气候本底和 GISS 情景下土壤有效水分的计算结果。其它 3 个情景下的计算结果与 GISS 情景下的计算结果差异并不大, OSU 情景的计算结果与 GISS 非常接近, GFDL 和 UKMO 情景下土壤蒸散增加的幅度和土壤有效水分减小的幅度比 GISS 情景下稍大一些。

表 2 土壤类型及有关参数

Table 2 Soil types and their related parameters

土壤类型 Soil types	根系层厚度(m) Depth of root layer	田间有效持水量(mm) Field capacity	地下水位(m) Ground water table	<i>C</i>	<i>a</i>
黑土 Black soil	1	200	>3	0.0	0.05
黑钙土 Black calcareous soil	0.7	100	>3	0.0	0.05
草甸土 Meadow soil	0.6	60	<3	0.10	0.08

表 3 气候本底与 GISS 情景下各月土壤水分的变化

Table 3 Monthly available soil water content under climate baseline and GISS scenario(mm)

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
黑土 Black soil	136.0	129.3	111.0	83.7	64.0	75.0	124.4	171.6	162.3	148.7	142.2	139.4
黑钙土 Black calcareous soil	111.1	105.7	91.6	70.2	55.6	64.4	104.0	131.7	124.5	116.3	112.8	112.5
草甸土 Meadow soil	61.2	56.0	43.4	37.4	24.6	41.4	74.0	96.5	82.0	69.7	65.3	63.8
黑土 Black soil	52.1	47.7	37.6	34.6	20.3	31.9	58.4	69.0	58.7	53.7	53.1	53.0
黑钙土 Black calcareous soil	34.8	31.7	21.3	11.9	10.2	20.9	49.7	61.0	45.2	37.7	36.1	35.7
草甸土 Meadow soil	31.9	28.6	20.0	11.5	10.0	18.7	35.9	39.9	32.0	34.3	31.7	32.2

在未来 CO₂ 倍增气候情景下,松嫩草原旱季(10月~翌年4月)土壤蒸散较当前气候条件下减少,但差异很小,雨季(5~9月)尤其是7、8两月份则有较大幅度的增加。这主要是由于在未来 CO₂ 倍增环境下,蒸发力和降水的增加,导致雨季和年土壤蒸散的增加。但雨季降水的增加不及雨季土壤蒸散的增加,土壤有效水分全年各月都将减少,土壤将变得干旱。若将年平均根系层土壤有效水分低于本底气候条件下多年平均根系层土壤有效水分定为干旱事件^[12],在未来气候情景下,干旱频率将由目前的50%左右增加到80%。

2.2 全球气候变化对活动积温的影响

根据积温和持续日数增量计算公式^[13],计算了松嫩草原33个气象站4个未来气候情景下 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温及持续日数的增量。将计算的持续日数增量和相应的积温增量分别加上当前的持续日数和积温,则得出未来气候情景下 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温及相应的持续日数,结果见表4。

2.3 全球气候变化对草原生产力的影响

在天然草原上,产草量的动态主要受气候因子的控制。对于松嫩草原,水分是制约天然草原群落产量的主导因子。生长季土壤蒸散 E 与蒸发力之比反映了土壤水分多大程度上能满足牧草的水分需求,因此产草量 Y 可以认为是土壤蒸散与蒸发力之比的函数。根据东北师范大学长岭腰井子草地生态野外定位研究站羊草群落产量连续13a(1978~1990年)的定位实测资料与计算的4~8月 E 和 E_p 的比值确定函数的具体形式:

$$Y = 58.9 + 229.91 \frac{E}{E_p} \quad (r = 0.72) \quad (7)$$

式中, Y 为地上部生物量(干重 g/m^2), r 为相关系数

根据(7)式,在 OSU 情景下,产量减少约2%,在 GISS 情景下,产量减少3%;在 GFDL 和 UKMO 情景下,产量减少4%。

根据中国北方数据加尔针茅草原生产量与降水、积温回归模型^[14],在土壤有机质含量为 $65\text{g}/\text{mg}$ 时,地上部生物量(鲜重)在本底气候条件下为 $528\text{g}/\text{m}^2$,在 OSU 情景下为 $518\text{g}/\text{m}^2$,减少2%。其它气候情景下

由于积温已超出该模型积温上限,无法使用该模型进行评估。在土壤有机质含量为 40g/mg 时,在本底气候条件下地上部生物量为 445g/m²,在 OSU 情景下为 407g/m²,减少 8%左右。在土壤有机质含量为 90g/mg 时,在本底气候条件下地上部生物量为 560g/m²,在 OSU 情景下为 568g/m²,略增 1%。

表 4 松嫩草原本底和 CO₂ 倍增气候情景下活动积温和持续日数

Table 4 Accumulated temperature and lasting days under baseline and CO₂ doubling climate scenarios in the Songnen Steppe

	≥0 C 积温和持续日数 ≥0 C accumulated temperature and lasting days	≥10 C 积温和持续日数 ≥10 C accumulated temperature and lasting days
本底 Baseline	2770~3460(C·d) 194~216(d)	2383~3080(C·d) 133~159(d)
OSU	3230~3985(C·d) 213~242(d)	2670~3415(C·d) 144~172(d)
GIS _s	3359~4135(C·d) 219~253(d)	2748~3518(C·d) 148~176(d)
GFDL	3792~4635(C·d) 237~274(d)	3048~3866(C·d) 159~190(d)
UKMO	4403~5150(C·d) 281~293(d)	3428~4223(C·d) 166~194(d)

2.4 全球气候变化对气温、降水极端事件的影响

根据 UKMO 未来气候情景及逐日最高、最低气温随机模拟方法^[15],模拟生成了通辽站(43°45'N,122°18'E,资料年代 1951~1990 年)1×CO₂ 和 2×CO₂ 条件下 100a 逐日最高气温和最低气温。从 CO₂ 加倍前后 100a 逐日最高气温模拟值中挑出每年的最大值,最低气温模拟值中挑出最小值进行频率分析^[15]。在未来气候情景下,松嫩草原极端高温事件将明显增加,而极端低温事件将明显减少。由于冬季平均气温增幅大于夏季,极端低温上升幅度明显大于极端高温。

应用逐日雨量随机模拟技术^[16]随机生成了通辽和齐齐哈尔(47°23'N,123°55'E,资料年代 1951~1982 年)本底气候和 UKMO 气候情景下 100a 逐日雨量。根据逐日雨量模拟值统计日雨量≥10mm,≥25mm 及≥50mm 日数的变化(表 5),由表 5 可知,各站大于各种雨量临界值的日数在 CO₂ 倍增条件下略有增加。

表 5 大于各种雨量临界值的降水日数变化

Table 5 The changes of wet days surpassing various critical precipitation value(d/a)

站名 Stations	项目 Items	≥10mm	≥25mm	≥50mm
齐齐哈尔 Qiqihaer	实测值 Observation date	3.5	0.7	0.00
	1×CO ₂ 模拟值 1×CO ₂ simulated date	3.8	0.6	0.00
	2×CO ₂ 模拟值 2×CO ₂ simulated date	4.4	0.7	0.04
	实测值 Observation date	3.0	0.7	0.03
	1×CO ₂ 模拟值 1×CO ₂ simulated date	3.2	0.7	0.03
通辽 Tongliao	2×CO ₂ 模拟值 2×CO ₂ simulated date	4.1	0.7	0.06

3 结论

1) 在 CO₂ 倍增情景下,到下个世纪末,松嫩草原气温可能增加 2.8~7.5℃,降水增加 10%左右。

2) 在上述未来气候情景下,松嫩草原 7~8 月份土壤蒸散有较大幅度增加,而旱季土壤蒸散有所减少,

年土壤蒸散将增加。

- 3) 根系层土壤水分各月均减少,相应地干旱频率明显增加。
- 4) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温和持续日数明显增加。
- 5) 草原生产力减少 2%~4%。
- 6) 极端高温事件将明显增加,而低温事件大大减少,极端低温增加幅度大于极端高温的增幅。
- 7) 大于各种雨量临界值的降水日数略有增加。

参考文献

- [1] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. 气象学报, 1994, **52**(3): 262~264.
- [2] Bretherton F P, Bryan K and Woods J D. Time dependent green house-gas-induced climate change. In: *climate change: the IPCC scientific assessment*. (etal. Houshton J T, ed.). Cambridge University Press, London, 1992. 173~193.
- [3] Kenneth D F, David C M. Climate change and water resources. *Climate change*, 1997, **37**(1): 7~23.
- [4] 熊毅, 李庆远. 中国土壤. 第 2 版, 北京: 科学出版社, 1990. 352~370.
- [5] 由懋正, 王会肖. 农田土壤水资源评价. 北京: 气象出版社, 1996. 17~30.
- [6] 水利电力部水文局. 中国水资源评价. 北京: 水利电力出版社, 1987. 103~104.
- [7] 汪久文, 蔡蔚祺. 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第 3 集). 北京: 科学出版社, 1988. 23~83.
- [8] 高国栋, 陆渝蓉. 中国地表面辐射平衡与热量平衡. 北京: 科学出版社, 1982. 120~141.
- [9] 刘昌明. 农田蒸散量计算. 见: 谢贤群. 农田蒸发——测定与计算. 北京: 气象出版社, 1991. 134~135.
- [10] 邓慧平, 刘厚风, 祝廷成. 松嫩草地 40 余年气温、降水变化及其若干影响研究. 地理科学, 1999, **19**(3): 220~224.
- [11] 李绍良. 草原土壤水分状况与植物生物量关系的初步研究. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第 1 集). 北京: 科学出版社, 1985. 196~201.
- [12] Dracup J A and Kendall D R. Floods and droughts. In: Waggoner eds. *Climate change and U. S. Water resources*. Wiley Pub. Co. New York, 1990. 243~257.
- [13] 张厚, 张翼. 中国活动积温对气候变暖的响应. 地理学报, 1994, **49**(1): 27~35.
- [14] 王昱生, 赵妮珊, 徐中儒, 等. 中国东北部贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草原生产量与生态因素的关系及其预测模型. 植物生态学与地植物学学报, 1991, **15**(3): 286~295.
- [15] 邓慧平, 吴正方. 气候变化对日极值气温及日雨量的影响. 地理学报, 1996, **51**(增刊): 50~57.
- [16] Woo M K. Application of stochastic simulation to climate changes studies. *Climate change*, 1992, **20**: 313~330.