

近 60 年气候变化对天童地区常绿阔叶林净初级生产力的影响^{*}

彭舜磊^{1,2} 由文辉^{1,2**} 郑泽梅^{1,2} 王良衍²

(¹ 华东师范大学环境科学系, 上海 200062; ² 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江宁波 315114)

摘 要 基于天童地区 1954–2009 年日序列气象数据, 采用周广胜 NPP 模型, 研究了天童地区近 60 年气候变化规律及其对常绿阔叶林 NPP 的影响, 结果表明: 1) 近 60 年, 天童地区月平均气温、降雨量和月参考蒸散量 (ET_0) 在 7、8 月份明显增加, 年平均气温、降雨量和 ET_0 增加趋势十分显著 ($P < 0.001$); 2) 天童地区常绿阔叶林 56 年 NPP 的平均值为 $12.196 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 近 60 年升高趋势极为显著 ($P < 0.0001$); 3) 未来温度升高 2°C , 降水量增加 20% 的情景下, 该地区常绿阔叶林的 NPP 将升高 15.9%。未来温度升高 2°C , 降水量减少 20% 的情景下, NPP 将降低 4.9%。未来温度升高 2°C , 降水量不变的情景下, NPP 将增加 5.5%; 4) 年降雨量、 ET_0 年均值和年平均气温是影响 NPP 变化的主要因子。

关键词 全球变化; 常绿阔叶林; 净初级生产力; 降雨量; 气温; 参考蒸散量

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)3-0502-06

Effects of recent 60 years climate change on net primary productivity of evergreen broad-leaved forest in Tiantong region of Zhejiang Province. PENG Shun-lei^{1,2}, YOU Wen-hui^{1,2**}, ZHENG Ze-mei^{1,2}, WANG Liang-yan² (¹Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; ²Tiantong National Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Zhejiang Province, Ningbo 315114, Zhejiang, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(3): 502–507.

Abstract: Based on the 1954–2009 daily meteorological data of Tiantong region, and using Zhou Guangsheng's net primary productivity (NPP) model, this paper studied the recent 60 years climate change pattern and its effects on the NPP of evergreen broad-leaved forest in the region. In recent 60 years, the monthly average values of air temperature, precipitation, and reference evapotranspiration (ET_0) in the region had an obvious increase in July and August, and the annual mean air temperature, precipitation, and ET_0 increased significantly ($P < 0.001$). The NPP of the evergreen broad-leaved forest in 56 years was averagely $12.196 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and increased significantly in recent 60 years ($P < 0.0001$). In the future, if the air temperature increased by 2°C and the precipitation increased by 20%, the NPP of the evergreen broad-leaved forest in the region would be increased by 15.9%; if the air temperature increased by 2°C and the precipitation decreased by 20%, the NPP would be decreased by 4.9%; and, if the air temperature increased by 2°C and the precipitation was unchanged, the NPP would be increased by 5.5%. Annual average precipitation, ET_0 , and air temperature were the main meteorological factors affecting the NPP of evergreen broad-leaved forest in the region.

Key words: global change; evergreen broad-leaved forest; net primary productivity; precipitation; air temperature; reference evapotranspiration.

* 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090076110021)、浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站开放课题(TT201001)和华东师范大学 2010 年优秀博士生培养基金项目(2010034)资助。

** 通讯作者 E-mail: youwh@yjsy.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2010-09-13 接受日期: 2010-12-14

陆地生态系统与气候系统是相互作用和反馈的动态系统,植被作为陆地生态系统的主体,在陆地生态系统与大气系统之间的能量与物质交换过程中发挥着重要作用。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指绿色植物单位时间和单位面积上所产生的有机干物质总量,是反映植被固定大气中 CO_2 的能力,估算陆地碳源和碳汇的重要因子(方精云,2000),同时也是评价生态系统结构和功能的重要指标。随着全球变化的加剧和国际气候谈判中对碳源、碳汇评价的客观需要,世界各国学者就全球变化对植被 NPP 的影响问题愈加重重视,研究表明,过去几十年的气候变化导致自然植被 NPP 呈增加趋势(Nemani *et al.*, 2003; Grosso *et al.*, 2008)。在国内,很多学者利用不同模型对中国植被的 NPP 进行了估算,并根据未来气候变化情景对 NPP 进行了预测(周广胜和张新时,1996;方精云,2000;柯金虎等,2003;何勇等,2005;侯英雨等,2007)。同时,在亚热带常绿阔叶林区,前人也做了大量的研究工作,倪健(1996)运用 Chikugo 模型对中国亚热带常绿阔叶林 NPP 进行了估算;闫淑君等(2001)和胥晓(2004)分别就全球变化对福建和四川的自然植被的 NPP 影响进行了研究;柯金虎等(2003)对长江流域植被 NPP 的变化特征进行了研究。这些研究多是大区域大尺度的研究,注重 NPP 的估算和时空分布格局,小区域尺度上常绿阔叶林 NPP 对全球变化的响应特征以及 NPP 变化与气象因子的相互作用关系研究相对较少。

天童地区的自然植被为常绿阔叶林,处于中国东部常绿阔叶林中北部亚地带(杨同辉等,2010),以栲树(*Castanopsis fargesii*)、木荷(*Schima superba*)、米槠(*C. carlesii*)、云山青冈(*Cyclobalanopsis nubilum*)等为优势种,位于我国大陆与海洋交接处,长期受东亚季风影响,海洋性气候特征显著。过去几十年来,该地区的气候发生了怎样的变化,气候变化对常绿阔叶林 NPP 的影响如何,对于这些问题的探讨,将有助于深入了解全球变化背景下我国东部亚热带常绿阔叶林生产力的变化过程和碳循环过程。本文利用天童生态站内气象站 1954–2009 年的日序列气象资料(部分年份缺失的气象数据由与天童生态站临近的鄞州区气象站提供),依据自然植被 NPP 模型,分析了气候变化规律及其对 NPP 影响的规律,同时对 CO_2 倍增后 3 种未来气候变化背景下 NPP 的变化进行了预测,以期为全球变化背景下我

国东部亚热带常绿阔叶林生态系统的科学经营与管理提供理论依据和技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站($29^\circ 48' \text{N}$, $121^\circ 47' \text{E}$)内,地貌类型属浙东沿海低山丘陵区,气候为温暖湿润的亚热带季风气候,平均温度 16.2°C ,年平均降水量 1415.1 mm,年蒸发量为 1143.7 mm,年相对湿度高达 85%。自然植被类型是我国东部亚热带地区保存最为完好的地带性植被常绿阔叶林,群落优势树种以栲树、木荷、米槠和云山青冈为主。采用天童生态站的 1954–2009 年逐日气象资料(部分年份缺失的气象数据由与天童生态站临近的鄞州区气象站提供),对该地区的气候变化特征和自然植被净初级生产力进行研究。

1.2 研究方法

1.2.1 参考蒸散量 ET_0 的计算 参考蒸散量(ET_0)的计算采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 方程(刘钰等,1997)。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为气温时的饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为冠层太阳净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 空气平均温度($^\circ\text{C}$); u_2 为 2 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为气温时的饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

采用 1954–2009 年的日序列平均温度、最高温度、最低温度、相对湿度、日照时数和风速计算 ET_0 , 其月值 ET_0 和年值 ET_0 均由逐日的 ET_0 值统计而来。

1.2.2 自然植被 NPP 的计算 自然植被初级生产力采用周广胜模型进行估算(周广胜和张新时,1996)。

$$NPP = RDI^2 \times \frac{r(1 + RDI + RDI^2)^2}{(1 + RDI)(1 + RDI^2)} \times \exp(-\sqrt{9.87 + 5.25 \times RDI}) \quad (2)$$

$$RDI = (0.629 + 0.237PER - 0.00313PER^2)^2 \quad (3)$$

$$PER = PET/r = BT \times 58.93/r \tag{4}$$

$$BT = \sum t/365 = \sum T/12 \tag{5}$$

式中: *NPP* 为自然植被净初级生产力 ($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); *RDI* 为辐射干燥度; *r* 为年均降雨量 (mm); *PER* 为年可能蒸散率; *PET* 为年可能蒸散量 (mm); *BT* 为年平均生物温度 ($^{\circ}\text{C}$); *t* 为大于 0°C 小于 30°C 的日均温 ($^{\circ}\text{C}$); *T* 为大于 0°C 小于 30°C 的月均温 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.2.3 未来气候变化情景依据 根据若干大气环流模型 (GCM) 对 CO_2 浓度倍增后中国大陆气温和降水变化的预测, 未来气候变化最可能的情景如下 (郑元润等, 1997):

- A 情景: 年平均气温增加 2°C , 年降水量增加 20%;
- B 情景: 年平均气温增加 2°C , 年降水量减少 20%;
- C 情景: 年平均气温增加 2°C , 年降水量不变。

2 结果与分析

2.1 不同年代气候指标的月变化规律

由图 1 可知, 20 世纪 90 年代以后, 气温、降雨量和 ET_0 的月平均值在 7-8 月份明显上升。月平均气温和月平均 ET_0 在 90 年以前, 在 7 月份最高, 90 年代以后, 峰值出现在 8 月 (图 1a 和图 1c)。90 年代前, 月平均降雨量为双峰曲线, 峰值分别出现在 6 月和 9 月, 90 年代后, 变化为单峰曲线, 峰值出现在 7 月 (图 1b)。

2.2 气候指标的年际变化规律

由图 2 可知, 56 年来, 天童地区的年平均气温、年降雨量和 ET_0 上升趋势均极为显著 ($P < 0.001$), 其 10 年变率分别为 0.3°C 、 61.5 和 27.6 mm ; 年可能蒸散率 *PER* 呈下降趋势, 但降低趋势不显著 ($P = 0.082$)。气温和 ET_0 的年际变化表现为 50 年代到 60 年代, 呈上升趋势, 70 年代为低值期, 70 年代后, 呈振荡上升趋势, 90 年代为气温和 ET_0 的高值期。降雨量 50 年代到 60 年代呈下降趋势, 60 年代为降雨量低值期, 之后呈振荡上升趋势 (图 2b)。 *PER* 从 50 年代到 60 年代逐渐升高, 之后呈振荡下降趋势, 60 年代为高值期, 1964 年的 *PER* 值最高, 为 0.97, 低值期为 70 年代, 最小值出现在 1973 年, 为 0.56, 近 60 年 *PER* 的平均值为 0.69 (图 2d)。

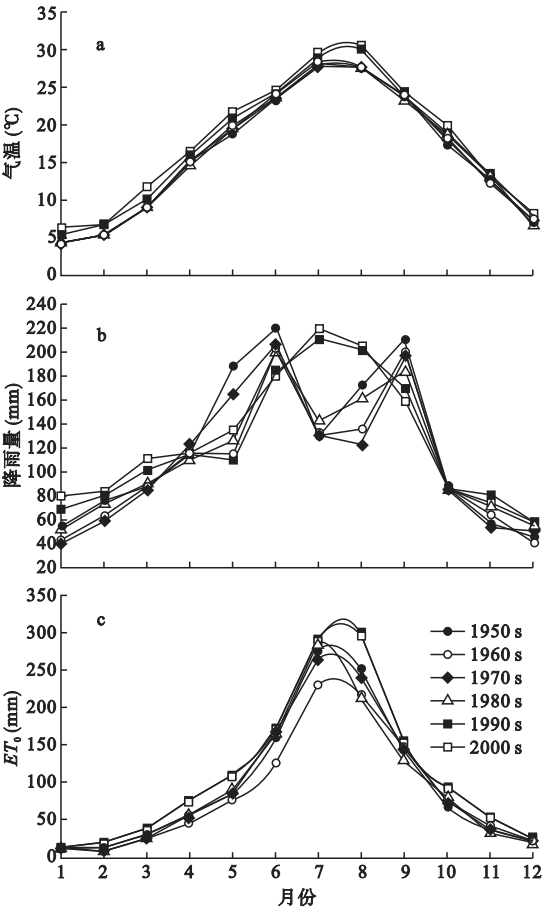


图 1 不同年代气温 (a)、降雨量 (b) 和参考蒸散量 ET_0 (c) 的月均值变化
Fig. 1 Changes of monthly average values for air temperature (a), precipitation (b) and ET_0 (c) in the different years

2.3 NPP 的年际变化规律

由图 3 可知, 近 60 年天童地区常绿阔叶林 NPP 整体增加趋势极为显著 ($r = 0.560, P < 0.0001$), 高值期出现在 90 年代末, 低值期为 60 年代末期到 70 年代中期。从 50 年代到 60 年代呈下降趋势, 60 年代之后呈逐渐上升趋势。近 60 年来, NPP 的最大值为 $14.573 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 出现在 1998 年, 最小值为 $10.273 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 出现在 1964 年, 56 年平均值为 $12.196 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。90 年代 NPP 的变异系数和标准方差最大, 年际波动较大, 2000-2009 年间 NPP 的变异系数和标准方差最小, 年际波动较小 (表 1)。NPP 与气候因子的相关性分析可知, NPP 与降雨量的相关系数最大 (0.971), 说明降雨量是影响天童地区 NPP 的最主要因素, 其次为参考蒸散量 ET_0 , NPP 与相对湿度不相关 (表 2)。图 4 对比验证了 1995-2009 年鄞州区气象站和天童气象站

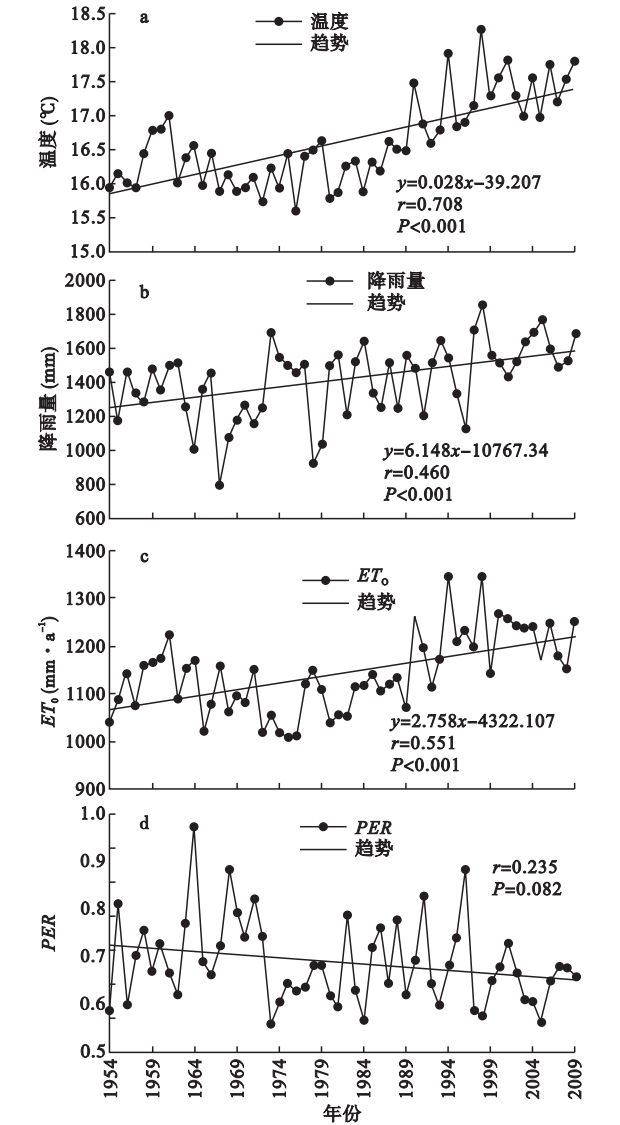


图2 年平均温度(a)、降雨量(b)、参考蒸散量 ET_0 (c)和年可能蒸散率 PER (d)逐年变化趋势
Fig. 2 Annual trends of air temperature (a), precipitation (b), ET_0 (c), and PER (d)

估算的 NPP 的差异性,2 个气象站站估算的 NPP 差异较小,所建立的回归方程极为显著($r=0.954$,

表 2 NPP 与气象因子的相关系数
Table 2 Correlation coefficient of NPP and meteorological factors

气象因子	最高温度	最低温度	降雨量	ET_0	日照时数	相对湿度	NPP
温度	0.568 **	0.525 **	0.309 *	0.819 **	-0.407 **	-0.635 **	0.527 **
最高温度		0.287 *	0.208	0.484 **	-0.253	-0.508 **	0.329 *
最低温度			0.192	0.534 **	-0.411 **	-0.477 **	0.302 *
降雨量				0.446 **	-0.403 **	-0.099	0.971 **
ET_0					-0.839 **	-0.607 **	0.604 **
日照时数						0.354 *	-0.462 **
相对湿度							-0.248

* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

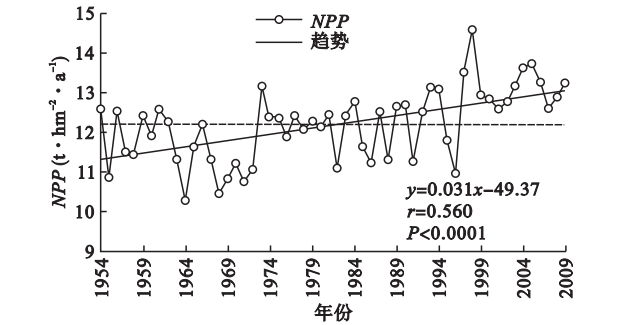


图3 天童地区常绿阔叶林 NPP 逐年变化趋势
Fig. 3 Annual trends of NPP of evergreen broad-leaved forest in Tian Tong region

表 1 天童地区不同年代自然植被 NPP 值比较
Table 1 Temporal NPP change of natural vegetation in Tian Tong region

年代	NPP 年均值 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	NPP 最大值 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	NPP 最小值 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	极值比	标准差	变异系数
1950s	11.884	12.598	10.872	1.159	0.703	0.059
1960s	11.472	12.568	10.273	1.223	0.787	0.069
1970s	11.946	13.134	10.772	1.219	0.735	0.062
1980s	12.022	12.766	11.092	1.151	0.634	0.053
1990s	12.651	14.573	10.945	1.331	1.083	0.086
2000s	13.075	13.721	12.594	1.089	0.392	0.030
总平均	12.196	14.573	10.273			

$F=141.839, P<0.0001$)。

2.4 未来全球变化对 ET_0 和 NPP 的影响

以 2000–2009 年间的 NPP 均值为目前值,以 CO_2 倍增后 3 种可能的气候变化预测未来 NPP 的变化(表 3),由表 3 可见,A 情景“暖湿性气候”(温度升高 $2\text{ }^{\circ}C$,降雨量增加 20%)将使 NPP 较目前增加 15.9%,B 情景“暖干型气候”(温度升高 $2\text{ }^{\circ}C$,降雨量减少 20%)将使 NPP 较目前减少 4.9%,C 情景(温度升高 $2\text{ }^{\circ}C$,降雨量不变)将使 NPP 较目前增加 5.5%。

表 3 天童地区目前及未来 CO₂ 浓度增加后 NPP 值变化
Table 3 NPP under present and the global warming caused by doubled CO₂ in Tiantong region

未来 全球变化	<i>BT</i> (℃)	<i>r</i> (mm)	<i>PET</i> (mm)	<i>PER</i>	NPP (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	NPP 变率 (%)
目前值	17.4	1577	1028	0.652	13.075	0
A 情景	19.4	1892	1146	0.582	15.151	15.9
B 情景	19.4	1261	1146	0.873	12.430	-4.9
C 情景	19.4	1577	1146	0.698	13.798	5.5

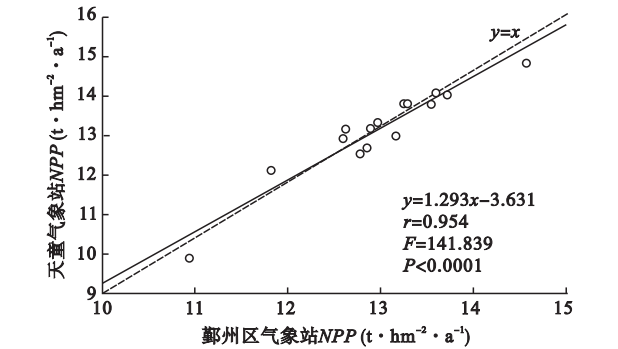


图 4 1995–2009 年天童气象站与鄞州区气象站估算的 NPP 比较
Fig. 4 Comparison of NPP values estimated by meteorological data from Tiantong meteorological station and Yinzhou meteorological station during 1995–2009

3 讨 论

3.1 近 60 年天童地区气候变化规律

近 60 年来,天童地区气候变暖趋势十分显著,年平均气温上升了 1.5℃,10 年变率为 0.3℃·10 a⁻¹,降雨量和参考蒸散量 *ET*₀ 亦呈升高趋势,二者分别升高了 307 和 138 mm。而且,不同年代间气候的季节变化特征非常明显。90 年代以前,月平均气温和月参考蒸散量的最大值均出现在 7 月份,90 年代以后其峰值出现在 8 月。90 年代之前,月平均降雨量呈双峰曲线,峰值出现在 6 月和 9 月,而 7 月和 8 月降雨量偏少。这是因为 6 月份受中国东部夏季风雨带控制,为梅雨时节,形成多雨中心;7、8 月份夏季风雨带移至华北和东北,该地区受副高压脊控制,炎热少雨,形成伏旱,9 月份,受沿海台风影响,降雨量增加,又现峰值。90 年代以后,天童地区的降雨格局发生了显著变化,月降雨量呈单峰曲线,7 月和 8 月的降雨量显著增加,并达到峰值。这主要由于 90 年代以后,7、8 月份台风暴雨在我国东部沿海活动频繁,带来大量的降雨。总之,90 年代以后,夏季高温多雨的气候变化,有利于自然植被的生长和生产力的提高。近 60 年来,天童地区 *ET*₀ 呈增加趋势,和

很多大区域 *ET*₀ 呈下降趋势的研究结果不同(Axel, 2000; Michael & Graham, 2002; 左洪超等, 2005; Xu *et al.*, 2006),也和王艳君等(2005)对长江流域 40 年蒸发量呈降低趋势的研究结果不同,原因在于大尺度的研究,所选取气象站得密度有限,以有限的站点的数据模拟大区域气候的变化,有误差(New *et al.*, 1999)。另外,局部气候的异质性,也是大区域与小区域产生差异的重要原因。

3.2 近 60 年天童地区气候变化对常绿阔叶林 NPP 的影响

近 60 年,天童地区常绿阔叶林 NPP 总体上呈上升趋势。年际变化表现为从 50 年代到 60 年代呈下降趋势,60 年代之后呈振荡上升趋势。高值期为 90 年代和 20 世纪末期,低值期出现在 60 年代末期到 70 年代中期。这与闫淑君等(2003)和柯金虎等(2003)在亚热带地区研究的结果相同。自然植被 NPP 值的大小是地区水热条件的综合反映,降水和温度的变化直接影响着 NPP 的变化,森林生产力的分布格局主要取决于气候环境中的水热条件(刘世荣等,1998)。本研究表明,年降雨量、*ET*₀ 年均值、年均气温与 NPP 呈极显著正相关,其中年降雨量与 NPP 的相关系数最大,其次是 *ET*₀,再次是年平均气温。60 年代末期到 70 年中期之所以是 NPP 的低值期,原因是在这一时期年均降雨量、年参考蒸散量 *ET*₀ 和年均气温均较其他年份低。近 60 年来,90 年代是一个高温期,长江南岸区域降水量在 90 年代亦呈上升的趋势(杨保等,2002),这也是常绿阔叶林 NPP 在 90 年代呈现快速增加的原因。1998 年由于全球厄尔尼诺现象的影响,年平均温度、年降水量、年太阳辐射均明显比其他年份高,从而使 1998 年自然植被 NPP 表现出较高的水平。另外,通过对天童气象站与鄞州区气象站 1995–2009 年气象数据模拟的 NPP 值比较,结果表明,二者差异很小,相关性极为显著。因为鄞州区气象站与天童气象站临近,相距仅 15 km,自然植被相同,因此,用鄞州区气象站的气象数据代表天童部分年份缺失的相应气象数

据具有合理性。

3.3 天童地区自然植被 NPP 现实值及未来全球气候变化对 NPP 的影响

天童地区位于中国东部亚热带常绿阔叶林的中北部亚地带(杨同辉等,2010),本研究计算的天童地区 NPP 近 60 年的平均值为 $12.196 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与倪健(1996)用 Chikugo 模型估算的中国亚热带常绿阔叶林中北部亚地带的 NPP 平均值 $13.594 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以及孙善磊等(2010)利用 LPJ 模型模拟的环杭州湾地区自然植被 NPP 平均值 $552 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (假定含碳量 50%,天童 NPP 平均值可换算为 $610 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)比较接近。小于周广胜和张新时(1996)利用周广胜模型模拟的中国亚热带常绿阔叶林中北部亚地带 NPP 平均值 $15.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。高于柯金虎等(2003)利用 CASA 模型估算的长江流域常绿阔叶林 NPP 年均值($365 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),产生差距的原因与所选取的气象站点以及常绿阔叶林受人类活动干扰的程度不同有关。与其他地区的常绿阔叶林 NPP 值相比,天童地区常绿阔叶林的 NPP 高于四川常绿阔叶林 NPP 平均值 $9.069 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (胥晓,2004),低于福建常绿阔叶林的 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (闫淑君等,2003),原因是天童地区常绿阔叶林的水热条件优于四川,劣于福建。杨同辉等(2010)通过树干解析法测得天童地区林龄为 52 年的木荷-米楮林的 NPP 为 $211.6 \sim 255.5 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,远小于本研究 NPP 平均值 $610 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,原因是利用气象资料估算的 NPP 值是在理想状态下自然植被所能达到的最大 NPP,是气候顶极群落的 NPP。木荷-米楮林处于演替的中期阶段,演替到顶极群落尚需 50 年左右的时间(宋永昌和王祥荣,1995),其 NPP 的增加还有很大的空间。

根据未来气候变化的 3 种情景预测可知,A 情景“暖湿型”的气候条件,NPP 值为 $15.151 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,比目前值提高了 15.9%,有利于常绿阔叶林 NPP 的提高,B 情景“暖干型”气候,将使天童常绿阔叶林的 NPP 比现在降低 4.9%,C 情景的气候变化对天童常绿阔叶林 NPP 的提高效果不显著。尽管有研究表明,由于长江中下游地区降水相对丰沛,植被生长的主要限制因子是热量条件(柯金虎等,2003),但本研究证明,降雨量是影响该天童地区常绿阔叶林 NPP 的主要限制因子。

参考文献

- 方精云. 2000. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. 植物生态学报, **24**(5): 513-517.
- 何勇,董文杰,季劲松,等. 2005. 基于 AVM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. 地球科学进展, **20**(3): 345-349.
- 侯英雨,柳钦火,延昊,等. 2007. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应. 应用生态学报, **18**(9): 1546-1553.
- 柯金虎,朴世龙,方精云. 2003. 长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究. 植物生态学报, **27**(6): 764-770.
- 刘钰, Pereira LS, Teixeira JL, 等. 1997. 参照腾发量的新定义及计算方法对比. 水利学报, **28**(6): 27-33.
- 刘世荣,郭泉水,王兵. 1998. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, **18**(5): 478-483.
- 倪健. 1996. 中国亚热带常绿阔叶林净第一性生产力的估算. 生态学杂志, **15**(6): 1-8.
- 宋永昌,王祥荣. 1995. 浙江天童国家森林公园的植被和区系. 上海:上海科学技术出版社.
- 孙善磊,周锁铨,薛根元,等. 2010. 环杭州湾地区近 36 年自然植被净初级生产力的变化特征. 自然资源学报, **25**(5): 830-841.
- 王艳君,姜彤,许崇育,等. 2005. 长江流域 1961—2000 年蒸发量变化趋势研究. 气候变化研究进展, **1**(3): 99-105.
- 胥晓. 2004. 四川植被净第一性生产力(NPP)对全球气候变化的响应. 生态学杂志, **23**(6): 19-24.
- 闫淑君,洪伟,吴承祯,等. 2001. 福建近 41 年气候变化对净初级生产力的影响. 山地学报, **19**(6): 522-536.
- 杨保,周清波,施雅风. 2002. 长江下游地区过去 300 年的气候变化. 长江流域资源与环境, **11**(4): 352-357.
- 杨同辉,宋坤,达良俊,等. 2010. 中国东部木荷-米楮林的生物量和地上净初级生产力. 中国科学:生命科学, **40**(7): 610-619.
- 郑元润,周广胜,张新时,等. 1997. 中国陆地生态系统对全球变化的敏感性研究. 植物学报, **39**(9): 837-840.
- 周广胜,张新时. 1996. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报, **20**(1): 11-19.
- Axel TH. 2000. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, **20**: 381-396.
- Grosso SC, Parton W, Stohlgren T, et al. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology*, **89**: 2117-2126.
- Michael LR, Graham DF. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, **298**: 1410-1411.
- Nemani RR, Kelling CD, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, **300**: 1560-1563.
- New M, Hulme M, Jones P. 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I, Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, **12**: 829-856.
- Xu CY, Gong LB, Jiang T, et al. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology*, **327**: 81-93.

作者简介 彭舜磊,男,1974 出生,博士生。主要从事全球变化生态学和生态水文学研究。E-mail: pengshunlei@163.com
责任编辑 王伟

