

气候变化对陕南汉江流域植被净初级生产力的影响

蒋冲¹, 王飞^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 李锐^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:根据陕南汉江流域及其周边 34 个气象站 1959—2010 年的逐日气温和降水资料, 利用周广胜—张新时模型、Penman—Monteith 公式、Mann—Kendall 检验、相关分析和 Spline 插值等方法, 分析了近 52 a 水热条件的变化及其对净初级生产力(NPP)的影响, 并对 NPP 的未来变化进行预估。结果表明: 1) 汉江流域年均温为 13.7℃, 整体呈升高趋势($0.14^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$) ($p < 0.001$), 北部快于南部, 东部快于西部。多年平均降水为 747.3 mm, 整体呈减少趋势, 于 1991 年发生减少突变; 2) NPP 高值区位于大巴山区和米仓山部分地区, 秦岭山地相对较小, 表现出由南向北递减的空间格局。秦岭南麓部分地区 NPP 上升, 汉江谷地除安康外均呈下降趋势, 大巴山和米仓山一带除平利、镇坪外均呈现下降趋势。3) NPP 与降水、相对湿度和湿润指数呈极显著的正相关关系 ($p < 0.001$), 与潜在蒸散、日照时数和气温负相关, 温度对于 NPP 积累起到的作用有限, 水分是主要制约因素; 4) a 情景下 NPP 增幅 15% 以上, b 情景下增加 9% 左右, c 情景下 NPP 整体下降。

关键词: 汉江流域; 气候变化; 植被; 净初级生产力(NPP); 湿润指数

中图分类号: S771.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2013)01-0051-07

Effects of Climate Changes on Net Primary Productivity (NPP) of Vegetation in Han River Basin

JIANG Chong¹, WANG Fei^{1,2}, MU Xing-min^{1,2}, LI Rui^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the temperature and precipitation data observed by 34 meteorological stations within and around Han River Basin between 1959 and 2010, NPP values were calculated by using Zhou Guang-sheng and Zhang Xin-shi Model. The spatio-temporal variations of temperature, precipitation, humid index, NPP and their relationships were analyzed by using correlation analysis, Mann-Kendall test, and Spline spatial interpolation method. The responses of NPP to the variations of temperature and precipitation in the future were discussed. The main results were as follows. 1) Climate became warmer and drier, the trend rate of temperature was $0.14^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})^{-1}$ and the precipitation was $-16.3\text{ mm}/(10\text{ a})^{-1}$. Abrupt change could be found in 1994 and 1991 respectively. In general, the climate warming rate was larger in northern part than southern part, precipitation decreasing rate distributed unevenly in the whole basin. 2) The NPP was large in Daba Mountain and Micang Mountain, NPP in Qinling Mountains was relatively small, decreased from south to north. NPP in the southern part of Qinling Mountains increased while some part of Hanjiang Valley, Daba Mountain and Micang Mountain decreased. 3) NPP correlated positively with humid index and precipitation, while correlated negatively with potential evapotranspiration, sunshine duration and temper-

收稿日期: 2012-03-26 修回日期: 2012-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171420); 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10502-Z12-9); 中荷联合主题研究项目(中国科学院对外合作重点项目, GJHZ1018, Netherlands Organization for Scientific Research, ONDI339291)。

作者简介: 蒋冲, 男, 硕士研究生。主要研究方向: 黄土高原气候变化与生态水文。E-mail: cba8702@126.com

* 通信作者: 李锐, 男, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 区域水土保持环境效应评价。E-mail: lirui@ms.iswc.ac.cn

ature. Temperature had limited impact on accumulation of *NPP*, water was the main factor. 4) The result of prediction demonstrated that under the scenario a and b, *NPP* would increase by about 15% and 9% respectively, while decrease under the scenario c.

Key words: Han River Basin; climate change; vegetation; net primary productivity (*NPP*); humid index

植被作为陆地生态系统的主体,在地气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(*NPP*)是指单位时间、单位面积上光合作用的产物与呼吸所消耗能量的差值。它可以综合地反映植被固定 CO_2 的能力,也是估算碳储量的重要因子^[1]。研究表明,气候变暖既可以通过直接影响光合作用来改变 *NPP*,也可以通过改变土壤氮素矿化速率和土壤含水量间接影响 *NPP*^[2]。众多学者采用不同模型对全国^[3-4]和区域尺度^[5-9]上不同生态系统 *NPP* 演变进行了研究,并对其发展趋势进行了预测。汉江流域陕南段(以下简称汉江流域)位于秦岭南部,地处半湿润地区,地貌地形要素相对复杂,自然环境和气候类型各异。近半个世纪以来,本区气温、降水等气候因子发生了较为明显的变化,退耕还林(草)等生态环境建设也取得了显著成效,然而有关气候变化对植被 *NPP* 影响的研究则相对滞后。本研究旨在前人工作基础上,在研究近 52 a 汉江流域气候变化的同时,使用气候相关模型对 *NPP* 的时空变化进行模拟,为应对气候变化以及生态环境建设提供依据。

1 研究区概况

汉江流域包括陕西省的汉中市、安康市、商洛市的大部分地区和宝鸡市的太白县,总面积约为 $7.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省总面积 29.5%^[10]。流域地处北亚热带地区,北部为山地温和湿润气候区,南部为北亚热带温热湿润气候区,年降水量 1 000 mm 左右,最大降水量 1 700 mm^[10]。该地区河流纵横、水量丰沛,是我国重要的水电能源开发区和南水北调中线工程的水源地(70%的水量来源于陕南汉江和丹江流域),占陕西省水资源总量的 75%。陕南地区地貌类型多样,植被良好。北部为秦岭山脉,南部为米仓山、大巴山,中部为汉江川地。地貌类型以中低山为主兼具河谷盆地,秦岭南麓和巴山北麓山势平缓,低山、丘陵相间分布,河流阶地和河漫滩发育。区内植被的种类和疏密程度随海拔高低而不同,太白、佛坪等中山区森林覆盖率较高,最高达 55%,部分地区存在原始森林,而低山、丘陵区由于过度采伐,植被覆盖率较低^[11]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象服务共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)和陕西省气象局,前者为逐日数据,后者为逐月数据。选取汉江流域及其周边地区建站时间比较长,要素较为完备的 34 个气象站(图 1),并运用线性回归法插补估计缺测的部分数据。

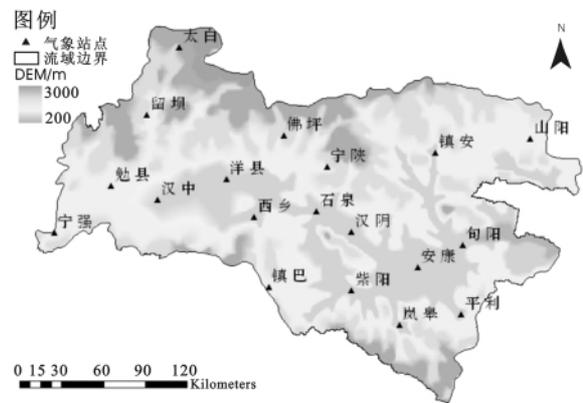


图 1 陕南汉江流域及气象测站分布图
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Han River Basin

2.2 研究方法

湿润指数为降水与潜在蒸散之比,该方法已经被证明效果较好^[12]。潜在蒸散采用世界粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算,有研究^[13]表明该公式模拟效果好,具体算法简捷^[13]。若干大气环流模式(GCM)对 CO_2 浓度倍增后中国气温和降水变化的模拟表明,未来气候最可能的情景如下,情景 a:年均温升高 2°C ,年降水增长 20%;情景 b:年均温升高 2°C ,年降水下降 20%;情景 c:年均温升高 2°C ,年降水保持不变^[14],本文以此作为未来气候变化的情景依据。植被净初级生产力采用周广胜模型^[15]估算,该模型充分考虑植物的生理生态学特点,利用全球各地的 23 组森林、草地及荒漠等植被资料及相应的气候资料建立了植被 *NPP* 估算模型,该模型已经被证明在中国特别是干旱半干旱地区具有较好的模拟效果^[15-18],具体算法如下。

$$NPP = RDI^2 \times \frac{r(1 + RDI + RD^2)}{(1 + RDI)(1 + RDI^2)} \times \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25 \times RDI}) \quad (1)$$

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

$$PER = PET/r = BT \times 58.93/r \quad (3)$$

$$BT = \sum t/365 = \sum T/12 \quad (4)$$

式中: NPP 为植被净初级生产力 ($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), RDI 为辐射干燥度; r 为年均降水量 (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 ($^{\circ}\text{C}$), 是植物营养生长的平均温度, 一般在 $0 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间; T, t 分别为月均温和日均温 ($^{\circ}\text{C}$), 两者取值范围均为 $0 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 高于 30°C 的按 30°C 计算, 低于 0°C 的按 0°C 计算。

3 结果与分析

3.1 年平均气温、降水量的时空变化

汉江流域多年平均气温为 13.7°C , 空间分布由南向北递减 (图 2a), 安康、旬阳、紫阳等汉江谷地地区年均温相对较高, 安康最高达 15.7°C 。年平均气温等值线由南向北平行递减, 到达太白县附近仅为 7.9°C 。流域内有山区林地分布的地区气温较周边地区相对较低, 如大巴山、米仓山和秦岭南麓山川林地各县。时间变化趋势上, 流域整体 1959—2010 年平均气温呈上升趋势, 气候倾向率约为每 $0.14^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。主要分为 2 个阶段, 20 世纪 50 年代末至 80 年代末呈缓慢下降趋势, 随后出现大幅增温, 最

低值为 1984 年 (13.8°C), 最高值为 2006 年 (15.7°C), 极差达 1.9°C 。1981—1993 只有 1990 年略高于多年平均水平, 而 1994—2010 年仅有 2 次低于平均气温, 可见增温趋势明显, 经 Mann-Kendall 突变检验发现气温突变年份位于 1994 年。空间分布特征上, 全流域所有站点均呈现出升温趋势, 但存在较为明显的空间差异 (图 3(a))。流域北部升温速率大于南部, 东部大于西部; 在镇安附近有一个明显的升温中心, 倾向率为每 $0.5^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 是 34 个气象站中最大的。

多年平均降水量为 747.3 mm , 等值线由南向北递减 (图 2(b)), 1100 mm 等值线穿过岚皋、紫阳、镇巴和宁强等大巴山和米仓山地, 该地区降水资源丰富, 镇巴最大 (1279.3 mm), 宁强和紫阳也分别达到 1093.7 mm 和 1078.2 mm 。流域北部秦岭山区气候相对干燥降水较少, 太白只有 736.9 mm 。时间变化趋势上, 降水量总体下降, 最大值为 1983 年 (1157.5 mm), 最小值为 1966 年 (496.0 mm), 经 Mann-Kendall 检验发现该地区降水突变年份为 1991 年。空间分布特征方面, 流域降水整体呈不显著的下降趋势 (图 3b), 大巴山、米仓山和秦岭部分地区下降较大, 汉江谷地西部也呈下降趋势, 谷地东部微弱上升, 安康附近存在一个明显的降水增多区域, 倾向率约为每 $30 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

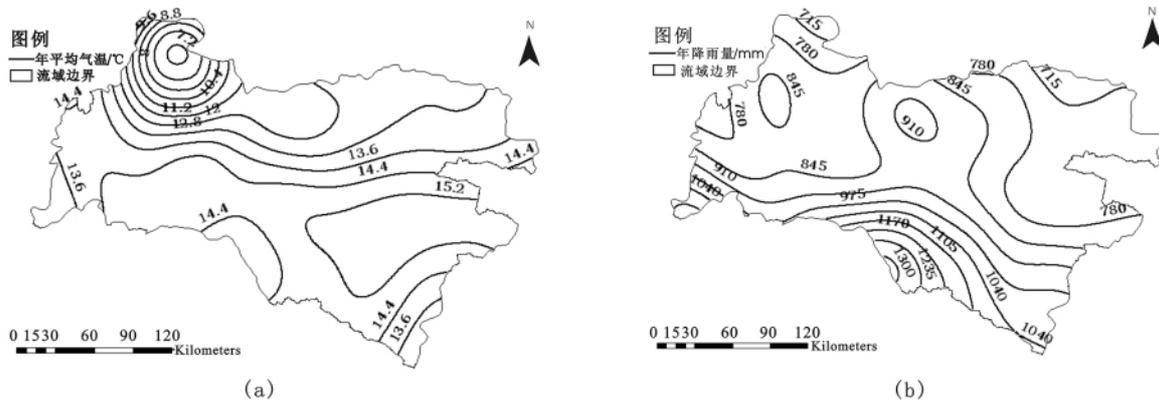


图 2 汉江流域年平均气温 (a) 和降水量 (b) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual temperature (a) and precipitation (b) in Han River Basin

3.2 NPP 时空变化特征及其影响因素

受水热条件的共同作用, NPP 表现出较为明显的区域性差异。由图 4(a) 可知, 大巴山区和米仓山部分地区由于降水相对充沛, 气候适宜, 是本区 NPP 的高值区, 变化范围介于 $10.0 \sim 11.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$; 汉江谷地 NPP 也较高, 安康达 $10.2 t \cdot \text{hm}^{-2}$; 再次是秦岭山地各县, NPP 变化范围为 $7.5 \sim 9.5 t \cdot \text{hm}^{-2}$, 太白、留坝、佛坪分别为 $6.9, 8.6, 8.7 t \cdot \text{hm}^{-2}$; 对比图 4(a) 和图 2(b) 进一步分析发现, NPP 的空间分布与

降水高度一致, 表现出的都是由南向北递减的空间格局, 高值区都位于大巴山、米仓山一带。图 4(b) 表明近 52 a 汉江地区 NPP 变化规律不甚明显, 秦岭南麓部分地区 NPP 上升, 根据上升速率大小依次排序为镇安 [$0.12 t \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$], 汉阴 [$0.03 t \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$], 宁陕 [$0.02 t \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$] 和石泉 [$0.02 t \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$], 留坝和洋县分别下降约 $0.10 t \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.09 t \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}$ 。汉江谷地除安康外 NPP 均呈下降趋势, 下降速率由大到小排

列依次为勉县 $[0.12 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 、紫阳 $[0.10 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 、汉中 $[0.04 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 和旬阳 $[0.02 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 。大巴山和米仓山一带除平利、镇坪外均呈现下降趋势,根据下降速率依

次排序为宁强 $[0.23 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 、镇巴 $[0.09 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 、西乡 $[0.06 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 和岚皋 $[0.05 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot 10 \text{ a})^{-1}]$ 。

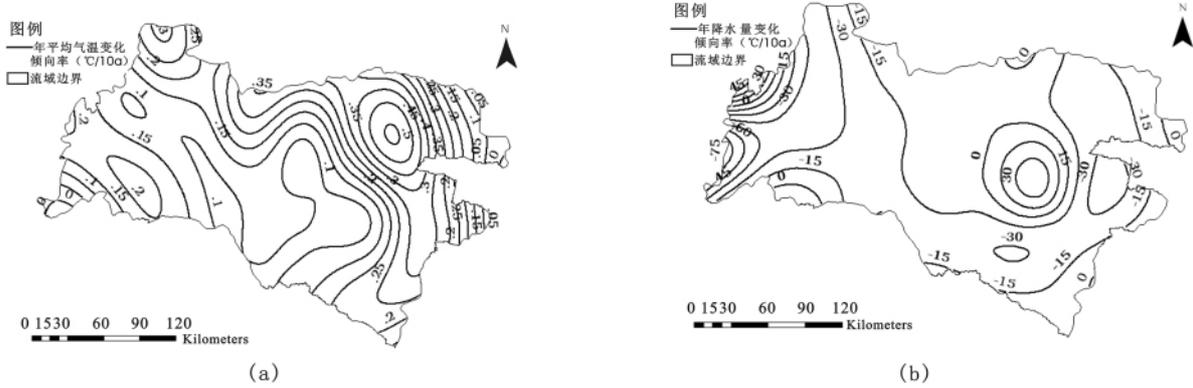


图 3 1959—2010 年汉江流域年平均气温(a)变化倾向率和年降水量(b)变化倾向率的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the change trend rate of annual temperature (a) and annual precipitation(b) in Han River Basin during 1959—2010

NPP 的高低是水热条件综合作用的结果,因此这一部分选取 9 个气象因子,采用相关分析法研究本地区 *NPP* 与各因子之间的关系(表 1)。*NPP* 与降水、相对湿度和湿润指数呈显著的正相关关系 ($p < 0.01$),*NPP* 与降水的相关系数均 > 0.873 ,而与相对湿度和湿润指数变化的关系较弱,说明降水

增加会促使 *NPP* 提高,水分是主要制约因素;*NPP* 与潜在蒸散量(*ET0*)、日照时数和气温呈负相关关系,仅个别站点达到显著水平,表明温度对于 *NPP* 积累起到的作用有限;*NPP* 与最低气温的关系最不明显,说明最低气温的升降对 *NPP* 的影响甚小。

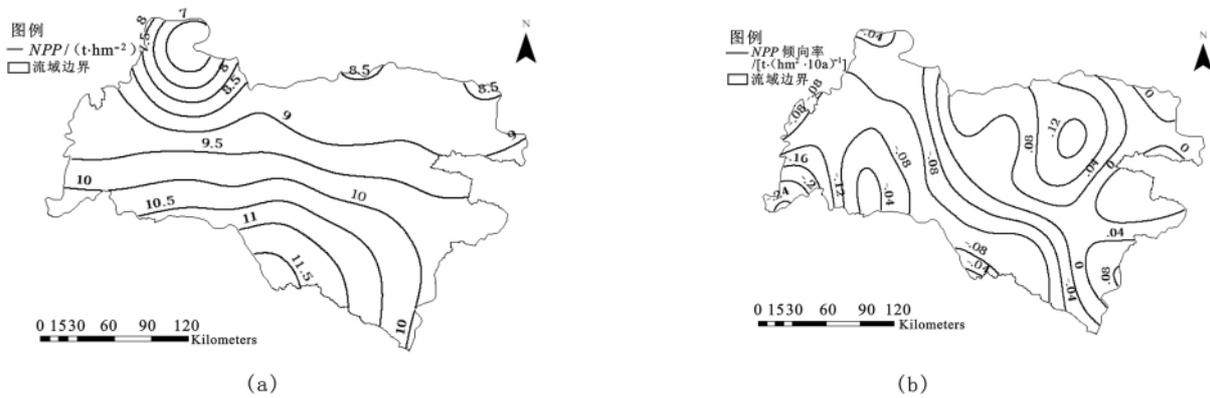


图 4 汉江流域 *NPP*(a)及其变化倾向率(b)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of *NPP* (a) and its change trend rate (b) in Han River Basin during 1959—2010

表 1 *NPP* 与气象因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between *NPP* and meteorological factors

<i>NPP</i>	日照时数	气温	最高气温	最低气温	相对湿度	降水量	风速	<i>ET0</i>	干旱指数
汉中	-0.133	-0.109	-0.259	0.181	0.367**	0.965**	-0.079	-0.272	0.912**
石泉	-0.429**	-0.305*	-0.426**	0.084	0.419**	0.977**	-0.083	-0.511**	0.930**
佛坪	-0.471**	0.138	-0.122	0.281*	0.460**	0.927**	-0.319*	-0.559**	0.921**
略阳	-0.293*	-0.102	-0.255	0.088	0.319*	0.961**	-0.220	-0.314*	0.904**
商县	-0.311*	-0.337*	-0.468**	0.083	0.643**	0.958**	-0.488**	-0.623**	0.920**
镇安	-0.383**	0.215	0.139	0.409**	0.563**	0.873**	-0.324*	-0.386**	0.817**
安康	-0.249	-0.219	-0.225	-0.012	0.297*	0.968**	-0.203	-0.341*	0.880**

注:“*”、“**”分别代表通过 0.05 和 0.01 显著性检验。

3.3 未来气候变化对 NPP 的可能影响

根据 3 种气候情景对 NPP 的未来变化进行预测,并绘制出 NPP 变率分布图(图 5)。

3.3.1 情景 a 水热条件都极大改善,NPP 普遍提高 15%以上(图 5(a))。增幅最大的区域为秦岭

山区各县,太白、留坝、佛坪和宁陕增幅分别为 21.6%、18.5%、18.2%和 17.8%,汉江谷地各县增幅约为 15%~17%,宁强增幅也达到了 17.6%,大巴山区和米仓山由于原本水热条件较好,NPP 增加潜力有限,故没有明显增长。

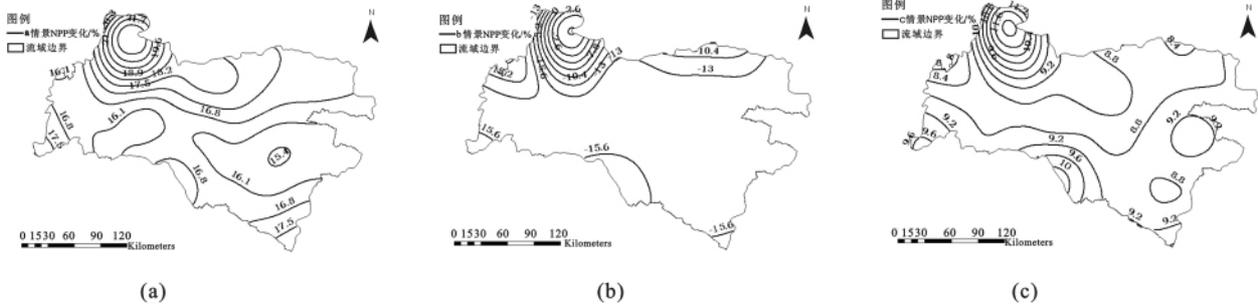


图 5 未来不同气候情景下汉江流域 NPP 变化百分率

Fig. 5 Change percentage of vegetation NPP under the different climate scenarios in Han River Basin

3.3.2 情景 b 降水条件与原来相比变差,虽然温度升高,但水分短缺制约植被 NPP 累积。流域大部 NPP 下降 14%以上,米仓山地区降幅相对较大达 15%~17%,秦岭太白地区小幅上升 1%左右(图 5(b))。

宏观分布特征来看,本研究结论与他人结果还是比较一致的^[10-11,19-21]。

3.3.3 情景 c 虽然温度升高 2℃,但降水维持不变,NPP 也呈现出增加趋势,但多数只增加 9%左右(图 5(c))。NPP 增幅较大的区域和情景 a 类似,主要包括留坝(11.4%)、镇巴(10.1%)和宁强(9.6%),大巴山和米仓山区各县增幅约为 9%~10%,汉江谷地增幅约为 8%~9%,秦岭山区增加约 8%~12%。

受气温、降水量空间分布格局的共同影响,汉江流域 NPP 表现出较为明显的区域性差异。大巴山区和米仓山部分地区是 NPP 的高值区,汉江谷地 NPP 也较高,秦岭山地相对较小,其空间分布与降水高度一致,均表现出由南向北递减的空间格局。近 52 a 秦岭南麓部分地区 NPP 上升,汉江谷地除安康外均呈下降趋势,大巴山和米仓山一带除平利、镇坪外均呈现下降趋势,与他人研究结论趋势上较为一致^[8,22]。另外,NPP 与降水、相对湿度和湿润指数呈显著正相关关系($p < 0.001$),与潜在蒸散量、日照时数、气温之间存在不显著的负相关关系。温度对于 NPP 累积所起到的作用有限,水分是主要制约因素。

4 结论与讨论

汉江流域多年平均气温为 13.7℃,空间分布由南向北递减,流域内有山区林地分布的地区气温较周边地区相对较低。时间变化趋势分为两个阶段,20 世纪 50 年代末至 80 年代末呈缓慢下降趋势,随后出现大幅增温,气温突变年份位于 1994 年。空间分布特征上,流域北部升温速率大于南部,东部大于西部,在镇安附近有一个明显的升温中心。降水量多年平均为 747.3 mm,等值线由南向北递减,流域北部秦岭山区气候相对干燥降水较少。时间变化趋势上,降水量总体下降,突变年份为 1991 年。大巴山、米仓山和秦岭部分地区下降较大,汉江谷地西部也呈下降趋势,谷地东部微弱上升。需要说明的是,相对于其他研究成果而言本研究所采用的站点较多,基本上达到县级气象站的密度,明显多于国家基本站个数,能够更加详细的揭示流域局部的气候变化特征。但也因此造成对于气温和降水分布和变化特征的描述与他人稍有出入。但从流域整体趋势和

3 种不同的气候情景对 NPP 的模拟表明,温度和降水同时上升的情况下 NPP 增幅最大,普遍提高 15%以上;仅温度升高而降水不变的情况下增加较少,多数只有 9%左右;温度上升而降水下降导致 NPP 不升反降,仅个别地区出现小幅上升。周广胜^[16]等研究表明,限制我国植被 NPP 的主要原因在于水分供应不足,与 b 情景下的模拟结果较为一致。

尽管本文取得了一些有意义的结论,但还存在一些局限。其一,站点分布还不甚均匀,插值可能对研究结果有所影响;其二是 NPP 模型没有考虑温度和降水的年内分配以及光照、土壤等其他因素对 NPP 的可影响,也没有考虑到植被在气候变化过程中其生理生态特性对气候变化的反馈作用;其三,对未来的气候变化,尤其对降水量变化的预测还存在较大不确定性;其四,本文中 NPP 是基于气候数据(主要是温度和降水)计算得到的,与实际情况是

否相符还不得而知,缺少地面实际调查资料的支撑。本文的目的是分析气候变化对 *NPP* 的影响,而 *NPP* 又是基于气候资料估算得到,对于研究结论的科学性和客观性缺少验证。因此,下一阶段的工作拟通过地面植被调查直接测定植被的 *NPP* 资料,以进一步对估算结果进行检验,进而提高模拟精度。因此,关于本地区气候变化对 *NPP* 影响的研究和预测工作还有待进一步深入。

参考文献:

- [1] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 513-517.
FANG J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(5): 513-517. (in Chinese)
- [2] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298: 2173-2176.
- [3] 何勇, 董文杰, 季劲松, 等. 基于 AVM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 345-349.
HE Y, DONG W J, JI J S, et al. The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in China by avim[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 345-349. (in Chinese)
- [4] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 等. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 1546-1553.
HOU Y Y, LIU Q H, YAN H, et al. Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in 1982-2000[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9): 1546-1553. (in Chinese)
- [5] 宋西德, 侯琳, 罗伟祥, 等. 黄土高原丘陵沟壑区小叶杨沙棘混交林研究[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(2): 15-17.
SONG X D, HOU L, LUO W X, et al. On mixture forest of *Populus simonii* and *Hippophae rhamnoides* in hilly region Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry College, 2001, 16(2): 15-17. (in Chinese)
- [6] 吴文浩, 李明阳, 卜子汇. 基于开放式数据库的江苏省植被净生产力遥感估测方法研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 146-151.
WU W H, LI M Y, BU Z H. Estimation of net primary productivity of vegetation in Jiangsu Province based on open datasets [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 146-151. (in Chinese)
- [7] 姚玉璧, 杨金虎, 王润元, 等. 1959—2008 长江源被净初级生产力对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1286-1293.
YAO Y B, YANG J H, WANG R Y, et al. Responses of net primary productivity of natural vegetation to climatic change over source regions of Yangtze River in 1959—2008[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1286-1293. (in Chinese)
- [8] 苗茜, 黄玫, 李仁强. 长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1296-1304.
MIAO X, HUANG M, LI R Q. The impacts of climate change on vegetation net primary productivity of the Yangtze River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1296-1304. (in Chinese)
- [9] 吴楠, 高吉喜, 苏德毕力格, 等. 长江上游植被净初级生产力年际变化规律及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 389-396.
WU N, GAO J X, SU D B L G, et al. Inter-annual variation trends of vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in the upper Yangtze River basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(4): 389-396. (in Chinese)
- [10] 白晶, 延军平, 苏坤慧. 1958—2007 年秦岭南北气候变化的差异性分析[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 98-105.
BAI J, YAN J P, SU K H. Differential analysis of abrupt climate change between southern and northern Qinling Mountains in the past 50 years[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2010, 38(6): 98-105. (in Chinese)
- [11] 冯彩琴, 董婕. 陕南地区近 47 年来气温、降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 122-127.
FENG C Q, DONG J. Temperature and precipitation change characteristics in south region of Shaanxi Province in recent 47 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8): 122-127. (in Chinese)
- [12] 申双和, 张方敏, 盛琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 11-15.
SHEN S H, ZHANG F M, SHENG Q. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 11-15. (in Chinese)
- [13] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United, 1998.
- [14] 郑元润, 周广胜, 张新时, 等. 中国陆地生态系统对全球变化的敏感性研究[J]. 植物学报, 1997, 39(9): 837-840.
ZHENG Y R, ZHOU G S, ZHANG X S, et al. Sensitivity of terrestrial ecosystem to global change in China[J]. Acta Botanica Sinica, 1997, 39(9): 837-840. (in Chinese)
- [15] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11-19.
ZHOU G S, ZHANG X S. Study on *NPP* of natural vegetation in China under global climate change[J]. Journal of Plant Ecology, 1996, 20(1): 11-19. (in Chinese)
- [16] 周广胜, 郑元润, 陈四清, 等. 植被净第一性生产力模型及其应用[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 2-10.
ZHOU G S, ZHENG Y R, CHEN S Q, et al. *Npp* model of natural vegetation and its application in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34(5): 2-10. (in Chinese)
- [17] 王宗明, 梁银丽. 植被净第一性生产力模型研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 104-107.
WANG Z M, LIANG Y L. Progress in vegetation *NPP* model research[J]. Agricultural Research In The Arid Areas, 2002, 20(2): 104-107. (in Chinese)

- [18] 周广胜,袁文平,周莉,等. 东北地区陆地生态系统生产力及其人口承载力分析[J]. 植物生态学报,2008,32(1):65-72.
ZHOU G S, YUAN W P, ZHOU L, *et al.* Terrestrial ecosystem productivity and carrying capacity in northeast China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 65-72. (in Chinese)
- [19] 李小燕,任志远,张翀. 陕南气温变化时空分布研究[J]. 资源科学,2012,网络提前出版.
LI X Y, REN Z Y, ZHANG C. Research on temporal and spatial distribution of temperature changes in southern shaanxi [J]. Resources Science, 2012. (in Chinese)
- [20] 赵德芳,孙虎,延军平. 陕南汉江谷地气候干旱化及其生态环境意义[J]. 西安文理学院学报,2005,8(1):5-10.
ZHAO D F, SUN H, YAN J P. Climatic aridity and its effect on ecological environment in Hanjiang Valley of southern Shaanxi[J]. Journal of Xian Educational College, 2005, 8(1): 5-10. (in Chinese)
- [21] 陈华,郭生练,郭海晋,等. 汉江流域 1951—2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(3):340-345.
CHEN H, GUO S L, GUO H J, *et al.* Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 340-345. (in Chinese)
- [22] 张永红,葛徽衍. 陕西省作物气候生产力的地理分布与变化特征[J]. 中国农业气象,2006,27(1):38-40.
ZHANG Y H, GE H Y. Geographical distribution and change characters of crop climate productivity in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(1): 38-40. (in Chinese)

(上接第 50 页)

- [8] 吴协保,但新球. 广西千家洞自然保护区珍稀濒危植物福建柏群落的研究[J]. 江西农业学报,2007,19(5):51-53.
WU X B, DAN X Q. Study on community of rare and endangered plant *Foldenia hodginsii* in Qianjiadong Nature Reserve in Guangxi Province [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(5): 51-53. (in Chinese)
- [9] 骆强,游泳. 大方福建柏保护区福建柏种群结构研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(17):7227-7228.
LUO Q, YOU Y. Study on structure of *Fokienia hodginsii* population in Dafang Nature Reserve [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2008, 36(17): 7227-7228 (in Chinese)
- [10] 陈洪举,罗雪. 金沙县冷水河自然保护区福建柏群落调查[J]. 贵州林业科技,2011,39(3):20-23.
CHEN H J, LUO X. Investigated on the community of *Fokienia hodginsii* in Lengshui River Nature Reserve of Jinsha County [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2011, 39(3): 20-23 (in Chinese)
- [11] 张磊,谢双喜. 贵州习水自然保护区森林群落主要优势种的生态位研究[J]. 林业科技,2011,36(2):12-14.
ZHANG L, XIE S X. Research of niche on main spegie of the forest community in Xishui Nature Reserve of Guizhou [J]. Forestry Science and Technology, 2011, 36(2): 12-14. (in Chinese)
- [12] 李茂,邓伦秀. 梵净山自然保护区任豆群落研究[J]. 浙江林业科技,2011,31(5):74-77.
LI M, DENG L X. Studies on *Zenia insignis* Chun community in Fanjingshan Nature Reserve [J]. Zhejiang Forestry Science and Technology, 2011, 31(5): 74-77 (in Chinese)
- [13] 李传磊,沈年华,倪伟. 紫薇群落结构与物种多样性分析[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):45-48.
LI C L, CHEN N H, NI W. Analysis on community structure and species diversity of *Lagerstroemia indica* forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 45-48. (in Chinese)
- [14] 曹旭平,薛瑶芹,赵峰,等. 黄土高原子午岭柴松林群落组成及群落结构研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):1-7.
CAO X P, XUE Y Q, ZHAO F, *et al.* Community composition and structure of *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* forest in Ziwuling Region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 2011, 26(1): 1-7. (in Chinese)
- [15] 龚弘娟,蒋桥生,莫权辉,等. 濒危物种金花猕猴桃生存群落特征及濒危原因分析[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):43-49.
GONG H J, JIANG Q S, MO Q H, *et al.* An analysis on the characteristics of community and endangered cause of endangered species *Actinidiu chrysunthu* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 43-49. (in Chinese)
- [16] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型[J]. 云南植物研究,1991(增). 1-139.
WU Z Y. The area-types of Chinese genera of seed plants [J]. Acta Botanica Yunnanica, 1991 (Supp.): 1-139. (in Chinese)
- [17] 王伯荪. 植物群落学[M]. 北京. 高等教育出版社,1987.
- [18] 王汉杰. 阔叶树叶面积测算的一种新方法[J]. 南京林学院学报,1985(3):114-120.
WANG H J. A new method for measuring leaf area of leaf tress [J]. Journal of Nanjing of Institute of Forestry, 1985 (3): 114-120. (in Chinese)
- [19] 朱祥福,林宝珠,杨学军,等. 九连山南方红豆杉群落特征分析[J]. 江西林业科技,1998(1):1-6.