

重庆地区年气温与降水量变化特征及对 NPP 的影响^{* 1}

李永华¹⁾ 高阳华¹⁾ 韩逢庆¹⁾ 向鸣²⁾ 唐云辉²⁾ 何永坤²⁾

¹⁾(重庆市气象科学研究所,重庆 401147) ²⁾(重庆市气象台,重庆 401147)

摘 要

选取重庆 34 个测站 1959—2001 年共 43 年逐月平均气温和降水量资料,利用 Thornth-waite Memoriae 模型,即根据植物生物产量与年平均气温、年降水量之间的关系用实际蒸散量估算 NPP(净第一性生产力),采用 EOF 及 MHF 小波等方法分析重庆地区年平均气温、降水量及 NPP 的时空变化特征及相互关系,最后采用 Thornth-waite Memoriae 模型分析气温、降水变化对 NPP 的影响,并结合未来气候预测结果对 NPP 的变化进行了预估。结果表明:重庆区域的年平均气温、年总降水量及 NPP 空间变化均比较有规律,在整个时间域内,气温呈下降趋势,而降水变化趋势不明显,NPP 略有下降,但它们都具有明显的阶段性变化特征,NPP 与降水的变化趋势比较一致;在不同时间尺度上,NPP 的变化趋势与降水接近,在 10 年时间尺度以下时,它与气温变化关系不明显,NPP 与降水的年际振动特征明显,而气温的年代际振动特征较显著;重庆地区“暖湿型”气候对 NPP 增加最有利,而“冷干型”气候对 NPP 增加最不利,未来 50 年内重庆地区气温及降水变化趋势将有利于 NPP 的增加,2030 年前后可能达到最大值。

关键词: 气温降水变化; NPP; 时空分布特征

引 言

气候及其变化越来越受到人们的关注,全球变暖对环境、水资源、农业生产等的影响已成为世界科学界的重要研究课题,这也是各国政府作经济和社会决策时所必须考虑的重要问题。根据 IPCC 研究报告,近百年全球平均温度已经升高了 $0.6 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[1],这种温度的上升趋势还将持续。气候变暖加剧了极端天气气候事件的频繁出现,对粮食安全构成了威胁,气候变化及气象灾害对作物产量和品质有很大影响,农业生产的发展在年度间不稳定,在地区间也不平衡,因此研究气候变化对农业生产的影响及其战略对策具有重要的理论意义和实用价值。目前,关于气候变化对农业生产影响的研究较多^[2-9],但气候变化本身具有一定的区域特征,因此对农业生产的影响程度可能会有所差异。重庆属亚热带季风气候区,具有湿润温暖的气候特点,比较适宜农业耕作和粮食生产,但重庆又是一个气候脆弱带,气候变率较大,旱涝、低温等灾害发生频繁,对粮食生产造成

影响,本文将对重庆地区 NPP(净第一性生产力)时空分布特征及其对气温及降水变化的响应进行分析,为进一步研究气候变化对作物产量的影响提供背景。

1 资料和方法

选取重庆 34 个测站(表 1)1959—2001 年共 43 年逐月平均气温和降水量资料,其中有个别站资料个别年份缺测,采用比值订正法^[10]进行序列查补,从而获得完整的资料序列。

生态学上所谓的生产力也叫净第一性生产力(英文简称 NPP),是指每年每公顷面积能够生产多少吨干物质,其相关的计算方法很多,如迈阿密模型、蒙特利尔模型、筑后模型等^[11]。考虑到所用资料既易于获取同时又能清楚说明气候变化的影响,本文选用李斯(Lieth)著名的 Thornth-waite Memoriae 模型,即根据世界各地植物生物产量与年平均气温、年降水量之间的关系用实际蒸散量来估算 NPP^[12-13]:

$$p_0 = 30000(1 - e^{-0.000956(t-20)}) \quad (1)$$

* 重庆市科技合作项目“重庆市冷暖旱涝灾害变化及其影响研究”(2004-8770)资助。

2005-08-08 收到,2006-06-02 收到再改稿。

式(1)中, p_v 是 NPP(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), v 是年平均蒸散量(单位: mm), 可按下式计算

$$v = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1.05R/l)^2}}$$

其中, R 是年降水量(单位: mm), l 是平均蒸发量(单位: mm), 它是年平均气温 t (单位: $^{\circ}\text{C}$)的函数, 可按下式计算

$$l = 300 + 25t + 0.05t^3$$

该模型主要考虑了气温和降水条件对植物干物质积累的综合影响, 显然, 利用该模型通过气温和降水资料来讨论其变化对植物产量的影响十分方便。在计算出各站点逐年的 p_v 值后, 利用 EOF, MHF 小波^[14-16]等方法分析其时空分布特征, 进而探讨气温降水变化与其变率的不稳定性对其产生的影响。

表 1 重庆 34 个测站分布

Table 1 Distribution of 34 observation stations in Chongqing

站名	经度	纬度	站名	经度	纬度	站名	经度	纬度	站名	经度	纬度
沙坪坝	106°28'E	29°35'N	北碚	106°27'E	29°51'N	万盛	106°56'E	28°57'N	长寿	107°04'E	29°50'N
巴南	106°31'E	29°23'N	綦江	106°39'E	29°01'N	渝北	106°38'E	29°43'N	江津	106°15'E	29°17'N
合川	106°17'E	29°58'N	潼南	105°50'E	30°11'N	铜梁	106°03'E	29°51'N	永川	105°53'E	29°22'N
大足	105°42'E	29°42'N	荣昌	105°36'E	29°25'N	璧山	106°14'E	29°35'N	万州	108°24'E	30°46'N
忠县	108°02'E	30°18'N	梁平	107°48'E	30°41'N	开县	108°26'E	31°12'N	云阳	108°54'E	30°58'N
奉节	109°30'E	31°03'N	巫山	109°52'E	31°04'N	巫溪	109°37'E	31°24'N	城口	108°40'E	31°57'N
涪陵	107°25'E	29°45'N	垫江	107°21'E	30°20'N	南川	107°05'E	29°09'N	丰都	107°41'E	29°52'N
石柱	108°07'E	30°00'N	武隆	107°45'E	29°19'N	彭水	108°10'E	29°18'N	黔江	108°47'E	29°32'N
酉阳	108°46'E	28°50'N	秀山	108°59'E	28°27'N						

2 重庆地区年气温、降水量及 NPP 的时空分布特征分析

2.1 重庆地区年平均气温时空特征

图 1 是重庆地区 34 个代表站 1959—2001 年 43 年逐年平均气温场 EOF 分解的第一特征向量(占总方差的 53%)分布图及对应时间系数图。从图 1a 可见, 年平均气温变化的空间变化比较有规律, 中部偏北地区的振幅较大, 向东南和东北地区逐

渐减小。图 1b 可见, 重庆地区的年平均气温具有明显的阶段性变化特征, 在 20 世纪 70 年代中期以前, 年平均气温处于偏高的阶段, 之后至 90 年代中期以前, 气温处于偏低的阶段, 90 年代中期以后, 气温又开始快速上升。在整个时间域内, 重庆气温变化呈下降趋势, 特别是 70 年代后期到 90 年代前期的气温偏低状况与全球、北半球、中国的气温变化趋势不一致^[17-21], 可能与所处的天气气候背景及大气环境改变有关^[17-20]。

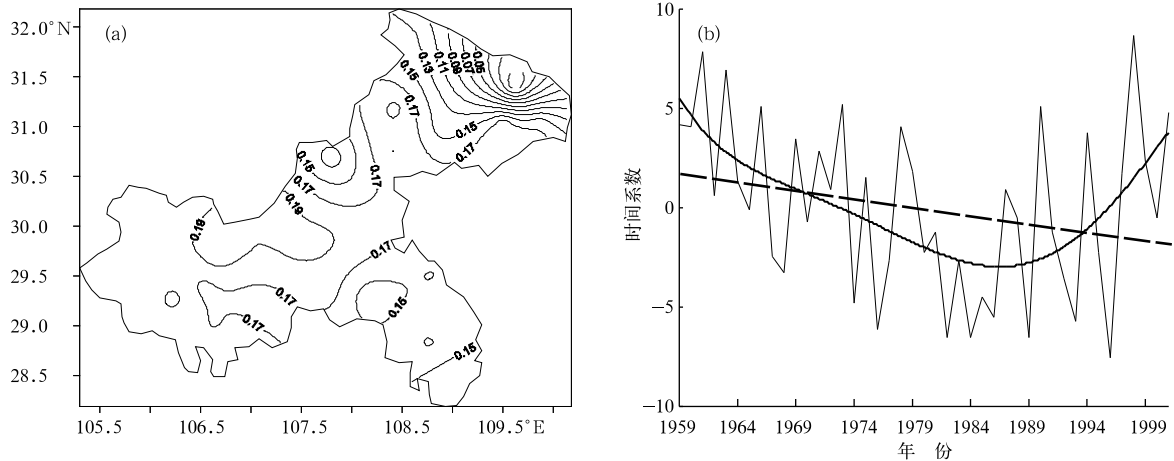


图 1 重庆地区 1959—2001 年年平均气温 EOF 分解第一特征向量分布图(a)和对应时间系数图(b)
(虚线为线性趋势, 粗实线为 5 项多项式拟合曲线)

Fig. 1 The 1st eigenvector of EOF analyses (a) and relevant time coefficient (b) of annual mean temperature in 1959—2001 of Chongqing (dashed line is line trend, thick solid line is 5 term polynomial fitting curve)

2.2 重庆地区年总降水量时空特征

图 2 是重庆地区 34 个代表站 1959—2001 年 43 年逐年年降水量场 EOF 分解的第一特征向量(占总方差的 47%)分布图及对应时间系数图,从图 2a 可见,年降水量的空间变化也是比较有规律的,中部地区的振幅较大,向东南和东北地区逐渐减小,这与气温的特征类似。由图 2b 可见,重庆地区的年

降水量也具有明显的阶段性变化特征,在 20 世纪 60 年代前期,年降水量处于偏少的阶段,之后至 80 年代中期以前,降水处于偏多的阶段,80 年代中期至 90 年代中前期,降水偏少,90 年代后期降水偏多,之后降水又开始减少。在整个时间域内,重庆的年降水量变化的线性趋势不明显。

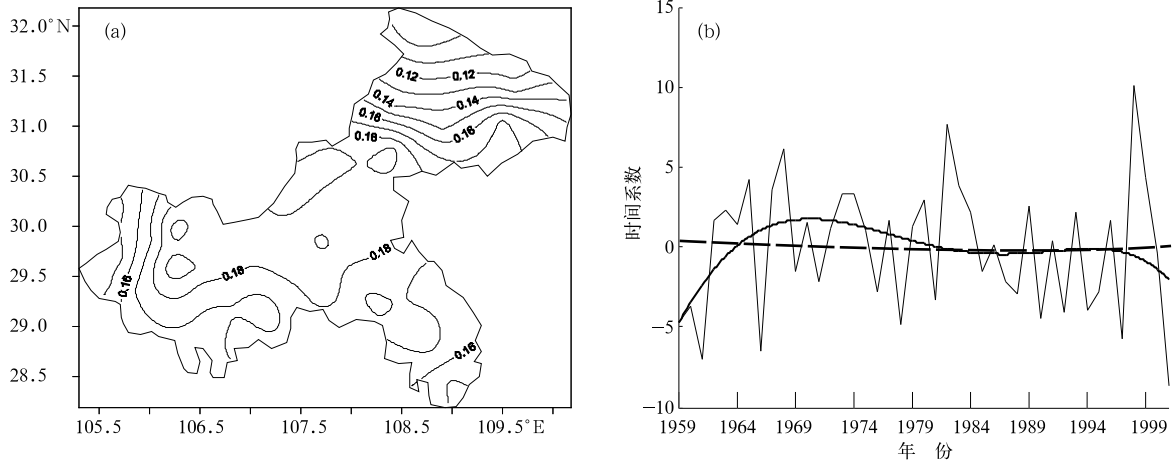


图 2 重庆地区 1959—2001 年年降水量 EOF 分解第一特征向量分布图(a)和对应时间系数图(b)(说明同图 1)

Fig. 2 The 1st eigenvector of EOF analyses (a) and relevant time coefficient (b) of annual precipitation in 1959—2001 of Chongqing(others as in Fig. 1)

2.3 重庆地区 NPP 时空特征

图 3 是重庆地区 34 个代表站 1959—2001 年 43 年逐年 NPP 场 EOF 分解的第一特征向量(占总方差的 48%)分布图及对应时间系数图。由图 3a 可见,NPP 变化的空间分布与气温和降水量比较类似,中部地区的振幅较大,向东南和东北地区逐渐减

小。由图 3b 可见,重庆地区的 NPP 也具有与年降水量变化相似的阶段性变化特征,在 20 世纪 60 年代前期,NPP 处于偏低的阶段,之后至 70 年代末,NPP 处于偏高的阶段,80 年代中期至 90 年代初,NPP 偏低,90 年代中期偏高,之后又开始降低。在整个时间域内,NPP 的线性变化趋势略有下降。

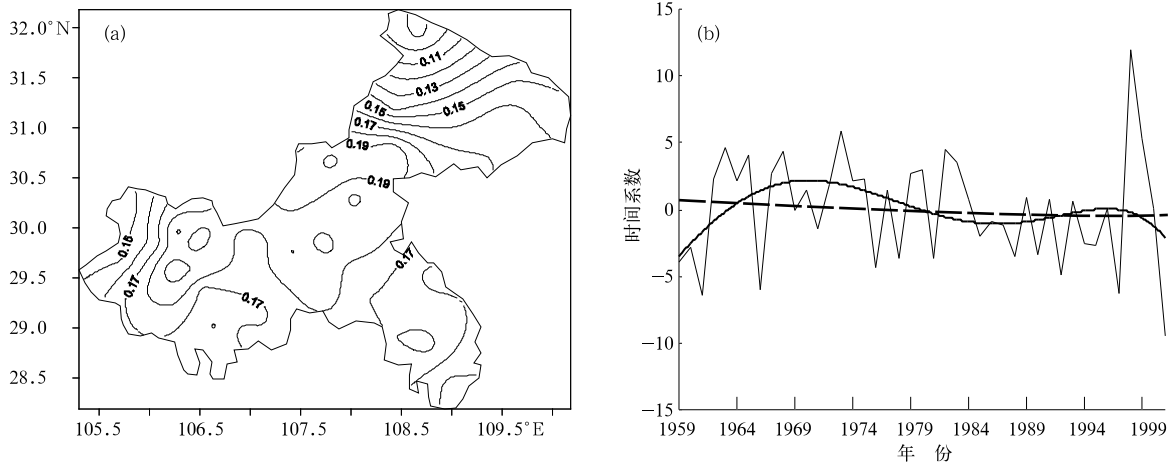


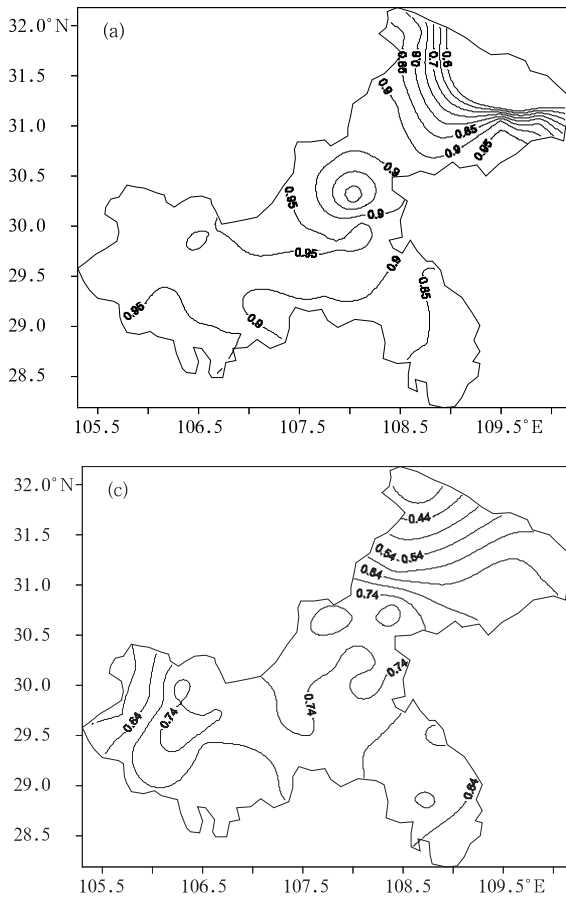
图 3 重庆地区 1959—2001 年 NPP 的 EOF 分解第一特征向量分布图(a)和对应时间系数图(b)(说明同图 1)

Fig. 3 The 1st eigenvector of EOF analyses (a) and relevant time coefficient (b) of NPP in 1959—2001 of Chongqing (others as in Fig. 1)

3 重庆地区年气温、降水量及 NPP 的关系

3.1 TEOF1 对重庆各地气温、降水量及 NPP 变化的代表性分析

从上面的分析可见,重庆地区的年平均气温、总降水量及 NPP 均具有很好的区域一致性分布特征,同时在一定程度上反映了多年平均状况,这可能与重庆地域较窄,受共同大气环流背景影响,大部分年份气温和降水量变率比较一致有关。但通过 EOF 分解出的第一特征向量时间系数(TEOF1)变化是



否能较好地体现重庆各地的相应要素变化趋势需要做进一步验证。

图 4 是重庆地区年平均气温、降水量及 NPP 与相应的 EOF 分解的第一特征向量时间系数(TEOF1)的相关系数分布图。由图 4 可见,各相关系数数值均较高,相对而言,气温的相关系数总体大于降水量及 NPP,而降水量与 NPP 的相关系数比较接近,图中绝大部分相关系数值通过 0.001 显著性水平检验(临界相关系数为 0.47),表明用 TEOF1 序列可以较好地体现重庆各地气温、降水量及 NPP 的总体变化特征,也就是说,TEOF1 序列具有较好的代表性,

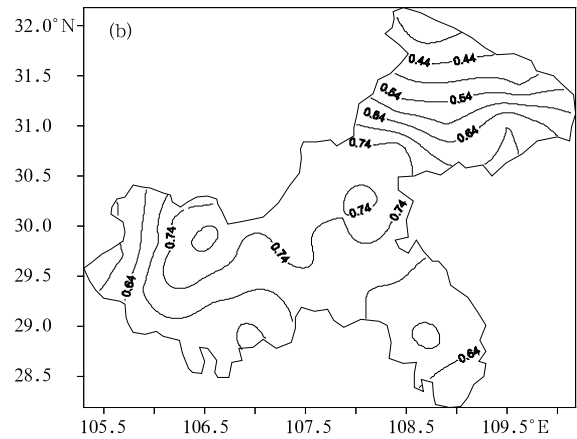


图 4 重庆地区年平均气温(a)、降水量(b)及 NPP(c)与相应的 TEOF1 相关系数分布图
Fig. 4 The figures of correlation coefficients between relevant TEOF1 and annual mean temperature(a) or precipitation(b) and NPP(c) series in Chongqing

可以利用其作为区域的平均特征序列进行分析。

3.2 重庆地区年平均气温、降水及 NPP 变化的关系分析

计算得到重庆地区年平均气温、降水量及 NPP 的 EOF 分解的第一特征向量时间系数序列相互之间的相关系数:年平均气温与年降水量之间的相关系数为-0.31,通过 0.005 显著性水平检验(临界相关系数为 0.29),表明两者变化趋势是相反的,一般来说偏早年对应偏暖年,偏涝年对应偏冷年。年平均气温与 NPP 的关系不明显,相关系数仅为-0.06;而

年降水量与 NPP 关系非常密切,相关系数为 0.95,相关系数数值通过 0.001 显著性水平检验(临界相关系数为 0.47)。为了体现气温、降水量与 NPP 的关系,采用 MHF 小波分析方法对其作进一步的多时间尺度对比分析。

图 5 是经 MHF 小波变换所得的时间尺度为 20 年、10 年和 3 年的气温、降水量及 NPP 变化趋势及其小波方差。由图 5 可见,在大时间尺度(20 年)上,气温、降水量及 NPP 的变化趋势基本一致,在整个时间段上都呈下降趋势,但气温的下降趋势比降

水量及 NPP 明显,它们发生突变的时间也不一样,气温突变在 1977 年,而 NPP 和降水量突变时间分别在 1983 年和 1987 年;在较大时间尺度(10 年)上,NPP 的变化趋势与降水非常接近,但与气温的变化趋势的关系则不明显,其发生突变的时间也不同;在更小时间尺度(3 年)上,NPP 与降水的变化趋

势更趋接近,而与气温的趋势关系不明显;从小波方差图可见,在 1959—2001 年整个时间域内,年平均气温 11 年周期特征最明显,而降水量和 NPP 的周期特征比较一致,均是 2 年周期最显著,说明平均气温具有明显的年代际变化特征,而 NPP 和降水的年际变化特征则较明显。

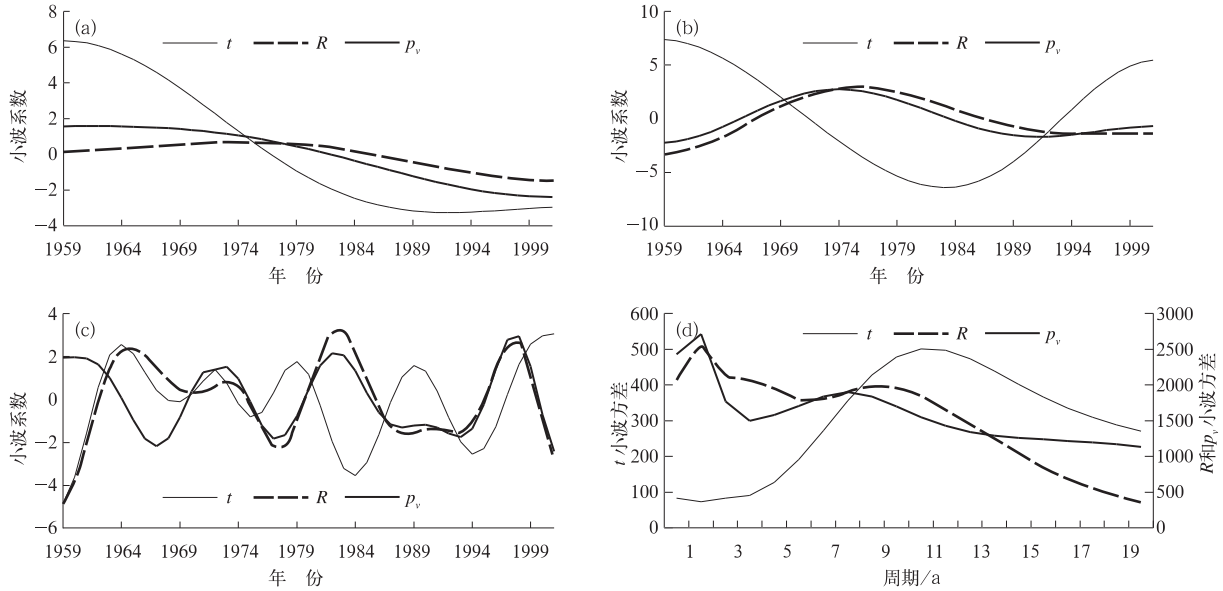


图 5 时间尺度为 20 a(a),10 a(b)和 3 a(c)气温、降水量及 NPP 的变化趋势及小波方差(d)
 Fig. 5 The air temperature, precipitation and NPP change tendencies on 20 a(a), 10 a(b) and 3 a(c) time scales and their wavelet variances(d)

4 重庆气温及降水量变化对 NPP 的影响

以最近 10 年(1992—2001 年)34 站年平均气温、年降水量平均值作为气候的参照背景,假设未来

气候变化的 49 种情景,即年平均气温变化为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量变化为 -30% , -20% , -10% , 0 , 10% , 20% , 30% ,按照式(1)计算得到的重庆地区 NPP 的变化百分率列于表 2 中。

表 2 重庆地区年平均气温和年降水量变化情景下 NPP 变化百分率(单位:%)
 Table 2 Percentage change of the NPP under the changing conditions of the annual mean temperature and precipitation in Chongqing (unit:%)

气温变幅/ $^{\circ}\text{C}$	降水量变幅						
	-30%	-20%	-10%	0	10%	20%	30%
3	-7.5	-1.3	3.8	8.0	11.5	14.4	16.9
2	-9.0	-3.2	1.6	5.5	8.7	11.4	13.6
1	-10.7	-5.2	-0.8	2.8	5.8	8.2	10.3
0	-12.5	-7.4	-3.3	0	2.7	4.9	6.8
-1	-14.5	-9.7	-6.0	-2.9	-0.5	1.5	3.2
-2	-16.5	-12.2	-8.7	-6.0	-3.8	-2.0	-0.5
-3	-18.7	-14.7	-11.6	-9.1	-7.2	-5.6	-4.3

由表 2 可知,NPP 随年平均气温和降水量的变化而变化,当单一的气温升高或降水增加均能使 NPP 递增。当年平均气温降低 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上而降水量变幅在 $-30\%\sim 30\%$ 之间时,NPP 都将减小;当年

降水量减少 20% 以上而年平均气温变幅在 $-3\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时,NPP 也都将减小。总体而言,重庆地区“暖湿型”气候对 NPP 增加最有利,而“冷干型”气候对 NPP 增加最不利,“暖湿型”气候将使 NPP 平

均增加约 11.2%，而“冷干型”气候将使 NPP 平均减少约 12.5%。根据有关研究对未来重庆气候变化的预测^[22]，计算未来重庆 NPP 的可能变化如表 3。

表 3 重庆未来气候的预测结果及 NPP 的可能增幅
Table 3 The climatic prediction results in the future and the possible increase extent of the NPP in Chongqing

年份	气温距平/℃	降水距平	气候生产力增幅
2010	0.1~0.4	0~10%	0.3%~3.9%
2030	0.8~1.2	16%~25%	6.7%~10.0%
2050	1.6~2.0	0~9%	4.4%~8.4%

从表 3 可以看到，到 2010 年，根据预测重庆气温和降水量将有小幅升高和增加，使得 NPP 增幅为 0.3%~3.9%；到 2030 年，重庆气温和降水都将有较大幅度升高和增加，NPP 增幅达 6.7%~10.0%；到 2050 年，气温仍将继续升高，而降水增加不大，NPP 增幅为 4.4%~8.4%。分析可见，未来 50 年内重庆地区气候可能将向“暖湿型”变化，NPP 将有增加的趋势，2030 年前后将可能达到最大值。

5 小结

通过对重庆地区 1959—2001 年年平均气温及年降水量和 NPP 的分析，得出以下主要结论：

1) 重庆地区的年平均气温、总降水量及 NPP 均具有较好的分布规律。1959—2001 年，年平均气温有下降的趋势，年降水量变化的线性趋势不明显，而 NPP 略有下降的趋势，它们均具有一定的阶段性变化特征，其中 NPP 具有与年降水量变化相似的年代际变化特征。

2) 在大时间尺度(20 年)上，气温、降水量及 NPP 的变化趋势基本一致，在整个时间段上都呈下降趋势，但在较大时间尺度(10 年)和更小时间尺度(3 年)上，NPP 与降水量的变化趋势比较接近，与气温的趋势关系不明显；1959—2001 年，年平均气温 11 年周期特征最明显，而降水量和 NPP 的周期特征比较一致，均是 2 年周期最显著，年平均气温具有明显的年代际振荡特征，而 NPP 和降水量的年际变化振荡特征较明显。

3) NPP 随年平均气温和年降水量的增减而增减，当单一的气温升高和降水量增加均可使 NPP 递增。重庆地区“暖湿型”气候对 NPP 增加最有利，而“冷干型”气候对 NPP 增加最不利，“暖湿型”气候将使 NPP 平均增加约 11.2%，而“冷干型”气候将使

NPP 平均减少约 12.5%。

4) 根据气候预测推算，2010 年重庆地区 NPP 增幅可能为 0.3%~3.9%；2030 年 NPP 增幅可能达 6.7%~10.0%；到 2050 年，NPP 增幅可能为 4.4%~8.4%。未来重庆地区气温及降水量变化将有利于 NPP 的增加，2030 年前后将可能达到最大值。

参考文献

- [1] IPCC. Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panels on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] David B L, Gregory P A. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. *Science*, 2003, 299(14):1032-1033.
- [3] Reilly J, Tubieud F, Mccarl B. US agriculture and climate change: new results. *Climatic Change*, 2003, 57(1):43-49.
- [4] Pittock A B, Nix H A. The effect of change climate on Australian biomics production-A preliminary study. *Climatic Change*, 1986, 8(3):243-255.
- [5] 王石立, 王馥棠. 气候变化对黄淮海地区小麦产量可能影响的模拟实验. *气象学报*, 1993, 52(2):209-216.
- [6] 张宇, 王馥棠. 气候变暖对我国水稻生产可能影响的数值模拟. *应用气象学报*, 1995, 6(增刊):19-25.
- [7] 马树庆. 气候变化对东北区粮食产量的影响及其适应性对策. *气象学报*, 1996, 54(4):484-492.
- [8] 李长军, 刘焕彬. 山东省气候变化及其对冬小麦生产潜力的影响. *气象*, 2004, 30(8):49-53.
- [9] 周子康, 刘为纶. 从减灾和提高气候资源利用效率角度探讨浙江省的粮食生产. *自然资源*, 1997, 19(6):1-9.
- [10] 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984:491-506.
- [11] 程纯枢, 冯秀薰. 中国的气候与农业. 北京: 气象出版社, 1991:78-81.
- [12] 杨文坎, 李湘阁. 越南北方气候与气候生产力变化的研究. *南京气象学院学报*, 2003, 26(4):504-515.
- [13] 姚玉璧, 李耀辉, 王毅荣, 等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2):202-208.
- [14] 邓爱军, 陶诗言, 陈烈庭. 我国汛期降水的 EOF 分析. *大气科学*, 1989, 13(3):289-295.
- [15] North G R, Bell T, Cahalan R, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function. *Mon Wea Rev*, 1982, 110:699-706.
- [16] 刘德, 李永华, 何卷雄. 重庆市夏季气温及降水变化的小波分析. *高原气象*, 2003, 22(2):173-178.
- [17] 刘德, 李永华, 阳作明, 等. 重庆市年平均气温变化多时间尺度特征的诊断研究. *应用气象学报*, 2004, 15(2):252-256.
- [18] Zhou Xiuji, Chen Longxun, Li Weiliang, et al. Environment

- and climate change in China. *Annual Report* (1991—1995), 1996: 10-20.
- [19] Chen Longxun, Shao Yongning, Dong Min, et al. Preliminary analysis of climatic variation during the last 39 years in China. *Adv Atmos Sci*, 1991, 8:279-288.
- [20] 黄荣辉. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究. 旱涝气候研究进展. 北京:气象出版社, 1990:37-50.
- [21] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京:气象出版社, 2001:80-158.
- [22] 秦大河, 丁一汇. 中国西部环境演变评估(第二卷)——中国西部环境变化的预测. 北京:科学出版社, 2002:38-41.

Features of Annual Temperature and Precipitation Variety with the Effects on NPP in Chongqing

Li Yonghua¹⁾ Gao Yanghua¹⁾ Han Fengqing¹⁾ Xiang Ming²⁾ Tang Yunhui²⁾ He Yongkun²⁾

¹⁾ (Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147)

²⁾ (Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147)

Abstract

In terms of mean temperature and precipitation data of 34 observation stations in Chongqing from 1959 to 2001 the NPP is calculated using Leith's famous Thornthwaite Memoriae model. Based on EOF and MHF wavelet the variations of temperature, precipitation, NPP and their relations are analyzed. The effects of temperature and precipitation on NPP are discussed and the prediction results in the future and possible increase extent of the NPP in Chongqing are discovered. Results show that there are consistent distributing characters among annual temperature, precipitation and NPP in Chongqing. The variation tendency of annual temperature is descend, that of precipitation is un conspicuous, and that of NPP is descend slightly during the whole times. But they all have their own obvious staggered change features, and the variation tendency of precipitation and NPP are approximate. The variation tendency of climatic productivity strongly resembles that of rainfall in multi-time scales, but it is not consanguineous to that of temperature in less than 10 years scales. The quasi-period of temperature series is main about 10 years and those of precipitation and NPP series is main about 2 years from 1959 to 2003. The interannual oscillations of precipitation and NPP are strong, and interdecadal oscillations of temperature are strong. The increase or decrease of mean temperature or precipitation result in corresponding change of the NPP. The NPP increase by degrees while only temperature or precipitation raises. The warm-wet type climate is most advantageous for NPP but cold-dry type one is most disadvantageous. The NPP will increase 11.2% or so controlled by the former climate type but lessen 12.5% or so controlled by the latter climate type. Correlative climate prediction results show that the temperature and precipitation will both increase little and so the increase scope of the NPP in Chongqing will be 0.3%—3.9% in 2010, but 6.7%—10.0% in 2030 because the temperature and precipitation will both increase much, and 4.4%—8.4% in 2050 while the temperature will continue increase but the precipitation will increase indistinctively. In the coming 50 years the climatic variation tendency will be propitious to increase of NPP and the NPP will be top in 2030 or so.

Key words: annual temperature and precipitation change; NPP; the spatial-temporal distribution characters