

泾河流域粮食产量与生产潜力时空分布特征及其与 MODIS-GPP 的关系

扶松林¹, 孔令颖¹, 周海香², 刘文兆^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以黄土高原泾河流域为例,利用 2001—2012 年的 MOD17A2H GPP 数据、流域范围 28 个站点气象及辐射数据,以及农业统计年鉴数据,采用 MK 趋势检验和回归分析等方法,对流域尺度 GPP、生产潜力与粮食产量的时空分布特征及相互关系进行了分析。结果表明:(1)研究时段内,泾河流域单位面积年 GPP 随时间呈增加趋势,流域平均 GPP 为 $519.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。GPP 空间格局总体上与降雨分布特征一致,自西北向东南逐渐增加,北部为 GPP 低值区,两侧山地林区和河川区为 GPP 高值区,南部的长武、正宁、旬邑、彬县一带是 GPP 次高值区。(2)泾河流域光温生产潜力在空间上整体自西向东呈增加趋势,南北向呈“马鞍形”分布,范围为 $16\,462\sim 21\,786\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;气候生产潜力在空间上自西北向东南呈增加趋势,其变化范围为 $4\,945\sim 12\,412\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;研究时段内,二者的年际变化趋势都不显著。(3)泾河流域粮食产量在空间上自西北向东南增加,2001—2012 年间单位面积粮食产量逐年增加,流域内大部分县区的作物气候生产潜力与粮食产量差值在 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上。(4)对各站点数据的统计分析表明,空间分布上泾河流域单位面积粮食产量、作物气候生产潜力及 GPP 两两之间的相关性分别达到了极显著水平;时间过程上单位面积粮食产量与 GPP 之间显著相关。单位面积粮食产量与 MODIS-GPP 时空的极显著相关性展示了通过遥感数据估算粮食产量的有效性,有助于推进区域粮食产量的预测预报。

关键词:植被初级生产力;作物气候生产潜力;粮食产量;泾河流域

中图分类号:S162.5 **文献标志码:**A

Spatial-temporal distribution characteristics of grain yield and its potential productivity in the Jing River Basin and their relationships with MODIS-GPP

FU Songlin¹, KONG Lingying¹, ZHOU Haixiang², LIU Wenzhao^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;*

2. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Based on the data from MOD17A2H GPP, 28 meteorological stations, and agricultural statistical yearbook from 2001 to 2012, and the methods of MK trend testing and regression analysis, etc., this paper analyzed the relationships among the gross primary productivity (GPP), potential productivity and actual grain yield, and their spatial-temporal distribution characteristics in the Jing River Basin. The results showed that: (1) The GPP in the Jing River Basin had an increasing trend with an average value of $519.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. The spatial pattern of GPP was generally consistent with the distribution of precipitation, and it gradually increased from the northwest to the southeast. The northern part of the basin was a low-value area of GPP, the mountainous forest lands and river valleys were high-value areas, and Changwu, Zhengning, Xunyi, and Binxian in the southern part were the secondary high-value areas. (2) Spatially, the potential productivity of light and temperature was increasing from the west to the east in the Jing River Basin, with a “saddle-shaped” distribution in the north-south direction, ranging from $16\,462\sim 21\,786\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; and the climatic potential productivity was increasing from the northwest to

the southeast with a range of 4 945~12 412 kg · hm⁻². From 2001 to 2012, there were no significant trends of interannual changes in the two potential productivity. (3) The crop grain yield in the Jing River Basin increased spatially from the northwest to the southeast, and showed an increasing trend during the study period. The differences between crop climatic potential productivity and its grain yield were above 6 000 kg · hm⁻² in most areas of the Jing River Basin. (4) The spatial correlation coefficients between the crop grain yield, the climatic potential productivity, and GPP reached very significant level ($P<0.01$), respectively; and the temporal correlation coefficient between crop grain yield and GPP reached a significant level ($P<0.05$). The very significant correlation between the crop yield and MODIS-GPP demonstrated the availability of estimating grain yield through remote sensing, which is helpful to the prediction of regional grain yield.

Keywords: gross primary productivity (GPP); climatic potential productivity of crop; grain yield; the Jing River Basin

黄土高原千沟万壑的地貌形态与水土流失综合治理长期以来为学界所关注^[1-3]。历史上造成黄土高原水土流失的一个重要原因是土地的广种薄收,因此而开展的退耕还林还草工程,成为了该区域水土保持与综合治理的主要措施,自1999年实施以来成效显著^[4-6]。退耕还林还草工程突出林草面积比例的增加,因此在有限的相对减少的耕地上不断提高作物单位面积产量具有重要意义。泾河流域是黄土高原水土流失严重地区之一,提升基本农田上的粮食产量水平是推动该区域退耕还林还草工程不断走向深入的重要保障,研究该流域的粮食产量水平、进一步增产的幅度并有效估算粮食产量意义重大。

针对区域粮食安全问题,龙鑫等^[7]考虑自然灾害风险影响,认为泾河流域农业旱灾的高风险区位于该地区北部,南部为低风险区;耿艳辉等^[8]根据泾河流域1990—2005年耕地、人口和粮食的数据动态变化情况,计算了流域内31个县(区)的耕地压力指数,表明尽管耕地面积持续减少,但随着粮食单产的不断提高,人均粮食产量表现出一定的增加趋势,维持了区域粮食安全;在地处泾河流域的长武县,张建军等^[9]也给出类似的结果。黄明斌等^[10]以黄土高原10个试区的攻关资料为基础,从区域旱作产量潜势、试区攻关水平和试区所在县的产量现状三个层次,详细剖析了黄土高原有代表的几个地区粮食现状和增产潜力。结果指出,就10个试区所代表的黄土高原水土流失区而言,粮食增产潜力很大,试验年份整体产量水平达到旱作产量潜力水平的54.2%。在遥感估产方面,冯美臣等^[11]利用遥感数据进行冬小麦不同生育时期归一化植被指数(NDVI)和产量关系的研究,利用气象数据和光谱数据构建了冬小麦光谱产量模型、气象产量模型以及光谱气象产量模型,发现利用遥感和气象数据建立

模型进行单产和总产估测是可行的,且精度较高。目前中分辨成像光谱仪生成的植被总初级生产力(MODIS GPP)数据应用广泛,利用遥感数据估算粮食产量的工作还需深入地研究。通过气候生产潜力计算及与实际产量比较,分析粮食生产进一步提升的幅度范围,对于推进区域农业生产与生态建设具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾河流域位于黄土高原中部,处于东经108°14'~108°42',北纬34°46'~37°19',流域面积45 421 km²,横跨宁夏、甘肃、陕西三个省、自治区部分地区,流域大部分属于陇东黄土高原。流域内景观大体分为北部黄土丘陵区、中部黄土塬区、西南部山地林区和东南部山地河谷区。流域内土地利用类型主要有农地、草地、果园、林地等。该流域为典型的温带大陆性气候,处于温带半湿润向半干旱气候的过渡地带,流域多年平均气温8℃,年降水量在350~600 mm之间。

1.2 数据来源

(1)本文所用气象数据为泾河流域及其周边28个气象站点2001—2012年的降水(mm)、气温(℃)等,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),泾河流域及其周边气象站点分布见图1;(2)遥感数据来源于NASA官方遥感影像MOD17A2H数据产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),该数据为8 d合成产品,空间分辨率为500 m;(3)社会经济数据来源于中国知网的中国经济社会大数据研究平台(陕西、甘肃和宁夏农业统计年鉴)。

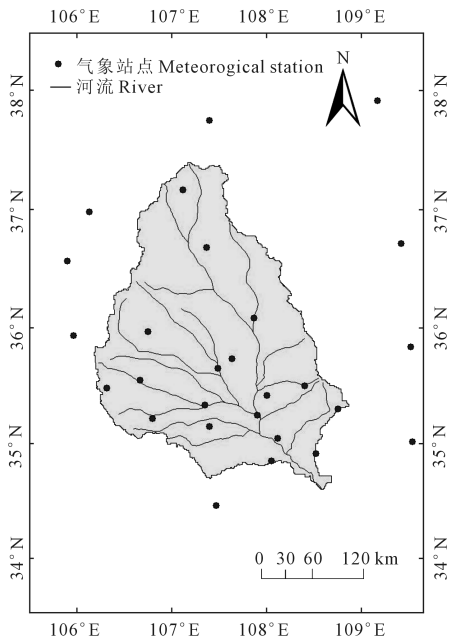


图 1 泾河流域及周边气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the Jing River Basin and its surrounding area

1.3 研究方法

1.3.1 光温生产潜力计算 考虑光能利用过程,从光、热、水资源逐级订正的角度分析作物光温生产潜力、气候生产潜力是作物生产潜力研究中的一种传统方法。本文采用陈明荣提出的光温生产潜力计算公式^[12]:

$$G_M = mQ_g(1 - \alpha)P_t(1 - R) \tag{1}$$

式中, G_M 指一定时间内单位面积的气候生产潜力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), m 为与植物覆盖度、量子转换率、干物质产热力有关的参数。 Q_g 为生理辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$), α 为植物对生理辐射的反射率, P_t 为温度 t 时的相对光合速率,计算方法为:

$$P_t = 2.8 + 0.348t + 0.532t^2 - 0.0086t^3 \tag{2}$$

R 为呼吸作用而消耗的光合产物的百分数,计算式为:

$$R = 7.825 + 1.145t \tag{3}$$

1.3.2 气候生产潜力计算 气候生产潜力的计算是在光温生产潜力的基础上,考虑降水资源对于作物需水的满足程度,采用侯光良等提出的公式^[13]:

$$G_c = G_M \cdot f(W) \tag{4}$$

$$f(W) = \begin{cases} (1 - C)R/ET_m & (1 - C)P < ET_m \\ 1 & (1 - C)P \geq ET_m \end{cases} \tag{5}$$

式中, G_c 为作物气候生产潜力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); C 为地表径流量占降水量的比例系数,考虑气候生产潜力条件下雨水的充分利用与退耕还林工程背景下泾河流域农田的水保措施水平,本文 C 取为 0; P 为自然降水量 (mm), ET_m 为作物需水量 (mm),其可用参

考作物蒸散量 ET_0 乘以作物系数得到,本文讨论的是泾河流域全年气候生产潜力,不涉及具体作物,参考已有的研究,作物系数取为 1^[14-15]。本研究利用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的计算方法来计算参考作物蒸散量,其表达式为^[15]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}\mu_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)} \tag{6}$$

式中, ET_0 为日参考作物蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物冠层表面的净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),日尺度内近似为 0; γ 为干湿表常数 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 为平均气温 ($^\circ\text{C}$); μ_2 为 2 m 高度处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压与实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压和气温曲线的斜率 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。

1.3.3 太阳辐射计算 泾河流域太阳辐射观测站很少,本文选取 FAO 推荐的计算方法^[15]:

$$S_0 = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0) \tag{7}$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi J}{365} \tag{8}$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39 \right) \tag{9}$$

$$\omega_0 = \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \tag{10}$$

$$Q = \left(a + b \frac{n}{N} \right) S_0 \tag{11}$$

式中, S_0 为天文辐射; G_{sc} 为太阳常数,取值为 $0.0820 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; d_r 为日地相对距离的倒数; J 为自 1 月 1 日起的全年各日序号; φ 为纬度; ω_0 为日出、日落时角; δ 为太阳赤纬; Q 为总辐射, $a = 0.25$, $b = 0.5$, n 为日照时数, N 为最大可能日照时数, $N = \frac{24}{\pi} \omega_0$;生理辐射 $Q_g = \varepsilon \cdot Q$, ε 为生理辐射占总辐射的比例,一般取 0.49^[13]。

1.3.4 统计方法 Mann-Kendall (MK) 检验法是一种连续的、非参数统计方法,用于确定气象和水文数据的时间序列是否具有显著变化趋势。其优势是能够避免特大值与特小值的影响,比较客观地分析数据。在 MK 趋势性检验中,若 Z 值为正,则该序列表现出上升趋势;相反地,若 Z 值为负,则该序列表现出下降趋势。当 $|Z| \geq 1.64$, $|Z| \geq 1.96$ 和 $|Z| \geq 2.58$ 时,分别表示通过了 0.1,0.05 和 0.01 显著水平的检验,本文用其检验植被总初级生产力 (GPP)、光温、气候生

产潜力及玉米产量变化趋势的显著性;Pearson 相关系数法可以检验变量间的相关性,本文使用 SPSS 软件对各变量间的相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 泾河流域 GPP 时空分布

2001—2012 年间泾河流域的平均 GPP 为 $519.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由图 2 可看出,总体上流域单位年 GPP 呈波动式上升趋势,由 $389.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升至 $658.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,年均增加 $22.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。总体上升的趋势与退耕还林还草工程的实施有很大关系。GPP 最高的 3 a 分别是 2008 年($556.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、2010 年($562.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和 2012 年($658.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),最低的 3 年分别是 2001 年($389.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、2003 年($477.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、2007 年($467.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。2005—2007 年泾河流域的降水量较低,植物水分供给量受限,影响了植被光合作用,因此 GPP 有所降低;2008—2012 年雨水较为充足, GPP 增长较快。泾河流域 GPP 季节特征明显,依据季节 GPP 单位面积值排序:冬季(12 月~次年 2 月)<秋季(9—11 月)<春季(3—5 月)<夏季(6—8 月)。泾河流域 GPP 在夏季由于降水和辐射达到峰值,植被光合作用最大,单位 GPP 也达到了峰值。

2001—2012 年流域的 GPP 空间特征见图 3。由图 3 可知,北部盐池、定边、环县一带为 GPP 低值区,GPP 范围为 $0\sim 300\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;流域两侧山地林区 and 河谷区为 GPP 高值区,其值在 $700\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上,部分地区的年单位面积 GPP 甚至达到了 $1\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上;流域中部如彭阳、庆阳、镇原、西峰一带年单位面积 GPP 范围为 $300\sim 700\text{ g}$;流域南部的长武、正宁、旬邑、彬县一带是 GPP 次高值区,其范围是 $700\sim 1\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。GPP 空间格局总体上与降雨、光热因子分布特征一致,自西北向东南逐渐增加。

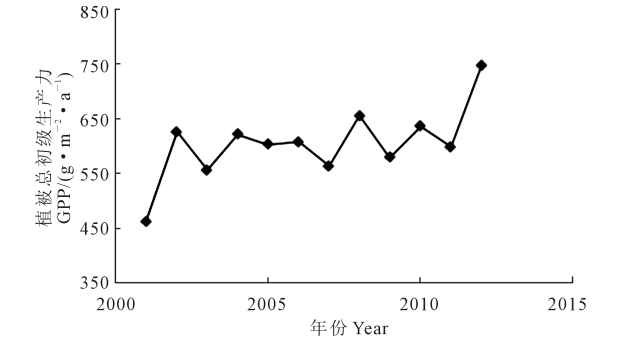


图 2 泾河流域 GPP 年际变化

Fig.2 Interannual change of GPP in the Jing River Basin

通过 MK 检验法对泾河流域内 18 个县域的 GPP 进行趋势分析,结果表明:大部分站点表现为增加趋势。旬邑 GPP 有略微降低,其年降水量在 12 a 平均处于 550 mm 左右,年平均温度变化范围为 $8.8\sim 10.1^{\circ}\text{C}$,二者变化不大, GPP 减少的原因还需做进一步分析。在 GPP 表现为增加趋势的站点中,50%站点的 Z 值大于 1.64 ($P<0.1$),这些站点主要位于泾河流域南部,其中灵台、淳化、永寿、正宁 4 个站点的 Z 值大于 1.96 ($P<0.05$)。而流域北部如麻黄山、环县等地,中部如崆峒、镇原、西峰等地的单位 GPP 也有不同程度的增加,但并未达到显著性水平。

2.2 泾河流域光温生产潜力时空分布

通过计算各气象站点历年的光温生产潜力,取平均值并空间插值得到泾河流域光温生产潜力空间分布图。由图 4 可知,泾河流域光温生产潜力在空间上整体自西向东呈增加趋势,范围为 $16\,462\sim 21\,786\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其在南北方向上又呈马鞍型,南、北二侧较高,中间较低。流域光温生产潜力较高值在庆城、彬县一带,较低值在泾源、华亭一带。通过对泾河流域光温生产潜力各气象站点的年际变化进行趋势分析,其中有减小趋势的站点占 94%,分别为麻黄山、环县、崆峒、华亭、西峰等,且其中有 25%站点的下降趋势达到了显著性水平,分别为庆城、泾川、灵台、旬邑;有增加趋势的站点只有镇原,但增加趋势未达到显著性水平。

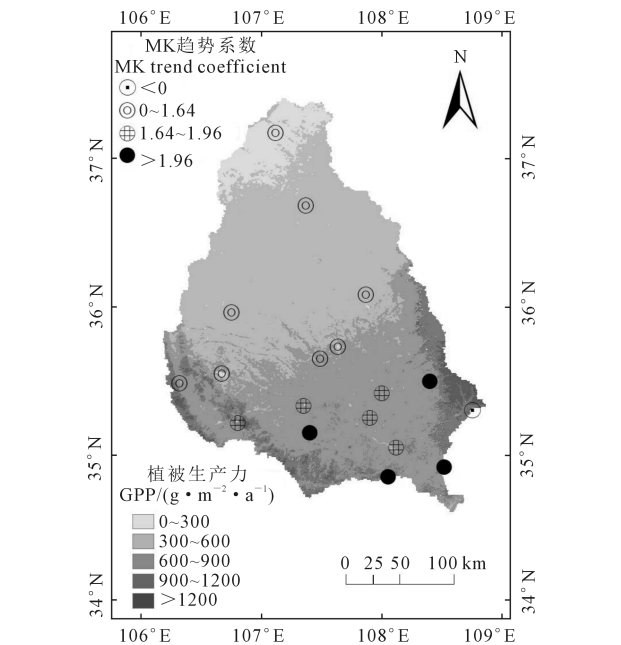


图 3 泾河流域 GPP 空间分布与年际变化趋势

Fig.3 Spatial distribution and interannual trends of GPP in the Jing River Basin

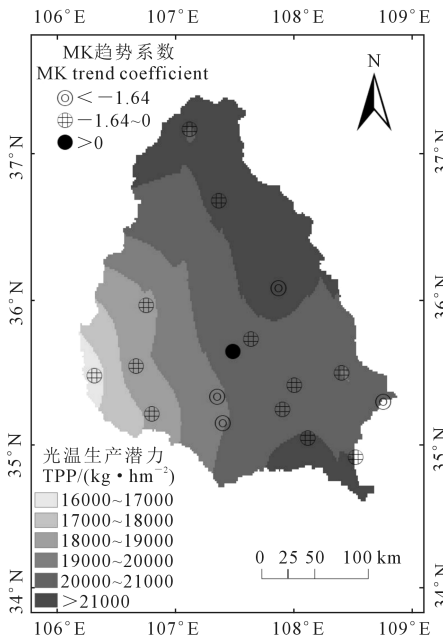


图 4 泾河流域光温生产潜力空间分布与年际变化趋势
Fig.4 Spatial distribution and interannual trends of light-temperature potential productivity in the Jing River Basin

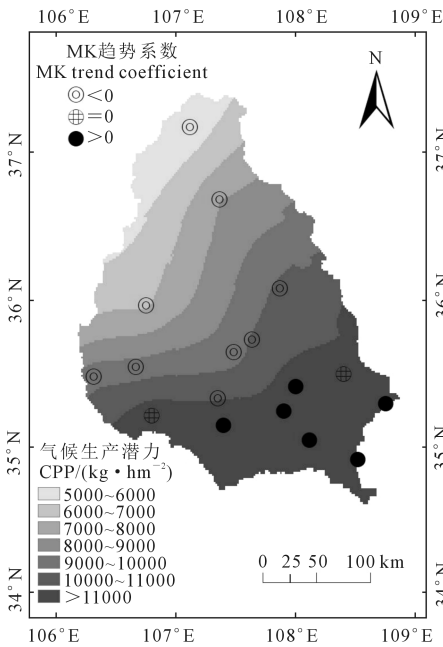


图 5 泾河流域气候生产潜力空间分布与年际变化趋势
Fig.5 Spatial distribution and interannual trends of climate potential productivity in the Jing River Basin

2.3 泾河流域作物气候生产潜力时空分布

由图 5 可知,泾河流域多年平均作物气候生产潜力在空间上自西北向东南呈增加趋势,区域差异明显,流域内作物气候生产潜力范围为 4 945~12 412 kg·hm⁻²。2001—2012 年间,流域北部麻黄山、环县一带作物气候生产潜力为 4 945~8 000 kg·hm⁻²,中部如泾源、崆峒、镇原、西峰、庆城一带作

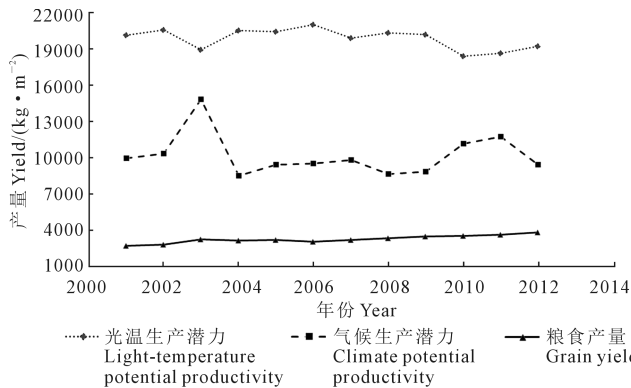


图 6 泾河流域作物生产潜力与实际产量年际变化
Fig.6 Interannual changes in crop potential productivity and actual yield in the Jing River Basin

物气候生产潜力为 8 000~11 000 kg·hm⁻²,南部如灵台、长武、彬县、永寿等地区作物气候生产潜力最大,其值分布在 11 000 kg·hm⁻²以上。12 a 间,泾河流域作物气候生产潜力呈波动变化,其中,2003 年的气候生产潜力出现最高值(14 847 kg·hm⁻²);而 2003 年的光温生产潜力在 12 a 间是一个低值(18 931 kg·hm⁻²),结合降雨数据来看,2003 年泾河流域的降水量为 770.3 mm,高于多年平均水平(535.7 mm),降水量为气候生产潜力的主要影响因素之一,因此出现了这种情况。

通过对泾河流域各气象站点作物气候生产潜力的年际变化进行趋势分析(图 6),其中有减小趋势的站点占 52.9%,这些站点大部分分布于流域的北部和西部,且趋势变化未达到显著性水平;有增加趋势的站点占 35.3%,其增加趋势也未达到显著性水平;而华亭和正宁的作物气候生产潜力在 12 a 间变化不明显。

2.4 泾河流域粮食产量时空分布

由图 7 可知,2001—2012 年间泾河流域粮食产量在空间上由北向南增加,如北部的盐池、环县一带年粮食产量为 1 452~2 000 kg·hm⁻²,流域西部的泾源、固原一带年粮食产量为 2 600~3 200 kg·hm⁻²,流域东南部正宁、彬县、旬邑、淳化的年粮食产量最高,达到了 4 000 kg·hm⁻²以上。泾河流域各县区的粮食产量大部分呈上升趋势,其中环县增加速度最快,为 222 kg·hm⁻²·a⁻¹,流域中部的泾源、崆峒、庆城增长速度也较为明显,分别以 199.5、115.5、121.5 kg·hm⁻²·a⁻¹的速度增长,流域南部的长武、永寿、彬县的增长不明显。12 a 间流域平均粮食产量呈增加趋势,且趋势明显。由图 6 可知,泾河流域粮食产量逐年增加,且通过 MK 趋势检验表明 Z 为 3.63(P<0.01),说明泾河流域粮食产量增加趋势达

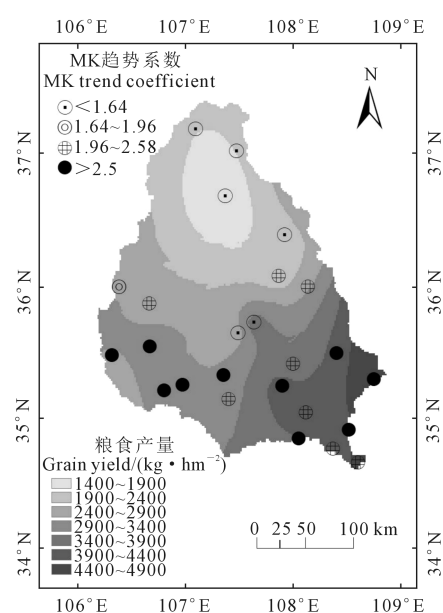


图 7 泾河流域粮食产量空间分布与年际变化趋势

Fig.7 Spatial distribution and interannual change of unit grain yield in the Jing River Basin

到了极显著水平。图 7 还展现了泾河流域各县区粮食产量的空间变化趋势。由图 7 可知,流域北部的盐池、定边、环县和中部如镇原、西峰等地虽然有增加趋势,但趋势不明显;流域西部的彭阳县,东部的庆城、合水以及东南部彬县、礼泉等地的增加趋势达到了 95% 的置信度,流域西南部的泾源、华亭、崇信等地及东南部的正宁、长武、淳化等地增加趋势达到了 99% 的置信度。从空间分布上来看,流域北部和中部部分地区的增加趋势不显著,粮食产量增加趋势显著的地区集中在降水丰富的南部。

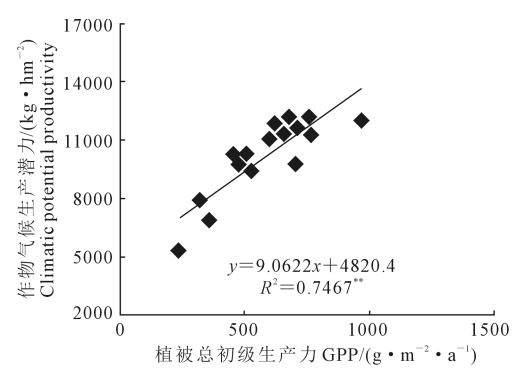
3 讨论

3.1 泾河流域作物气候生产潜力与 GPP 的关系

从图 2 与图 6 可知,GPP 与气候生产潜力时间过程趋势并不一致,图 3 与图 5 表明二者空间分布有相似性。取各站点多年平均值分析其空间相关性(图 8)显示,二者决定系数为 0.75,达极显著水平($P<0.01$)。关于气候生产潜力的研究中,以往部分学者们用迈阿密模型(Miami Model)、桑斯维特纪念模型(Thorntwaite Memorial Model)等来研究气候生产潜力^[16-17],而这些模型通常是用来计算陆地植物生产量,即植被净初级生产力(NPP)的,这本身即源于气候生产潜力与植被净初级生产力、总初级生产力间存在的密切关系的认识。

3.2 泾河流域作物增产潜力及其实现途径

逐站点比较作物气候生产潜力与单位粮食产量数据可知(表 1),流域北部气候生产潜力与单位



注: * * 表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * * means extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 8 泾河流域 GPP 与作物气候生产潜力的空间关系

Fig.8 Spatial relationship between GPP and crop climatic potential productivity in the Jing River Basin

粮食产量差值相对较低,流域中部如庆城、崆峒、泾源、西峰等地的差值约在 6 000~7 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而流域南部的差值均在 7 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,部分地区达到 8 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。这说明泾河流域粮食的增产潜力很大。从空间分布分析,各站点多年平均作物气候生产潜力与粮食产量之间的相关性达到极显著水平($P<0.01$)。

泾河流域作物生产以旱地为主。山仑等^[18]认为:黄土高原降水量低,但这并不是其粮食产量低下的主要原因,而是对降水未能加以充分利用,需采取措施解决水土流失、土面强烈蒸发、土壤深层储水利用不足等问题。王立祥等^[19]研究指出:干旱固然是黄土高原农业生产的威胁,然而地力不足乃是导致水分无谓耗损的更为直接的原因,有所侧重地培肥地力是使作物的潜在生产力充分化为现实生产力的重要途径。地膜覆盖在减少土表蒸发、增加土壤贮水量、提高春季土壤温度等方面效果显著。王喜庆等^[20]通过春玉米田间试验发现,地膜覆盖可大幅度提高粮食产量,覆膜者产量为 6 232.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,未覆膜者仅 4 240.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。钟良平等^[21]在长武的田间试验表明,同一施肥条件下地膜栽培玉米比露天栽培增产显著,大旱之年的 1997 年增产达 46.7%~52.4%,平水年份增产 28.6%。在降水与肥力因素有效调控的基础上,品种选育及改良是重要的增产途径。2010—2012 年陕西省区域试验中,吉万全等^[22]选育的小麦新品种‘西农 529’平均产量达到 7 792.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;高瑞景等^[23]育出‘陕单 008’玉米,多年平均产量为 9 640.1 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。几十年来黄土塬区主要粮食作物冬小麦和春玉米品种已经多次更新,由传统农业的旱薄型发展到旱肥型、旱肥高产型。长武塬区旱作冬小麦产量由上

表 1 泾河流域各地气候生产潜力与粮食产量/(kg·hm⁻²)

Table 1 Climatic potential productivity and grain yield in various regions of the Jing River Basin

县级行政区域 County	气候生产潜力 Climatic potential productivity/(kg·hm ⁻²)	粮食产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)	生产潜力和实际粮食产量的差值 Difference/(kg·hm ⁻²)
麻黄山 Ma huang shan	5280	2122	3158
固原 Gu yuan	6848	2478	4370
环县 Huan xian	7970	1449	6521
庆城 Qing cheng	10193	2008	8185
崆峒 Kong tong	9373	3131	6242
泾源 Jing yuan	9688	2863	6825
西峰 Xi feng	10105	3696	6409
灵台 Ling tai	12053	3185	8868
泾川 Jing chuan	10936	3035	7901
镇原 Zhen yuan	9499	2609	6890
华亭 Hua ting	11675	3133	8542
长武 Chang wu	11341	4214	7127
正宁 Zheng ning	11215	4133	7082
宁县 Ning xian	11582	3415	8167
旬邑 Xun yi	11923	4913	7010
彬县 Bin xian	12091	4078	8013
淳化 Chun hua	11695	4325	7370
永寿 Yong shou	11893	3865	8028

世纪 50 年代初的低于 1 000 kg·hm⁻² 提升到近年的 4 500 kg·hm⁻² 水平,产量水平总体呈波动上升的趋势,品种更新在其中发挥了重要作用^[24]。年际过程中大田实际产量是逐渐向气候生产潜力逼近的,以往研究已有报道气候生产潜力计算具有相对性^[25]。公式(1)中参数取值是基于已有的试验结果,而这些结果也随着农业科学试验的推进在不断发展。进一步要做的是对这些参数进行新的调整,以适应新的研究结果。近年已出现基于集约管理的小块试验田收获的产量高于表 1 中气候生产潜力数据的报道,譬如朱琳^[26]在长武应用高产高效栽培技术种植春玉米产量达 13 334~13 707 kg·hm⁻²。

概括地说,以旱农为主的泾河流域提升粮食产量的关键在于充分利用降水,提高作物对水分的利用率和利用效率,从作物利用降水资源过程的角度上通盘考虑^[27],培肥土壤要放在首要位置,主要通过肥料以及种植方式来改善土壤肥力,以肥调水;同时要因地制宜,实行作物轮作,采用有效的蓄水保墒等措施(如覆盖等)。加强作物育种是实现增产的另一重要方面,选择和推广适宜于雨养条件的旱肥型优良品种,提高良种覆盖率,发挥大面积良种的增产潜力。

3.3 GPP 与粮食产量的关系及粮食单产估算

泾河流域各县区的粮食作物主要为玉米和小麦,为探究 GPP 与粮食产量的关系,分别取各县区的玉米、小麦及其综合的粮食产量数据与 GPP 进行回归分析。做时间过程分析时,同一年份取流域各站点平均值;做空间关系分析时,同一站点取研究时段的平均值。结果表明,玉米产量与 GPP 在时间上相关性较好,达到了显著水平($P<0.05$),而空间相关性较弱。这种现象的原因之一可能是由于流域北部和中部地

区的玉米生产中有一定的灌溉条件,而 GPP 是综合结果,更多展现的是降水条件的作用。如北部盐池和定边两县的多年平均玉米产量分别为 6 192、5 178 kg·hm⁻²,其相邻的环县玉米产量为 1 906 kg·hm⁻²,而流域南部如彬县、旬邑、永寿、淳化等县的玉米单位产量均在 6 000 kg·hm⁻² 左右;小麦产量与 GPP 在时间上正相关,但相关性不显著,而空间上的相关性达极显著水平($P<0.01$);单位面积粮食产量与 GPP 在时间与空间上的相关性均好于单独分析玉米或小麦时的结果,其在时间上达显著水平($P<0.05$),在空间上达到了极显著性水平($P<0.01$)。图 9 为泾河流域各县区各年粮食产量与 GPP 的散点关系,线性回归的决定系数达 0.59($P<0.01$),这表明用年尺度 GPP 估算泾河流域单位面积粮食产量的可信度较高。在用遥感数据估算粮食产量方面,李军玲等^[28]以县为单位,对冬小麦平均单产和县域内冬小麦种植像元遥感参数的均值(NDVI、NPP、LAI)进行相关研究,遥感模型预测精度在 68.1%到 95.5%之间,平均精度为 83.9%,其精度可以满足大面积估产要求,可以对产量预报提供科学参考;孙俊英等^[29]使用 MODIS-NDVI 进行湖北省中稻单产预测,结果表明该方法基本能够满足省级系统单产估算的精度要求,可以为政府和企业决策提供支持信息。本文使用 MODIS-GPP 估算粮食单产,结果显示其在综合粮食单产估算的可行性,这有助于推进区域粮食产量的预测预报,但其精度的提高还需进一步研究。

4 结 论

本研究在 MODIS-GPP 数据的基础上,结合陈明荣生产潜力计算数据与统计年鉴上的粮食产量数

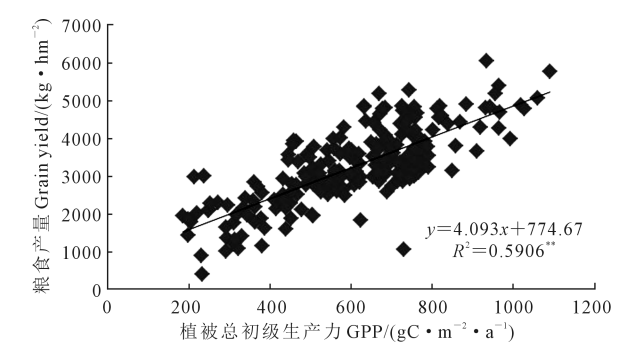


图 9 泾河流域粮食产量与 GPP 的关系

Fig.9 Relationship between crop grain yield and GPP in the Jing River Basin

据^[12],分析了泾河流域 2001—2012 年的 GPP、生产潜力以及粮食产量的时空分布及其相互之间的关系。空间上,流域内年平均 MODIS-GPP 自西北向东南逐渐增加;光温生产潜力整体自西向东呈增加趋势,东部在南北方向上又呈马鞍型分布;气候生产潜力与粮食产量在空间上自西北向东南都呈增加趋势。2001—2012 年间,流域单位面积 GPP 和粮食产量都呈波动式上升趋势,GPP 季节特征明显,而光温生产潜力和气候生产潜力没有表现出明显年际变化趋势。流域内大部分县区的作物气候生产潜力与粮食产量差值在 6 000 kg · hm⁻²以上,增产的幅度很大。年际过程中大田实际产量是逐渐向气候生产潜力逼近的,进一步的分析发现气候生产潜力计算中参数取值需要结合农业科学试验的新进展做进一步的修正。通过流域各县区的粮食产量与 GPP 的回归分析发现,GPP 与综合粮食产量相关性最好,次之是小麦单产与玉米单产。表明了用 GPP 来预测单位面积粮食产量的有效性与可靠性。

参考文献:

[1] 朱显谟,黄土高原国土整治“28 字方略”的理论与实践[J].中国科学院院刊,1998,(3):232-236.

[2] Shi H,Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 45(1):9-20.

[3] Zhou P, Wen A B, Zhang X B, et al. Soil conservation and sustainable eco-environment in the Loess Plateau of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(3):633-639.

[4] Bryan B A, Gao L, Ye Y, et al. China’s response to a national land-system sustainability emergency [J]. Nature, 2018, 559 (7713): 193-204.

[5] Zhou D C, Zhao S Q, Zhu C. The grain for green project induced land cover change in the Loess Plateau: A case study with Ansai County, Shaanxi Province, China[J]. Ecological Indicators, 2012, 23:88-94.

[6] 王辉,胥国盛,毕晓丽,等.基于 MODIS 的泾河流域植被动态年际变化[J].植物生态学报,2007,(5):850-856.

[7] 龙鑫,甄霖,邸苏闯.泾河流域农业旱灾风险综合评估研究[J].资源科学,2012,34(11):2197-2205.

[8] 耿艳辉,闵庆文,成升魁,等.泾河流域耕地-人口-粮食系统与耕地压力指数时空分布[J].农业工程学报,2008,(10):68-73.

[9] 张建军,张晓萍,郝明德,等.退耕还林(草)背景下黄土高原沟壑区长武县粮食潜力及安全分析[J].水土保持学报,2011,25(3):231-235.

[10] 黄明斌,董翠云,李玉山.黄土高原水土流失区粮食现状与增产潜力研究[J].自然资源学报,2001,(4):366-372.

[11] 冯美臣,肖璐洁,杨武德,等.基于遥感数据和气象数据的水旱地冬小麦产量估测[J].农业工程学报,2010,26(11):183-188.

[12] 陈明荣.黄土高原的气候生产潜力——兼论农业和牧业的气候界线[J].西北大学学报(自然科学版),1984,(3):98-105.

[13] 侯光良,刘允芬.我国气候生产潜力及其分区[J].自然资源,1985,(3):52-59.

[14] 孟庆香,刘国彬,常庆瑞,等.陕北黄土高原农牧交错带土地生产潜力及人口承载力[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006(12):135-141.

[15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [S]. Rome: FAO,1998.

[16] 刘扬,贾树海,那波.土地生产潜力计算方法研究[J].中国农学通报,2005(12):376-381.

[17] 姚玉璧,王毅荣,张存杰,等.黄土高原作物气候生产力对气候变化的响应[J].南京气象学院学报,2006,(1):101-106.

[18] 山仑,陈国良.黄土高原旱地农业的理论与实践[M],北京:科学出版社,1993.

[19] 王立祥,王留方,范芳强,等.西北黄土高原半干旱-半湿润地区旱作农田降水生产潜力及开发途径[J].自然资源学报,1989,(1):19-26.

[20] 王喜庆,李生秀,高亚军.地膜覆盖对旱地春玉米生理生态和产量的影响[J].作物学报,1998,(3):348-353.

[21] 钟良平,邵明安,李玉山.农田生态系统生产力演变及驱动力[J].中国农业科学,2004,37(4):510-515.

[22] 吉万全,张荣琦,陈春环,等.优质高产小麦新品种——西农 529 [J].麦类作物学报,2014,34(7):1019.

[23] 高瑞景,薛吉全,张登会.玉米新品种陕单 008 的选育及高产栽培技术[J].农业科技通讯,2013,(3):164-166.

[24] 张佳宝,孙鸿烈,陈宜瑜,等.农田生态系统过程与变化[M],北京:高等教育出版社,2019.

[25] 刘文兆,魏翔,李玉山.黄土塬区旱作玉米生产潜力的实验研究[J].应用生态学报,1997,8(2):139-142.

[26] 朱琳.旱地春玉米高产高效栽培体系植株同化产物及养分转移特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.

[27] 刘文兆.旱地作物雨水利用效率统一性表达式的构造及其意义[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2):62-66.

[28] 李军玲,郭其乐,彭记永.基于 MODIS 数据的河南省冬小麦产量遥感估算模型[J].生态环境学报,2012,21(10):1665-1669.

[29] 孙俊英,黄进良,王立辉.湖北省粮食单产遥感估算方法——以中稻为例[J].世界科技研究与发展,2009,31(5):897-900.