

北京山区刺槐林净初级生产力对气候变化的响应

张 艺, 余新晓, 范敏锐, 常 存, 陆晓宇

(北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 10083)

摘 要:利用 BIOME—BGC 模型估算北京山区刺槐林的净初级生产力(NPP),并分析了 NPP 对不同未来气候情景的响应。结果表明:模型模拟出的 NPP 总体上低于样地实测值,年际变动率为 11.2%,并表现出波浪形年际变化规律;降水量与 NPP 呈现极显著正相关关系,是 NPP 年际变化的主要气候因子;CO₂ 的浓度加倍、降水增加对 NPP 积累起到促进作用,温度增加不利于 NPP 的积累;降水增加对 NPP 积累的正向效应不敌温度增加对 NPP 积累的负向作用,CO₂ 浓度加倍、降水增加对 NPP 积累的协同促进作用大于温度增加对 NPP 积累的抑制作用。

关键词:净初级生产力; 气候变化; BIOME—BGC 模型

中图分类号:S718.52

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0151-05

Response of Net Primary Productivity of *Robinia pseudoacacia* Forest to Climate Change in Beijing Mountainous Area

ZHANG Yi, YU Xin-xiao, FAN Min-rui, CHANG Cun, LU Xiao-yu

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Combating Desertification,
Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: BIOME—BGC model was used to estimate net primary productivity (NPP) of *Robinia pseudoacacia* forest and analyze the effect of climate change and different CO₂ concentrations on them in Beijing Mountain Area during the period of 1974—2010. The results showed that simulated NPP were lower than measured values showing wave-shaped changes with an inter-annual variation rate of 11.2%; there was a positive correlation between precipitation and the NPP of *Robinia pseudoacacia* forest which indicated that precipitation was the key environmental factor controlling the NPP variations; NPP showed positive response to increased precipitation and doubling of CO₂ concentration, while increased temperature was not conducive to NPP accumulation; the positive effects of increased precipitation to NPP were inferior to the negative effects of increased temperature; CO₂ concentration doubling and increases of precipitation and temperature together could promote NPP with strong interaction.

Key words: net primary productivity; BIOME—BGC model; climate change

植被净初级生产力(net primary productivity)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物量,表现为光合作用固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分,也称净第一性生产力^[1]。由于人们无法直接和全面地测量 NPP,因此利用模型估算 NPP 已成为一种重要而被广泛接受的研究方法^[2-3]。估算 NPP 的模型种类很多,大体上可分为统计模型、参数模型和过程模型,BIOME—BGC 模型是过程模型的典型代表,可用来检验植被的 NPP、C 和营养元素等

对气候变化的响应^[4-9]。北京北部山区分布着大量的刺槐林^[10],以往对刺槐林生态系统的研究大多针对生产力、生理生态等单一方面^[11-13],缺乏对各种生态系统过程的整合和全面认识,无法预测其对未来气候变化情境下的响应,本研究在前人研究的基础上,根据实测数据,利用 BIOME—BGC 模型模拟北京山区刺槐林净初级生产力并利用实测数据进行模型验证,根据相关研究设置了多种气候变化情景,模拟北京山区刺槐林净初级生产力对未来不同气候情境变化的

收稿日期:2011-11-20

修回日期:2011-12-09

资助项目:十二五国家科技支撑计划(2011BAD38B05)

作者简介:张艺(1988—),女,硕士研究生,主要研究方向为林业生态工程、水土保持。E-mail:prayer88zhangyi@126.com

通信作者:余新晓(1961—),男,甘肃平凉人,教授,博士生导师,主要研究方向为森林水文、水土保持。E-mail:yuxinxiao111@126.com

响应,可为全球气候变化条件下,北京山区刺槐林生态系统的科学经营与妥善管理提供理论依据。

1 研究区概况

北京西山实验林场位于北京西北部,北纬 $39^{\circ}54'$,东经 $116^{\circ}28'$,面积 811.73 hm^2 。最高处海拔 $1\,150 \text{ m}$,平均海拔 350 m ,相对高差最大达 $1\,000$ 余米。主要岩石为硬砂岩,土壤以褐土为主,土层厚度 40 cm 左右。属季风气候,气温 $19.6\sim 39.7^{\circ}\text{C}$,年平均气温 12.2°C ,年降水量 $650\sim 720 \text{ mm}$,森林类型为暖温带落叶阔叶林,主要树种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Quercus L.*)、栎树(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和五角枫(*Acer mono Maxim*),已郁闭成林。

2 研究内容和实验方法

2.1 模型简介

BIOME—BGC 模型是模拟全球生态系统不同尺度植被、凋落物、土壤中水、碳、氮储量和通量的生物地球化学模型^[14],主要用来模拟碳、水和营养物质循环。运行 BIOME—BGC 模型至少需要三类参数:样地参数、气象资料、生理生态参数。BIOME—BGC 模型将自然植被划分为落叶阔叶林、常绿阔叶林、常

绿针叶林、灌木林、落叶针叶林、C3 草地和 C4 草地 7 种类型,不同类型需建立不同的生理参数文件。

2.2 数据来源

本研究采用解析木数据、样地调查数据结合经验模型的方法估算北京西山刺槐林的 NPP。解析木资料来源为北京市林业勘查设计院于 1989—1993 年开展《北京郊区主要树种生长调查研究》课题,是可获取的年代最近的北京山区解析木数据。地理纬度、海拔高度、土壤深度、土壤质地状况等初始信息数据采用样地调查的方式获取。气象数据资料由国家气象信息中心提供,并利用小气候模型 MT—CLIM 进行地形校正等预处理。生理学参数部分参考蒙大拿大学陆地动态数字模拟研究组提供的美国各类型植被生理学参数平均值,部分数据如刺槐细根、茎对叶片的碳分配比例、凋落物、叶片、细根的碳氮比等采用样地实测值。模型参数见表 1。

2.3 未来气候变化情景

根据高学杰^[15]等 2003 年研究的结果,在 2070 年 CO_2 浓度加倍时,华北地区年平均气温和降水变化为 2.6°C 和 10% ,据此,本文设置了 CO_2 浓度不变与加倍、气温不变与气温增加 2.6°C 、降水不变与降水增加 10% 不同气候组合共 8 种情景以研究北京山区刺槐林 NPP 对不同 CO_2 浓度和气候变化的响应。

表 1 刺槐林的 BIOME—BGC 模型参数值

参数	值	单位	参数	值	单位
Annual Whole—Plant Mortality Fraction	0.005	1/A	Fine Root Lignin Proportion	0.22	DIM
Annual Fire Mortality Fraction	0.0025	1/A	Dead Wood Cellulose Proportion	0.77	DIM
(ALLOCATION) New Fine Root C : New Leaf C	0.8	1/A	Dead Wood Lignin Proportion	0.23	DIM
(ALLOCATION) New Stem C : New Leaf C	2	Ratio	Canopy Water Interception Coefficient	0.045	DIM
(ALLOCATION) New Live Wood C : New Total Wood C	0.25	Ratio	Canopy Light Extinction Coefficient	0.35	DIM
(ALLOCATION) New Croot C : New Stem C	0.23	Ratio	All—Sided to Projected Leaf Area Ratio	2	DIM
(ALLOCATION) Current Growth Proportion	0.5	Ratio	Canopy Average Specific Leaf Area (Projected Area Basis)	24	DIM
C : N of Leaves	22.5	Prop.	Ratio of Shaded SLA; Sunlit SLA	2	m^2/kgC
C : N of Leaf Litter, After Retranslocation	32.8	kgC/kgN	Fraction of Leaf N in Rubisco	0.033	DIM
C : N of Fine Roots	70	kgC/kgN	Maximum Stomatal Conductance (Projected Area Basis)	0.006	DIM
C : N of Live Wood	70	kgC/kgN	Cuticular Conductance (Projected Area Basis)	0.00006	m/s
C : N of Dead Wood	650	kgC/kgN	Boundary Layer Conductance (Projected Area Basis)	0.01	m/s
Leaf Litter Labile Proportion	0.38	kgC/kgN	Leaf Water Potential; Start of Conductance Reduction	-0.34	m/s
Leaf Litter Cellulose Proportion	0.44	DIM	Leaf Water Potential; Complete Conductance Reduction	-2.2	MPa
Leaf Litter Lignin Proportion	0.18	DIM	Vapor Pressure Deficit; Start of Conductance Reduction	1100	MPa
Fine Root Labile Proportion	0.34	DIM	Vapor Pressure Deficit; Complete Conductance Reduction	3600	Pa
Fine Root Cellulose Proportion	0.44	DIM			

3 结果与分析

3.1 气象资料统计与分析

1974—2010 年年际间的平均气温波动比较大,但

总体气温呈上升趋势。平均气温为 12.60°C ,温度范围为 $10.81\sim 14.0^{\circ}\text{C}$ 。平均气温最高的年份出现在 2007 年,平均气温最低的年份出现在 1976 年,平均气温最高值与最低值相差 3.19°C 。气温经历了两个明

显的上升期,分别为1980—1983年和1985—1989年。1980—1983年,温度由11.13℃上升至13.07℃,升温幅度达1.94℃;1985—1989年,温度由11.47℃升至13.19℃,升温幅度达1.72℃(图1)。

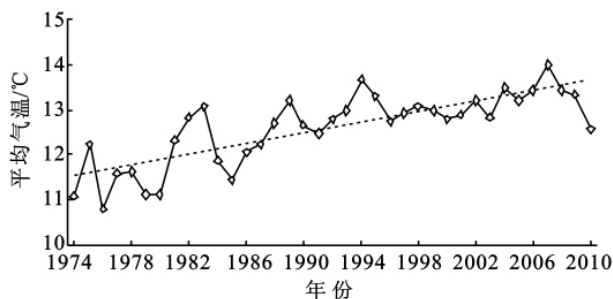


图1 1974—2010年间平均气温变化曲线

通过降水分布曲线图可以发现(图2),降水量变化趋势较为复杂,年际间的波动比较大,平均降水量为541.4 mm,降水量最低的年份出现在1999年,仅为266.9 mm,而降水量最高的年份出现在1994年,为813.2 mm,降水量最高的年份和降水量最低的年份相差546.3 mm。1985—1988年的降水相对稳定,该时间段降水量最高年份(1985年)和最低年份(1986年)降水量仅相差55.7 mm。

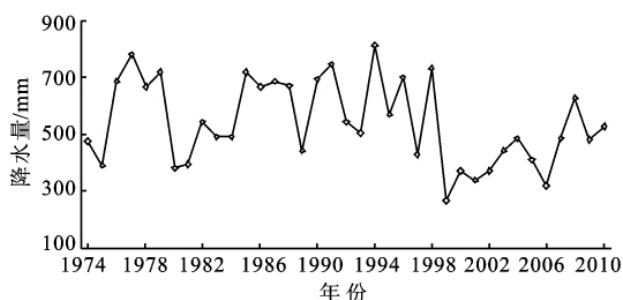


图2 1974—2010年间降水量变化曲线

3.2 刺槐林 NPP 年际变化

利用 BIOME—BGC 模型模拟出 1974—2010 年刺槐林实测 NPP 数据。采用 1974—1992 年的刺槐林实测 NPP 数据进行模型验证,可知实测 NPP(以 C 计)的平均值与模型模拟出的刺槐林 NPP(以 C 计)平均值两者相差 13.81%(相差范围 3.8%~24.3%),除 1974—1977 年、1980—1983 年两段时间模型模拟的 NPP 值大于实测值,其他时段模型模拟的刺槐林 NPP 值总体低于刺槐林样地实际的测定值。这可能是由于研究区位于山区林地,且范围较小,地形、海拔、坡向、坡度、土壤等的微小变化就会对森林的 NPP 值有较大的影响^[16],而模型模拟时的输入参数无法细致地反映出这些细微变化,导致实测数据与模拟结果之间产生了一定的差异。但总体来说,模拟的 NPP 的大小和范围都与实际调查数据基本一致,模拟值与

实测值的变化趋势基本相同,模拟效果整体较好。说明 BIOME—BGC 模型能够比较准确的模拟北京山区落叶针叶林 NPP 的变化(图3)。

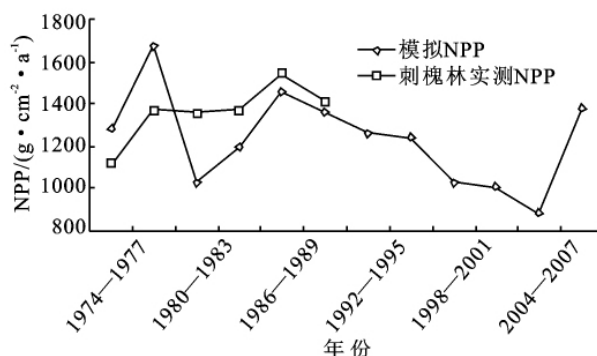


图3 1974—2010年间刺槐的模拟 NPP 与实测 NPP

1974—2010 年间刺槐林的 NPP(以 C 计)平均值为 444.4 g/(m²·a),NPP(以 C 计)的变化范围为 180.60~628.30 g/(m²·a),最大值和最小值相差 447.70 g/(m²·a),无明显的整体变化趋势,但表现出明显的年际变化及低值高值波浪式变化,年际变动率为 11.2%。1977 年、1978 年、1998 年的 NPP 相对较大,1980 年、1999 年、2006 年的 NPP 量相对较小。NPP 的最大值出现在 1977 年,NPP 的最小值出现在 1999 年(图4)。

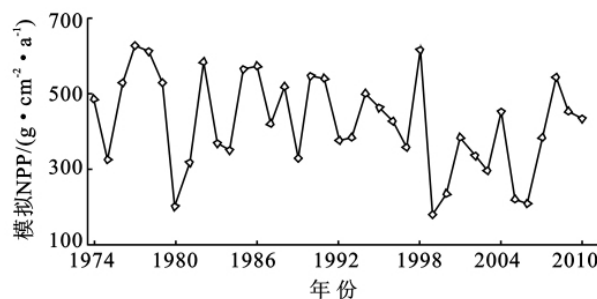


图4 1974—2010年间刺槐林 NPP 变化曲线

3.3 刺槐林 NPP 年际变化与气候变化的关系

刺槐林 NPP 与降水量呈现极显著正相关关系($R=0.83, P<0.01$)(图5),NPP 与平均温度的年际变化关系较复杂,无明显的相关关系($R=-0.26$)(图6)。说明在 1974—2010 年研究时段内,降水量是控制北京山区刺槐林 NPP 年际变化的主要气候因子^[17-18]。

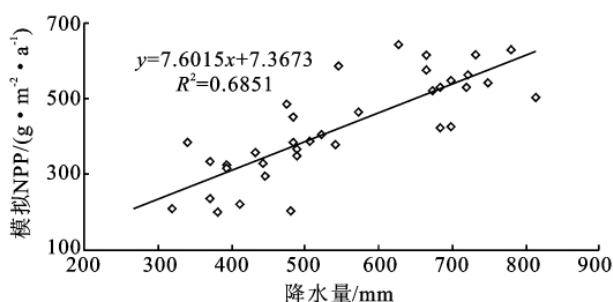


图5 刺槐林模拟 NPP 与降水量相关分析

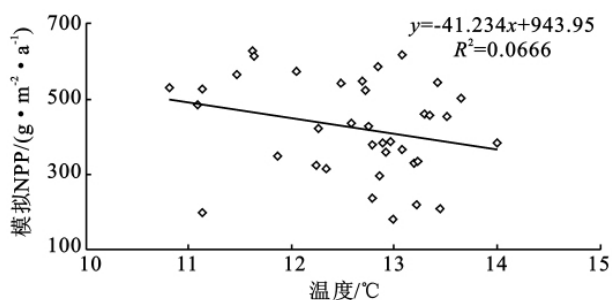


图 6 刺槐林模拟 NPP 与平均温度相关分析

3.4 未来气候方案下的 NPP 变化

在 CO_2 浓度加倍, 气候不变 ($\text{C}_1\text{T}_0\text{P}_0$) 的情况下, 刺槐林 NPP (以 C 计) 的模拟值为 $686.81 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 较原情景 ($\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0$) 增加 54.55% 。在 CO_2 浓度不变, 气候变化的情况下: 单独的温度升高 2.6°C 即 $\text{C}_0\text{T}_1\text{P}_0$ 情景, 刺槐林模拟 NPP (以 C 计) 较原来 ($\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0$ 情景) 降低了 14.58% , 可见单独的温度升高 2.6°C 不利于 NPP 的积累, 对植物自身干物质积累来说, 温度的升高一方面加速了植物的光合作用, 有利于植被 NPP 的积累, 而另一方面同时也加速了枯落物的分解、土壤 CO_2 的释放, 不利于植被 NPP 的积累, 此外, 温度的升高还会导致土壤水分下降, 引起植物干旱胁迫^[19]; 单独的降水增加 10% 即 $\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_1$ 情景下, 刺槐林 NPP (以 C 计) 增加 8.82% , 可见, 降水的单独增加有利于 NPP 的积累。降水的增加能够缓解水分的胁迫, 从而促进植被的蒸腾作用和光合作用, 有利于植被的生长和 NPP 的积累。在温度升高 2.6°C 和降水增加 10% 即 $\text{C}_0\text{T}_1\text{P}_1$ 情景下: 刺槐林的 NPP (以 C 计) 较原来 ($\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0$ 情景) 降低了 7.48% , 温度和降水的交互作用为 -1.72% , 可见, 温度和降水两者之间的交互作用较弱, 且温度和降水的协同增加都不利于 NPP 的积累, 降水增加 10% 对 NPP 的正面作用无法抵消温度升高 2.6°C 对 NPP 的负面影响。气候变化条件下不同森林类型不同情景 NPP 平均值 (图 7) 依次为 $\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_1 > \text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0 > \text{C}_0\text{T}_1\text{P}_1 > \text{C}_0\text{T}_1\text{P}_0$ 。

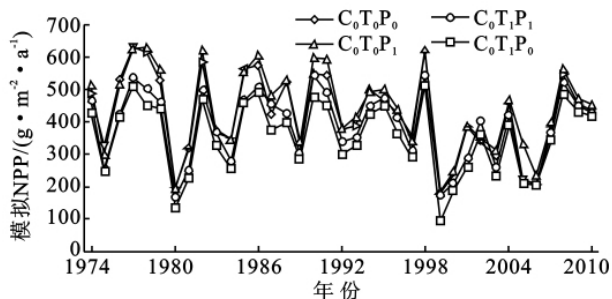
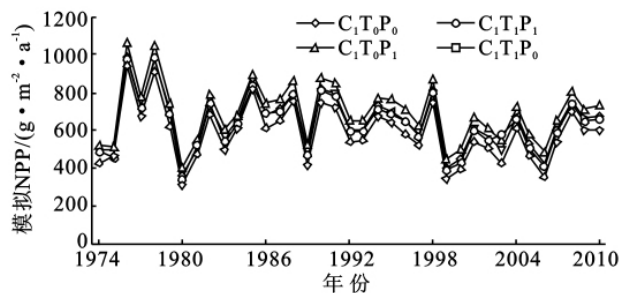


图 7 刺槐林不同气候情形下的 NPP 变化

在 CO_2 浓度加倍, 气候变化情况下: CO_2 浓度加倍温度升高 2.6°C 即 $\text{C}_1\text{T}_1\text{P}_0$ 情景, 刺槐林 NPP (以 C 计) 的模拟值为 $629.28 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 增加了 41.60% ,

交互作用为 1.63% ; CO_2 浓度加倍降水增加 10% ($\text{C}_1\text{T}_0\text{P}_1$), 刺槐林 NPP (以 C 计) 的模拟值为 $734.88 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 增加了 65.36% , 交互作用为 2.00% , 温度升高 2.6°C , 降水增加 10% 即 $\text{C}_1\text{T}_1\text{P}_1$ 情景, 刺槐林 NPP (以 C 计) 的模拟值为 $676.25 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 增加了 52.17% , 交互作用为 5.10% , CO_2 浓度和气候变化下, NPP 平均值 (图 8) 依次为 $\text{C}_1\text{T}_0\text{P}_1 > \text{C}_1\text{T}_0\text{P}_0 > \text{C}_1\text{T}_1\text{P}_1 > \text{C}_1\text{T}_1\text{P}_0$ 。

图 8 CO_2 浓度和气候变化条件下刺槐林不同气候情景的 NPP 变化

4 结论与讨论

(1) 1974—2010 年间刺槐林的 NPP (以 C 计) 表现出明显的年际变化及低值高值波浪式变化, 年际变动率为 11.2% 。BIOME—BGC 模型能够比较准确的模拟刺槐林 NPP 的变化。

(2) 刺槐林 NPP 与降水量呈现极显著正相关关系 ($R=0.83$), 与平均温度无明显的相关关系 ($R=-0.26$)。

(3) 气候不变, 单独 CO_2 的浓度加倍有利于刺槐林 NPP 的积累; CO_2 的浓度不变, 气候变化情况下: 单独的温度升高不利于 NPP 的积累, 单独的降水增加有利于 NPP 的积累, 温度和降水的协同增加不利于 NPP 的积累, 温度和降水交互作用较弱。不同情景 NPP 平均值 $\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_1 > \text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0 > \text{C}_0\text{T}_1\text{P}_1 > \text{C}_0\text{T}_1\text{P}_0$ 。

(4) 在 CO_2 浓度加倍, 温度升高两者协同作用下, NPP 积累有所增加, 两因子交互作用为 1.63% ; CO_2 浓度加倍, 降水增加两者协同作用下有利于 NPP 积累, 交互作用为 2% ; CO_2 浓度加倍, 温度升高, 降水增加三因子共同作用下, NPP 积累增加, 交互作用为 5.1% , 可见, CO_2 浓度加倍、降水增加和温度增加在增加 NPP 方面起到了促进作用。

BIOME—BGC 模型模拟所需参数的前提是生理机能能在模拟时段内保持不变。本研究受实验条件限制, 针对部分敏感的参数进行了实地测量, 其余参数参照相关的文献以及模型本身自带的参数。由于国内相关研究较少, 这种参数化方法存在一定的误差。季节的变化以及极端气候条件^[20]会对模拟结果产生

较大的影响,本研究模拟预测的过程中未考虑。目前有关 CO_2 浓度和气候变化条件下的森林植被生长研究工作仍存在着很多的困难,建议今后加强 CO_2 和气候变化对森林生态系统 NPP 的影响机理的相关研究,注重各生态因子随植物生长的变化情况,优化模拟结果。

参考文献:

- [1] 李平衡,王权,任海. 马占相思人工林生态系统的碳格局及其动态模拟[J]. 热带亚热带植物学报,2009,17(5): 494-501.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. Global Change Biology,1999,1(S):1-15.
- [3] Alexandrov G A, Oikawa T, Yamagata Y. The scheme for globalization of Process-based model explaining gradients in terrestrial NPP and its application[J]. Ecological Modelling, 2002,148(3):293-306.
- [4] 范敏锐,余新晓,张振明,等. CO_2 倍增和气候变化对北京山区栓皮栎林 NPP 影响研究[J]. 生态环境学报,2010, 19(6):1278-1283.
- [5] 曾慧卿,刘琪璟,冯宗炜,等. 基于 BIOME—BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林 GPP 和 NPP [J]. 生态学报,2008,28(11):5314-5321.
- [6] 范敏锐,余新晓,张振明,等. 北京山区油松林净初级生产力对气候变化情景的响应[J]. 东北林业大学学报,2010, 38(11):46-48.
- [7] 陈旭,林宏,强振平. 中国南部样带植被 NPP 与气候的关系[J]. 生态环境,2008,17(6):2281-2288.
- [8] Jochheim H, Puhlmann M, Beese F, et al. Modelling the carbon budget of intensive forest monitoring sites in Germany using the simulation model BIOME—BGC[J]. iForest,2009(2):7-10.
- [9] Eastaugh C S, Elisabeth Pötzelsberger, Hubert Hasenauer, et al. Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME—BGC[J]. Tree Physiol.,2011,31(3):262-274.
- [10] 刘世海,余新晓. 京北山区刺槐林主要养分元素积累与分配的研究[J]. 北京林业大学学报,2003,25(6):20-25.
- [11] 刘增文,余清珠,王进鑫. 刺槐林更新改造对林地水分环境的影响[J]. 西北林学院学报,1995,10(增刊):53-57.
- [12] 杨晓毅,李凯荣,李苗,等. 陕西省淳化县人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2011,31(3):194-201.
- [13] 刘建利,李凯荣,易亮,等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[J]. 水土保持通报, 2008,28(3):49-52,70.
- [14] 李慧. 福建省森林生态系统 NPP 和 NEP 时空模拟研究 [D]. 福州:福建师范大学,2008.
- [15] 高学杰,赵宗慈,丁一汇,等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟:第一部分:模式对中国气候模拟能力的检验[J]. 气象学报,2003,61(1):20-28.
- [16] 曾慧卿,刘琪璟,冯宗炜,等. 基于 BIOME—BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林 GPP 和 NPP[J]. 生态学报,2008,28(11):5314-5321.
- [17] 刘世荣,郭泉水,王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J]. 生态学报,1998,18(5):478-483.
- [18] 苏宏新. 全球气候变化条件下新疆天山云杉林生长的分析与模拟[D]. 北京:中国科学院研究生院,2005.
- [19] Wisley B J. Plant responses to elevated atmospheric CO_2 among terrestrial biomes[J]. Oikos,1996,76(1): 201-206.
- [20] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate:variability is more important than averages[J]. Climatic Change,1992,21(3):289-302.