

文章编号: 1003 - 7578(2013) 05 - 053 - 05

气候变化对渭河流域自然植被 净初级生产力的影响研究(II)^{*}

——渭河流域自然植被净初级生产力的研究

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 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

提 要: 利用渭河流域及其周边地区 52 个气象站 1959 ~ 2010 年的逐日气象资料, 采用周广胜 - 张新时模型、Penman - Monteith 模型、气候倾向率、相关分析和 Spline 插值等方法, 分析了近 52 年湿润指数的时空变化特征及其对 NPP(自然植被净第一性生产力)的影响, 并对未来不同的气候变化情景下 NPP 对气候变化的可能响应进行预估。结果表明: NPP 高值区位于秦岭山区、关中部分地区、子午岭、六盘山和华山地区, 总体呈下降趋势($P > 0.1$), 仅个别站点微弱上升; NPP 与降水、相对湿度和湿润指数成正相关($P < 0.001$), 与潜在蒸散量、日照时数和气温负相关, 温度对于 NPP 累积起到的作用有限, 降水是主要制约因素; 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 15% 以上, 仅温度升高而降水不变 NPP 增加 10% 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。

关键词: 渭河流域; 气候变化; 自然植被; 净初级生产力(NPP); 湿润指数

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

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)是指单位时间、单位面积上植物光合作用的产物与植物自养呼吸消耗能量的差值。它可以综合地反映植被固定大气中 CO_2 的能力, 也是估算陆地碳源和碳汇的重要因子^[1]。当前, 全球变暖已经成为世界各国学者的共识^[2-3]。事实上, 气候变暖可以通过直接影响光合作用来改变陆地生态系统的 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^[4]。各国学者也针对 NPP 对于气候变化的响应这一问题开展了广泛而深入的研究^[5-20]。国内也有很多学者采用不同的模型对过去半个世纪以来全国^[10-12]和区域尺度^[14-18]上不同生态系统 NPP 演变进行了研究, 并根据不同的未来气候变化情景对 NPP 的发展趋势进行了预测。

然而, 这些研究针对的空间尺度较大, 侧重 NPP 的估算和时空分布格局。针对小区域(流域尺度)植被 NPP 对气候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, 对于生态环境相对脆弱的热点地区关注度也不足, 对于局部地区生态环境建设和相关政策制定意义有限。近 50a 来, 渭河流域气温、降水、蒸散发等气候要素发生了较为明显的变化, 同时呈现出区域性差异, 退耕还林(草)、水源涵养工程、三北防护林建设等生态环境建设也取得了明显成效, 然而有关气候变化对渭河流域植被 NPP

* 收稿日期: 2012 - 3 - 8; 修回日期: 2012 - 3 - 31。

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于相同气候条件的人类活动对河流水沙影响定量评价 - 以黄土高原延河流域为例”(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“北方旱区表层土壤水分遥感监测试验研究”(10502 - Z12 - 9); 中荷联合主题研究项目“渭河流域水环境问题综合治理对策研究”(中国科学院对外合作重点项目 GJHZ1018, Netherlands Organization for Scientific Research, OND1339291)资助。

作者简介: 蒋冲(1987 -), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生。主要研究方向: GIS 和遥感技术在区域水土保持中的应用。
E - mail: cha8702@126.com

通讯作者: 王飞(1971 -), 男, 陕西户县人, 副研究员, 硕士生导师。主要研究方向: 水土保持环境效应评价。
Email: wangfei@ms.iswc.ac.cn

影响的研究则相对滞后。文中旨在前人工作基础上,在研究近 50a 渭河流域干湿气候时空变化的同时,用在干旱和半干旱地区应用效果较好的气候相关模型研究该地区自然植被 NPP 的时空变化特征,为应对气候变化、生态环境建设,促进社会经济的可持续稳定发展提供参考依据。

1 研究区概况

渭河流域位于东经 103.5° ~ 110.5° 和北纬 33.5° ~ 37.5° 之间,自西向东流经甘肃、宁夏、陕西三省(自治区) 13 个地区的 84 个县,干流全长 818km,流域面积 13.48 × 10⁵km²,由北洛河、泾河 2 大支流和渭河干流组成^[19]。渭河流域地处干旱地区与湿润地区的过渡地带,属大陆季风性气候,流域多年平均降水量 572mm,水面蒸发量 660mm ~ 1600mm,陆地蒸发量 500mm 左右^[20]。耕地、草地和林地所占比例分别为 28.3%、30.2% 和 29.4%^[20]。

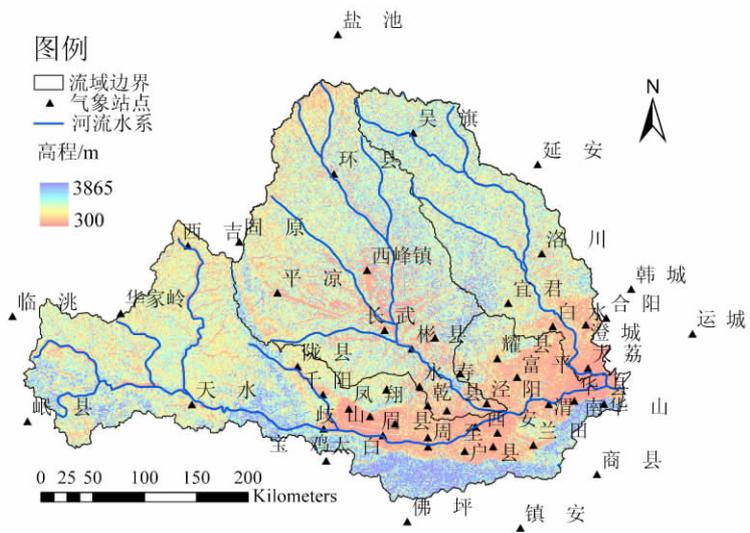


图 1 渭河流域及周边气象测站分布图
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Wei River basin

2 材料与研究方法

2.1 数据来源

研究所采用的气象数据分别来源于国家气象局气象数据共享网和陕西省气象局,前者为逐日数据,后者为逐月数据。选取渭河流域及其周边地区观测指标比较完备的 52 个气象站进行分析,空间分布(图 1)。

2.2 研究方法

湿润指数和潜在蒸散量的计算方法在前文第 I 部分已有详细说明,在此不再赘述。干湿气候划分标准采用中国气候区划及申双和^[21]的干湿指标。根据若干大气环流模式(GCM)对 CO₂ 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^[23]:情景 a: 年均温升高 2℃,年降水增长 20%;情景 b: 年均温升高 2℃,年降水下降 20%;情景 c: 年均温升高 2℃,年降水保持不变,文中将此作为未来气候变化的情景依据。自然植被初级生产力采用周广胜模型^[24]进行估算,该模型与传统的筑后模型、Miami 模型和 Thornthwaite - Memorial 模型相比兼顾植物的生理生态学特点并且联系水热平衡的实际蒸散模型,并已经被证明在广大中国地区特别是干旱半干旱地区具有较好的模拟效果^[24-27],具体方法如下。

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

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

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

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

式中: NPP 为自然植被净初级生产力(t · hm⁻² · 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(℃),是植物营养生长的平均温度,一般在 0 ~ 30℃ 之间; T_i 分别为月均温和日均温(℃),两者取值范围均为 0 ~ 30℃,高于 30℃ 的按 30℃ 计算,低于 0℃ 的按 0℃ 计算;

3 结果分析

3.1 NPP 时空变化特征及影响因素

受气温、降水量空间分布格局的共同影响,渭河流域 NPP 表现出较为明显的区域性差异。由图 2(a) 可知,秦岭山区和关中部分地区由于降水相对充沛,气候适宜,水热条件配合较好,是渭河 NPP 的高值区,变化范围介于 7.5 ~ 10.0t/hm²; 子午岭作为北洛河和泾河的分水岭, NPP 也较高; 再次是六盘山和华山地区, NPP 变化范围为 6.5 ~ 7.5 t/hm²; 图 2(b) 表明近 52a 本地区 NPP 总体呈下降趋势(P > 0.1), 仅在关

中地区西安周边的个别站点(白水、户县、礼泉、周至等)微弱上升,NPP 降低速率南部大于北部,气候倾向率高值区位于华山、华县、大荔等地区,分别为 $-0.13t/(hm^2 \cdot 10a)$ 和 $-0.12t/(hm^2 \cdot 10a)$,其它地区降幅相对较小。NPP 上升速率较大的站点依次为户县($0.08t/(hm^2 \cdot 10a)$)、西安($0.07t/(hm^2 \cdot 10a)$)和周至($0.05t/(hm^2 \cdot 10a)$)这一空间分布格局与同一时期降水和湿润指数的变化较为一致,与其他学者关于黄土高原及渭河流域部分地区的论述^[14-18]较为一致。

NPP 的大小是某一区域水热条件综合作用的结果,因此为了探究渭河流域自然植被 NPP 变化的成因,选取 9 个气象因子,其中风速代表动力因子,气温(最高、最低和平均)、日照时数代表热力因子,相对湿度、降水代表湿度因子,ET₀ 和湿润指数是综合作用的结果,采用相关分析法研究半干旱地区和半湿润地区 NPP 与气象因子之间的相关关系以及影响其变化的主导因素。从表 1 可知,各站点表现出的规律基本一致。NPP 与降水、相对湿度和湿润指数成正相关($P < 0.01$),所有站点 NPP 与降水的相关系数均大于 0.926,而与降水导致的相对湿度和湿润指数变化的相关关系则稍弱一些,这说明在半干旱和半湿润地区降水增加会促使 NPP 提高,水分是主要制约因素;另一方面,NPP 与潜在蒸散量(ET₀)、日照时数、气温之间存在负相关关系,但只有个别站点达到显著水平,这说明温度对于 NPP 累积所起到的作用有限,NPP 与最低气温的相关关系最不显著,说明最低气温的升降变化对 NPP 的影响甚小。

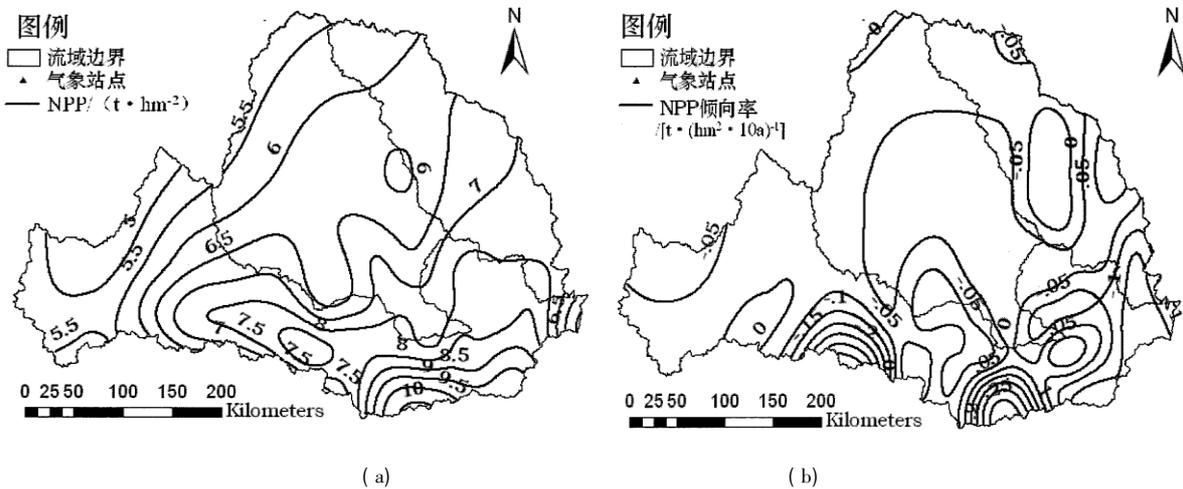


图 2 渭河流域 NPP (a) 及其变化倾向率 (b) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NPP (a) and its change trend rate (b) in Wei River basin during 1959 ~ 2010

表 1 NPP 与气象因子的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient of NPP and meteorological factors

气候区划	NPP	气温	最高气温	最低气温	降水量	风速	相对湿度	日照时数	ET ₀	湿润指数
半湿润地区	宝鸡	-0.24	-0.365*	-0.018	0.951**	-0.239	0.529**	-0.346*	-0.602**	0.913**
	华山	-0.294*	-0.272	-0.241	0.976**	-0.246	0.604**	-0.510**	-0.620**	0.943**
	崆峒	0.069	-0.096	0.252	0.934**	-0.254	0.355*	-0.180	-0.291*	0.865**
	洛川	0.085	-0.107	0.338*	0.926**	-0.084	0.482**	-0.221	-0.263	0.824**
	天水	-0.106	-0.299*	0.176	0.945**	-0.050	0.534**	-0.397**	-0.401**	0.905**
	长武	-0.106	-0.246	0.382**	0.962**	0.092	0.579**	-0.207	-0.357*	0.880**
	武功	-0.228	-0.360*	0.040	0.963**	0.000	0.383**	-0.319*	-0.420**	0.922**
	西安	0.086	-0.161	0.292*	0.928**	-0.091	0.067	-0.149	-0.250	0.831**
	西峰	0.111	-0.066	0.239	0.895**	0.001	0.389**	-0.404**	-0.248	0.797**
	西吉	0.07	-0.127	0.252	0.933**	-0.314*	0.378**	-0.229	-0.343*	0.889**
半干旱地区	吴旗	0.161	-0.160	0.469**	0.960**	-0.151	0.475**	-0.413**	-0.439**	0.916**
	环县	-0.112	-0.242	0.249	0.937**	-0.123	0.622**	-0.280*	-0.504**	0.901**

"*","**"分别代表通过 0.05 和 0.01 显著性检验。

3.2 未来气候变化对 NPP 的可能影响

未来气候变化及其环境效应问题越来越受到关注^[14-18, 23-24]。据全球环流模式和区域环流模式预估,至 2070 年前后全球温室气体浓度倍增之时,中国最可能出现 3 种气候情景^[23]。由于气候预测只是一种可能变化趋势,预测结果尚存在一定的不确定性,并且降水预测的不确定性大于气温^[2, 3]。因此,文中根据 3 种不同的气候情景对渭河流域 NPP 的可能变化进行模拟分析,并采用 Spline 插值法绘制出 3 种气候

变化情景下的 NPP 变率分布图(图 3)。

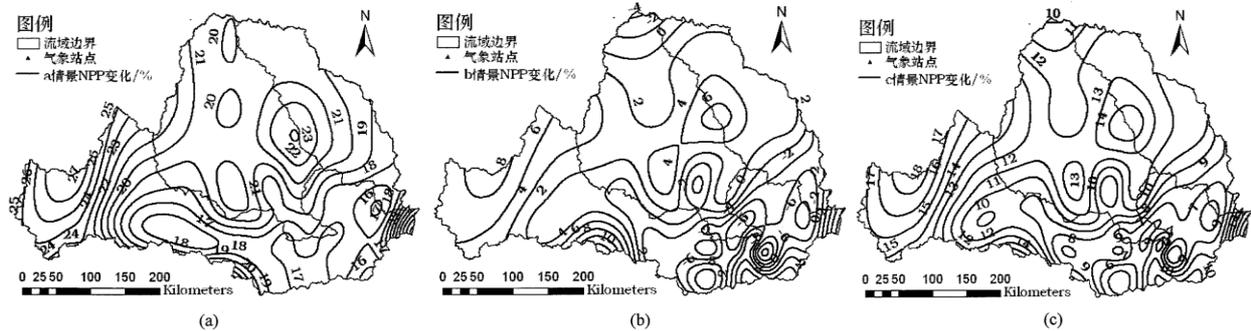


图 3 未来不同气候情景对渭河流域 NPP 的可能影响

Fig. 3 Change percentage of natural vegetation NPP under the different climate scenarios in Wei River basin

(1) 情景 a: 年均温升高 2℃, 年降水增长 20%。在这种情景下水热条件都极大改善, 流域 NPP 普遍提高 15% 以上(图 3(a))。增幅最大的区域为渭河源区和中东部子午岭林区各县, 华家岭、岷县、西吉增幅分别为 27.8%、24.4% 和 24.%, 子午岭林区各县增幅约为 19%~23%, 华山地区增幅也达到了 23%, 秦岭山区和关中地区由于原本水热条件较好, NPP 增加潜力有限, 故没有明显增长。概括来说, 原本 NPP 较低的区域增幅较大, 原本水热条件较好的区域增幅较小, 且流域原有的 NPP 分布格局并没有太大变化。周广胜等^[25]研究表明在气温增加 2℃ 或 4℃, 降水增加 20% 时, 自然植被 NPP 均有所增加, 在湿润地区增加幅度较大, 而在干旱及半干旱地区增加幅度较小, 情景 a 所表现出的规律与其一致。

(2) 情景 b: 年均温升高 2℃, 年降水下降 20%。此种情景下, 降水条件与原来相比变差, 虽然温度升高热量资源更加充足, 但水分短缺制约植被 NPP 累积。流域大部分地区 NPP 下降, 关中地区降幅相对较大达 6%~8%, 陕北(吴旗 2.8%)、陇东(环县 1.1%、平凉 2.9% 和西峰 3.3%) 和宁夏部分地区(西吉 6.2% 和固原 5.0%) 出现小幅上升。周广胜等^[25]研究表明, 限制我国自然植被 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。

(3) 情景 c: 年均温升高 2℃, 年降水保持不变。降水是制约本地区自然植被生长的关键因素, 在这种情景下, 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 10% 左右。NPP 增幅较大的区域和情景 a 类似, 主要包括华家岭(18.5%)、岷县(15.2%) 和西吉(16.0%), 子午岭林区各县增幅约为 12%~14%, 华山地区增幅也达到了 14%, 秦岭山区和关中地区增加约 6%~10%。

4 讨论与结论

(1) 渭河流域 NPP 高值区位于秦岭山区、关中部分地区、子午岭、六盘山和华山地区, 都是由东南向西北递减。NPP 总体呈下降趋势, 仅在西安周边的个别站点微弱上升。NPP 降低速率南部大于北部, 高值区位于华山、华县、大荔等地; NPP 上升速率较大的站点依次为户县、西安和周至。

(2) 另外, NPP 与降水、相对湿度和湿润指数成显著正相关, 与潜在蒸散量、日照时数、气温之间存在负相关关系, 但只有个别站点达到显著水平。在半干旱和半湿润地区降水增加会促使 NPP 提高, 水分是主要制约因素, 温度对于 NPP 累积所起到的作用有限。

(3) 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 NPP 增加较少, 多数只有 10% 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。

尽管文中研究取得了一些有意义的结论, 但还存在一些局限。其一, 该研究所选用的站点分布还不甚均匀, 关中地区采用县级气象站, 而其它区域仅为国家基准站, 这可能对研究结果有所影响; 其二是研究所使用的 NPP 模型没有考虑温度和降水的年内分配以及光照、土壤等其它因素对 NPP 的可能影响, 也没有考虑自然植被在气候变化过程中其生理生态特性对气候变化的适应性以及自然植被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^[2-3]。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.
- [2]IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) . Climate Change2001: the Science of Climate Change[R]. Cambridge University Press ,Cambridge 2001.
- [3]IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) . Climate Change2007: the Science of Climate Change[R]. Cambridge University Press ,Cambridge 2007.
- [4]Melillo J M ,Stuedler P A ,Aber J D ,Newkirk K ,Lux H ,BowlesFP ,Catalica C ,Magill A ,Ahrens T ,Morrisseau S. Soil warming and carbon - cycle feedbacks to the climate system[J]. Science ,2002 298:2173 -2176.
- [5]Scheller R M ,Mladenoff D J. A spatially interactive simulation of climate change ,harvesting ,wind ,and tree species migration and projected changes to forest composition and biomass in Northern Wisconsin ,USA[J]. Global Change Biology 2005 ,11: 307 -321.
- [6]Cao M K ,Woodward F I . Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. Nature ,1998 393:249 -252.
- [7]Cao M K ,Prince S D ,Tao B ,Small J ,Li K. Regional pattern and interannual variations in global terrestrial carbon uptake in response to changes in climate and atmospheric CO₂ [J]. Tellus B ,2005 57: 210 -217.
- [8]Vukicevic T ,Braswell B H ,Schimel D S. A diagnostic study of temperature controls on global terrestrial carbon exchange[J]. Tellus B 2001 53: 150 -170.
- [9]Melillo JM ,McGuire AD ,Kicklighter DW ,Moore Bi ,Vorosmarty CJ ,Schloss AL. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. Nature ,1993 363:234 -240.
- [10]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.
- [11]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.
- [12]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.
- [13]刘钰 ,PereiraLS ,TeixeiraJL 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报 1997 28(6): 27 -33.
- [14]张立伟 延军平 刘阳. 咸阳气候变化及其对农作物气候生产力的影响[J]. 中国农业气象 2011 32(2): 250 -254.
- [15]张国宏 王志伟 郭慕萍 等. 山西省作物气候生产力变化特征[J]. 干旱区资源与环境 2010 24(9): 84 -87.
- [16]郭晓鸽 庞奖励 史兴民 等. 关中平原近50年来气候生产力的变化及对植物影响研究[J]. 农业系统科学与综合研究 2010 26(4): 395 -400.
- [17]费晓玲 王毅荣. 甘肃气候生产力格局及演变[J]. 干旱区资源与环境 2005 25(2): 77 -81.
- [18]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[J]. 干旱地区农业研究 2005 23(2): 202 -208.
- [19]张钰娴 王飞 穆兴民. 地理环境要素与渭河流域水沙关系的定量研究[J]. 西北农林科技大学学报 2009 37(1): 61 -65.
- [20]渭河流域近期重点治理规划编制组. 渭河流域近期重点治理规划[R]. 北京: 中华人民共和国水利部 2003.
- [21]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.
- [22]Allen R G ,Pereira L S ,Raes D ,Smith M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M]. Rome ,Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nation1998.
- [23]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.
- [24]周广胜 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报 1996 20(1): 11 -19.
- [25]周广胜 郑元润 陈四清 等. 自然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.
- [26]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.
- [27]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.

Effect of climate change on net primary productivity (NPP) of natural vegetation in Wei river basin(II) . NPP of natural vegetation in Wei river basin

JIANG Chong¹ , WANG Fei^{1 2} , MU Xingmin^{1 2} , LI Rui^{1 2}

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

Abstract: Based on the daily data observed by 52 meteorological stations from 1959 to 2010 , NPP values were calculated using Zhou Guangsheng and Zhang Xinshi model , the spatiotemporal variation of humid index , NPP and their relations were analyzed using linear regression , correlation analysis and Spline spatial interpolation method. The response of NPP to the change of annual temperature and precipitation in the future was discussed. The main results were as follows: NPP was larger in Qin Mountain , Ziwu Mountain , and Hua Mountain. NPP of the whole basin was decreasing while a few stations presented a slight increasing trend. The trend rate of NPP in southern part was bigger than northern part. NPP correlated positively with humid index and precipitation , while correlated negatively with potential evapotranspiration , sunshine duration and temperature. Temperature has limited impact on accumulation of NPP , water was the main factor; ③The result of prediction demonstrated that under the scenarios of temperature increases of 2°C and precipitation increases of 20% or 0% , NPP will be increased by approximately 15% and 10% respectively. Once the annual precipitation decreased by 20% the NPP will also decrease , only a few stations show insignificant increasement.

Key words: Wei river basin; climate change; natural vegetation; net primary productivity (NPP) ; humid index