

# 张掖市典型绿洲农田生态系统生产力时空分布特征

师银芳<sup>1,2</sup>, 赵军<sup>1</sup>, 李传华<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省遥感重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 以甘肃省张掖市甘州区典型绿洲为例, 研究绿洲农田生产力的时空格局及其全球变化对农田生产力的影响, 为区域农业资源管理决策与规划提供决策依据。[方法] 利用 MOD17A3 NPP 产品、气象数据及甘州区农业统计等数据, 结合 GIS 空间分析技术开展研究。[结果] 甘州区不同农田类型净初级生产力(NPP)均值最小值均出现在 2001 年, 最大值出现在 2007 年。甘州区农田净初级生产力年均值变化范围为 109.3~420.5 g/(m<sup>2</sup>·a), 其分布特征与农田类型的空间分布基本一致; 同一农田类型, 高海拔区农田生产力小于海拔较低区, 即农田生产力的大小是由农田类型及海拔高度共同决定的。NPP 变化趋势存在明显的空间异质性, 农田生产力增加的面积占总面积的 40.9%, 主要是旱地和高海拔地区的水浇地。海拔 1 800 m 以上的旱地和水浇地年降水量的增加趋势远大于平均气温, 其 NPP 呈明显的增加趋势。[结论] 近 10 a 来甘州区农田生态系统生产力存在明显的时空差异, 整个旱地和水浇地年均 NPP 呈增加趋势, 水田年均 NPP 呈下降趋势。

**关键词:** 农田生态系统; NPP; MOD17A3; 时空特征; 典型绿洲

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)02-0120-06

**中图分类号:** S181, S157

**文献参数:** 师银芳, 赵军, 李传华. 张掖市典型绿洲农田生态系统生产力时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 120-125. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.017; Shi Yinfang, Zhao Jun, Li Chuanhua. Spatial-temporal Distribution Characteristics of Farmland Ecosystem Productivity of Typical Oasis in Zhangye City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 120-125. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.017

## Spatial-temporal Distribution Characteristics of Farmland Ecosystem Productivity of Typical Oasis in Zhangye City

SHI Yinfang<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, LI Chuanhua<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] Taking the typical oasis of Ganzhou District of Zhangye City, Gansu Province as an example, the temporal and spatial pattern of farmland productivity in that oasis and the effect of global change on the farmland productivity were researched, to provide decision-making basis for regional agricultural resource management and planning. [Methods] Using the data such as MOD17A3 NPP product, meteorological data and agricultural statistics data, the research was conducted by GIS spatial analysis technology. [Results] The minimum and maximum values of different types of net primary productivity(NPP) in Ganzhou District appeared in 2001 and 2007 respectively. The range of annual average farmland NPP in Ganzhou District was 109.3~420.5 g/(m<sup>2</sup>·a), and its spatial distribution was approximately consistent with the farmland. For same type of farmland, its productivity of high elevation area was less than that of low elevation. All of which indicated that the agricultural productivity was determined by both of farmland type and altitude. The NPP trend had an obvious spatial heterogeneity. Area of increased agricultural productivity covered 40.9% of the total area, among which, the mainly increased types were dry land and irrigated cropland in high altitude region. The dry land and irrigated cropland above 1 800 m had a higher increasing trend

收稿日期: 2016-06-12

修回日期: 2016-09-06

资助项目: 甘肃省遥感重点实验室基金项目“基于综合顺序分类理论的青藏高原区潜在植被 GIS 模拟的不确定性研究”; 国家自然科学基金项目“基于 GIS 的石羊河流域生态系统服务与权衡研究”(41661084)。

第一作者: 师银芳(1985—), 女(汉族), 甘肃省靖远县人, 博士, 讲师, 研究方向为环境遥感与 GIS 应用。E-mail: amandasyf@126.com。

of annual precipitation than that of average temperature, which made the NPP a significant increasing trend. [Conclusion] The ecosystem productivity of Ganzhou District from 2001 to 2010 had obvious spatial and temporal differences, the annual NPP of dry land and irrigated cropland exhibited an increasing trend, while the paddy NPP showed a decreasing trend.

**Keywords:** farmland ecosystem productivity; NPP; MOD17A3; temporal and spatial variation; typical oasis

全球气候变化是人类迄今面临的最大的环境问题,也是 21 世纪人类面临的最复杂的挑战之一。而中国政府长期以来高度重视的粮食安全及农业生产与全球变化密切相关<sup>[1-3]</sup>。因此,开展农田生态系统生产力的时空格局及特征研究,不仅有利于对农田承载力进行估算,为农田的合理利用和科学管理提供依据,而且认识农田生态系统生产力变化的主导控制因素对农业可持续发展和粮食安全对策的中长期规划具有重要的意义。农田生态系统是在人类干预和控制下形成的人工生态系统,受人类干扰最为严重,与人类日常生活联系也最为密切<sup>[4]</sup>。净初级生产力(net primary productivity, NPP)是能够以统一的尺度标准体现生态系统生产力,能够避免以作物产量衡量农田生产力时由于农业机构调整、作物品种变化等干扰,是衡量农田生态系统生产力的一个很好指标<sup>[5]</sup>。而农田生态系统净初级生产力代表着农田生态系统固定大气 CO<sub>2</sub> 的能力,是陆地生态系统碳循环的重要组成部分<sup>[6-8]</sup>。随着遥感技术的不断发展,利用遥感技术进行农田 NPP 的研究已成为一种趋势。国内很多学者利用遥感数据对农田生产力进行了研究,主要包括 3 个方面:一方面利用统计数据来研究农田 NPP,如莫宏伟等<sup>[9-11]</sup>利用农业统计数据对农牧交错区及区域尺度的农田生产力的时空格局及影响因子进行研究,表明农田存在明显的区域差异。另一方面利用遥感数据和 NPP 模型来模拟农田 NPP,如闫慧敏等<sup>[3]</sup>利用 NOAA/AVHRR 遥感数据分析了中国农田生产力变化的空间格局及地形控制的作用,表明农田生产力降低与地形起伏度密切相关;刘文超等<sup>[12]</sup>采用 GLO-PEM 模型和 VPM 模型模拟了陕北地区农田生产力,并分析了耕地变化对农田生产力的影响。第三,直接利用 NPP 产品来研究农田 NPP 的变化及其影响因素,如罗玲等<sup>[13]</sup>利用 MOD17A3 NPP 产品对松嫩平原农田生产力时空特征与影响因素进行研究,表明松嫩平原水田与旱田总体均呈微弱的下降趋势,降水是影响研究区农作物生产的主要因素;朱峰等<sup>[14]</sup>利用 MODIS NPP 产品、土地利用数据及气象数据研究了东北地区农田 NPP 的时空特征及变化规律。综上可知,借助遥感手段研究农田生态系统生产力已成为一种趋势,而利用

MODIS NPP 数据产品研究农田生产力已得到广泛应用。因此,为了更全面的了解全球变化背景下农田生态系统生产力状况,在众多学者的研究基础上,以典型绿洲甘州区为例,利用 MOD17A3 NPP 数据,结合 GIS 空间分析技术,研究绿洲农田生产力的时空格局及其全球变化对农田生产力的影响,为区域农业资源管理决策与规划提供决策依据。

## 1 研究区概况

研究区选择在甘肃省河西走廊中部的甘州区,位于东经 100°6′—100°52′,北纬 38°32′—39°24′。南依祁连山,北邻内蒙古阿拉善右旗,东连金昌,西接酒泉。东西长约 65 km,南北宽约 98 km,总面积约 4 240 km<sup>2</sup>。年平均降水量约 115 mm,蒸发量 2 047 mm,日照时数 3 085 h 左右,平均海拔约 1 474 m。甘州区属温带大陆性气候,地势平坦,土地肥沃,水源丰富,日照充足,气候温和,是典型的绿洲农业和大型灌溉农业区,主要以水浇地为主,因此,合理的水肥配合是提高产量的有效措施<sup>[15]</sup>。甘州区主要盛产小麦、玉米、豆类及各种蔬菜,是全国重点商品粮基地之一。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源及处理方法

研究数据主要包括:(1) NPP 数据 MOD17A3 影像数据,空间分辨率为 1 km×1 km,利用 MRT 对数据进行拼接、裁剪、投影等预处理;(2) 土地利用数据 张掖市 2007 年土地利用/土地覆盖数据集及土地调查资料,来源于国家自然科学基金委员会寒区旱区科学数据中心,根据其得到甘州区农田类型数据;(3) 气象数据 张掖市及周边气象站的日平均气温、降水量数据,来源于中国气象科学数据共享服务网;(4) DEM 数据 ASTER GDEM 数据,其空间分辨率为 30 m(<http://www.nasa.gov/>);(5) 农业统计数据 收集 2001—2010 年甘州区农业统计数据,来源于张掖市统计年鉴资料。

### 2.2 研究方法

(1) 甘州区农田生产力分级方法。由于各农田类型作物产量的差异,采用像元尺度的距平分析法<sup>[16-17]</sup>计算不同农田类型 NPP 的距平百分率,计算公式为:

$$D_{ij} = \frac{NPP_{ij} - \overline{NPP}}{\overline{NPP}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $D_{ij}$ ——第  $i$  行第  $j$  列的 NPP 距平百分率;  $NPP_{ij}$ ——第  $i$  行第  $j$  列的年均 NPP;  $\overline{NPP}$ ——不同种类农田平均 NPP 值。  $D_{ij}$  反映了不同农田类型 NPP 相对于平均值的偏离程度, 在一定程度上能够代表区域农田生产力的差异。

(2) 农田生产力年际变化趋势的计算。以像元为基础, 利用一元线性回归趋势线分析法模拟 2001—2010 年甘州区农田生态系统 NPP 每个栅格像元的变化趋势, 用来反映不同时期 NPP 变化趋势的空间特征。计算公式<sup>[18]</sup>为:

$$\theta = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot NPP_i - \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中:  $\theta$ ——甘州区农田 NPP 的趋势斜率;  $n$ ——监测时间段的年数;  $NPP_i$ ——第  $i$  年 NPP 的平均值。  $\theta > 0$

表示 NPP 呈增加趋势, 反之则表示 NPP 是减少的。

### 3 结果分析

#### 3.1 甘州区农田生态系统 NPP 验证

根据甘州区农业统计数据, 估算甘州区农田 NPP, 并对 NPP 模型模拟结果进行验证。根据不同农作物收获部分的含水量、收获指数、产量及播种面积, 得到甘州区农田 NPP, 其转换方法<sup>[17,19]</sup>为:

$$NPP = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \times (1 - MC_i) \times 0.45}{HI_i \times 0.9S} / \sum_{i=1}^n A_i \quad (3)$$

式中:  $Y_i$ ——第  $i$  种农作物的产量;  $MC_i$ ——第  $i$  种农作物的含水率;  $HI_i$ ——第  $i$  种农作物的收获指数;  $A_i$ ——第  $i$  种农作物的播种面积; 0.9——作物收获指数的调整系数; 0.45——将 NPP 转换为植物地上生物量的碳转换系数。参考国内外相关研究成果, 主要农作物收获指数和含水率<sup>[20-21]</sup>详见表 1。

表 1 主要农作物的收获指数和含水量

农作物	小麦	水稻	玉米	谷子	豆类	薯类	油菜	向日葵	甜菜
含水率/%	12.50	14.00	13.50	10.00	12.50	80.00	13.50	10.00	85.00
收获系数	0.370	0.445	0.490	0.382	0.250	0.500	0.255	0.310	0.400

采用上述方法, 应用 2001—2010 年甘州区农业统计数据计算得到的 NPP 与遥感估算的 NPP 进行比较, 结果如图 1 所示。由公式(3)可知, NPP 是农作物产量和面积的函数, 与作物产量成正比, 与农作物播种面积成反比。可以看出, 由统计数据估算得到的 NPP 与由遥感模型估算的农田 NPP 之间存在一定的拟合关系,  $R^2$  为 0.467。考虑到只用农田 NPP 验证, 数据较少, 为保证验证的可靠性, 分别统计水田及其他农田类型的 NPP,  $R^2$  均达到 0.36 以上, 拟合效果较好。综上表明 MODIS 遥感模型估算结果能够较准确地反映甘州区农田生产力的实际情况。

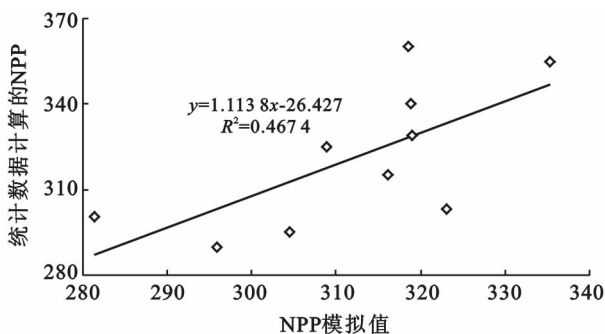


图 1 MODIS NPP 模拟值与由统计数据计算的 NPP 比较

#### 3.2 甘州区农田生态系统生产力的时间变化

根据 2001—2010 年甘州区 NPP 数据及土地利用数据, 得到不同类型农田的 NPP, 结果如图 2 所示。

甘州区农田由水田、水浇地和旱地组成, 其中水浇地面积占农田总面积的 97%; 2001—2010 年水浇地的年均 NPP 变化范围为 280.9~334.2 g/(m<sup>2</sup>·a), 10 a 平均 NPP 为 311.5 g/(m<sup>2</sup>·a); 水田和旱地面积远小于水浇地, 近 10 a 水田的年均 NPP 为 338.6 g/(m<sup>2</sup>·a), 略高于水浇地, 旱田的 NPP 变化范围为 100.7~201.0 g/(m<sup>2</sup>·a), 均小于水浇地和水田的多年 NPP 最小值。从变化趋势看, 2001—2010 年甘州区水浇地和水田 NPP 均值的各年变化步调一致, 就时间角度而言, 水浇地 NPP 呈上升趋势, 水田 NPP 有轻微的下降趋势。近 10 a 来水田 NPP 均值均大于水浇地和旱地 NPP, 不同农田类型 NPP 均值最小值均出现在 2001 年, 最大值出现在 2007 年。

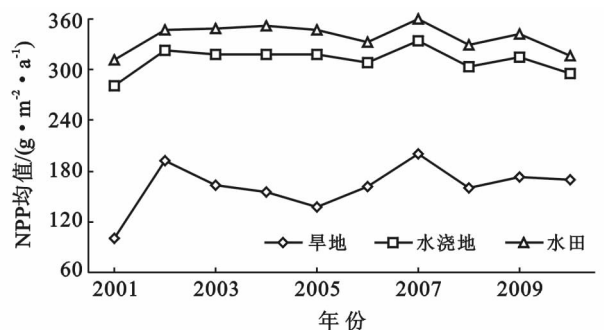


图 2 甘州区 2001—2010 年不同农田类型 NPP 均值变化

为了进一步分析各年农田生产力的变化,分别统计 2001—2010 年农田 NPP 的最大值、最小值及均值,结果如表 2 所示。从时间角度看,甘州区农田 NPP 最大值、最小值及均值变化存在明显的差异;2001—2010 年农田 NPP 最小值出现在 2005 年,其值为  $58.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;农田 NPP 最大值出现在 2004

年,其值为  $504.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2001—2010 年农田 NPP 极差变化范围为  $275.4 \sim 423.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,极差最大值出现在 2003 年,极差最小出现在 2010 年。2001 年农田 NPP 均值最小,其值为  $281.34 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,农田 NPP 均值 2007 年达到最大,为  $335.30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,这与各类型农田 NPP 均值变化一致。

表 2 典型绿洲甘州区农田 NPP 的时间变化

$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

项目	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
最小值	72.40	92.60	59.90	89.60	58.10	58.80	121.70	102.90	112.50	114.40
最大值	423.80	472.20	483.00	504.30	475.30	432.70	487.30	404.00	476.40	389.80
均值	281.34	323.00	319.03	318.47	318.85	308.87	335.30	304.52	316.17	295.80

综上分析可知,甘州区各类型农田,面积最大的为水浇地,其次为旱地;农田 NPP 总量贡献最大的为水浇地,水田次之。2001—2010 年,甘州区不同农田类型 NPP 均值的最小值均出现在 2001 年,最大值出现在 2007 年;近 10 a 来甘州区旱地和水浇地年均 NPP 呈增加趋势,水田年均 NPP 呈下降趋势。农田 NPP 极差变化范围较大,极差最大值和最小值分别出现在 2003 和 2010 年,其值分别为  $423.1, 275.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

### 3.3 甘州区农田生态系统生产力的空间变化

根据甘州区 2001—2010 年农田 NPP 数据,得到农田 NPP 均值空间分布图(图 3)。从图 3 中可知,整体而言,近 10 a 甘州区农田 NPP 年均值变化范围为  $109.3 \sim 420.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,其分布特征与农田类型的空间分布基本一致。就各农田类型而言,水浇地主要分布在海拔  $1400 \sim 1700 \text{ m}$ ,其 NPP 大于  $220 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;

少量分布在海拔  $1800 \text{ m}$  以上,其 NPP 值也相对较小;旱地集中分布在甘州区南部地区,海拔  $1800 \text{ m}$  以上,NPP 值小于  $190 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;水田主要分布在海拔  $1400 \sim 1450 \text{ m}$ ,其 NPP 值较大,大于  $300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

为了进一步分析农田 NPP 的空间分布差异,根据 2001—2010 年甘州区农田 NPP 数据,采用距平分析法,得到不同农田类型距平百分率,并根据距平百分率将农田分为 5 类:低产农田( $< -20\%$ )、较低产农田( $-20\% \sim -10\%$ )、中产农田( $-10\% \sim 10\%$ )、较高产农田( $10\% \sim 20\%$ )、高产农田( $> 20\%$ ),得到其空间分布图(图 3)。由图 3 可知,中产和较高产农田所占面积最大,分别占农田总面积的  $25\%$  和  $30\%$ ;较低产农田所占的面积最少,仅占  $0.6\%$ ;高产农田占农田总面积的  $17\%$ ,这与甘州区农田以水浇地为主要是相一致的。

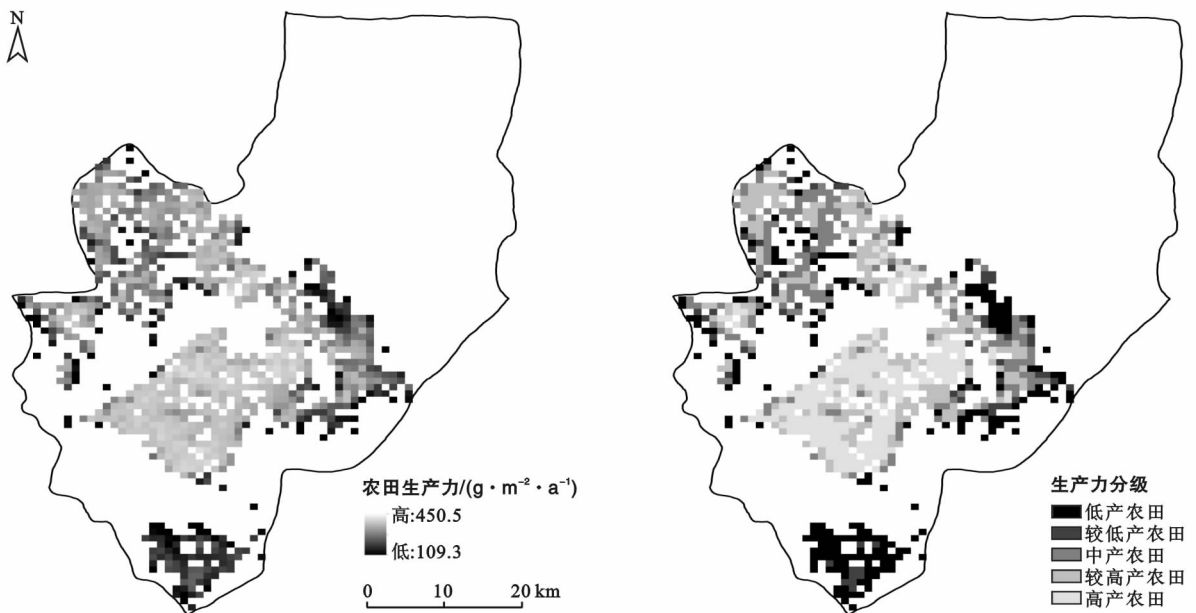


图 3 典型绿洲甘州区农田生产力空间分布及分级

综上可知,2001—2010年甘州区农田 NPP 年均值变化范围为 109.3~420.5 g/(m<sup>2</sup>·a),其分布特征与农田类型的空间分布基本一致。水田和大部分水浇地主要分布在海拔较低地区,NPP 值较大;旱地和少量水浇地分布在高海拔地区(>1 800 m),NPP 值较小,这表明农田生产力的大小是由农田类型及海拔高度共同决定的。

### 3.4 农田生产力与气候因子变化趋势分析

利用甘州区 2001—2010 年农田 NPP 数据,根据式(2)计算多年 NPP 变化趋势,得到农田生产力变化趋势空间分布图(图 4)。从图 4 中可知,从空间格局整体分布而言,农田 NPP 呈增加和减少 2 种趋势,其变化率的均值为 0.31 g/(m<sup>2</sup>·a),旱地 NPP 增加趋势较为显著。局部空间变化而言,农田生产力增加的面积占总面积的 40.9%,主要是低产和较低产农田,即旱地和高海拔地区的水浇地;NPP 呈轻微减少趋势的农田主要是较高产的水浇地,海拔位于 1 500~1 800 m。

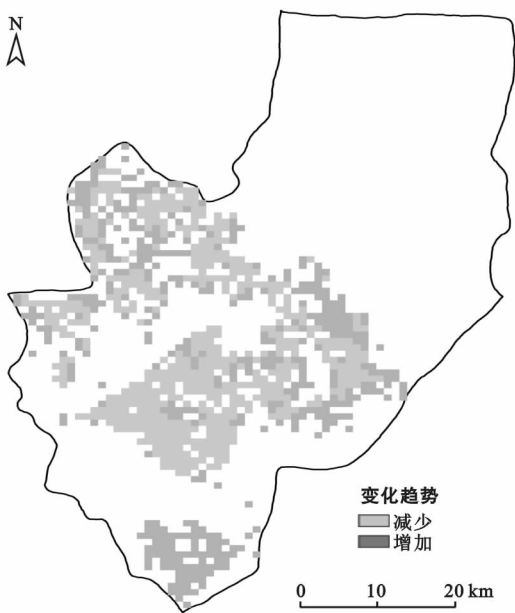


图 4 典型绿洲甘州区农田生产力变化趋势

为了进一步分析其产生的原因,根据 2001—2010 年甘州区及周边气象台站的平均气温和降水量数据,利用 IDW+DEM 插值,得到各年平均气温和年降水量栅格数据,然后计算平均气温和年降水量的空间变化趋势,并分析 NPP 变化趋势与年平均气温和年降水量变化的关系。近 10 a 年平均气温和年降水量均呈增加趋势,存在明显的空间异质性,其平均增加速率分别为 0.08 °C/a,4.85 mm/a;海拔 1 800 m 以上的旱地和水浇地年降水量的增加趋势远大于

平均气温的,即其 NPP 增加趋势显著;而中低海拔地区的水浇地年降水年平均温度和年降水量均呈显著增加趋势,但其 NPP 有降低趋势。本文只考虑这 2 个气候因子,要了解农田生产力变化趋势及其与气候的关系,应综合考虑各气候因子之间的相互作用,以及考虑其他因素如灌溉方式和施肥措施等的影响,这将有待于进一步深入探讨和研究。

## 4 讨论与结论

(1) 2001—2010 年旱地和水浇地年均 NPP 呈增加趋势,水田年均 NPP 呈下降趋势;甘州区各类型农田,面积最大的为水浇地,其次为旱地;农田 NPP 总量贡献最大的为水浇地,水田次之。

(2) 2001—2010 年,不同农田类型 NPP 均值的最小值均出现在 2001 年,最大值出现在 2007 年;农田 NPP 极差变化范围较大,极差最大值和最小值分别出现在 2003 和 2010 年,其值分别为 423.1,275.4 g/(m<sup>2</sup>·a)。

(3) 2001—2010 年甘州区农田 NPP 年均值变化范围为 109.3~420.5 g/(m<sup>2</sup>·a),其分布特征与农田类型的空间分布基本一致,农田生产力的大小是由农田类型及海拔高度共同决定的。就农田 NPP 变化趋势的空间格局而言,农田 NPP 呈增加和减少 2 种趋势,其变化率的均值为 0.31 g/(m<sup>2</sup>·a),旱地 NPP 增加趋势较为显著。

(4) 本研究仅以典型绿洲甘州区为研究区,利用 MOD17A3 NPP 数据对其农田生产力的时空变化及其与气候因素的影响进行研究,并未考虑灌溉条件、施肥措施、化肥及农膜使用量等人为能量投入对农田生产力的影响;多年农田生产力变化的主导因素是气候因素还是人为能量投入在后续研究中仍需深入探讨分析,这对绿洲农田种植结构的合理化及可持续发展具有重要意义。而借助遥感手段,准确估算像元尺度农田生产力的空间分布,对农田生态系统的碳汇、碳循环等的研究具有重要的意义,对农业整体素质和综合能力的提升具有重要意义。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 肖国举,张强,王静.全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J].应用生态学报,2007,18(8):1877-1885.
- [2] 曹明奎.气候变化挑战农业系统和食物安全[J].科学时报,2004-05-13(1).
- [3] 闫慧敏,刘纪远,曹明奎.中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用[J].地理学报,2007,62(2):171-180.
- [4] 王留芳.农业生态学[M].陕西西安:陕西科学技术出版社,1994.

- [5] 王宗明,张柏,宋开山,等. 松嫩平原作物现实生产力空间分布影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(7):85-91.
- [6] 赵其国,钱海燕. 低碳经济与农业思考[J]. 生态环境学报,2009,18(5):1609-1614.
- [7] Prince S D, Haskrjt J, Steinger M, et al. Net primary production of U. S. Midwest croplands from agricultural harvest yield data[J]. Ecological Applications, 2001, 11(4):1194-1205.
- [8] 师银芳,赵军. 张掖市农田生态系统碳源/汇时空分布特征[J]. 水土保持通报,2015,35(4):283-287.
- [9] 莫宏伟,刘礼英,任志远,等. 农牧交错区耕地净第一性生产力动态变化研究:以陕西榆林市榆阳区为例[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(1):15-20.
- [10] 苏本营,张璐,陈圣宾,等. 区域农田生态系统生产力的时空格局及其影响因子研究:以山东省为例[J]. 生态环境学报,2010,19(9):2036-2041.
- [11] 张智全,黄高宝,李广. 陇东耕地净第一性生产力与生态服务价值分析[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1516-1520.
- [12] 刘文超,颜长珍,秦元伟,等. 近 20 年陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响[J]. 自然资源学报,2013,28(9):1373-1382.
- [13] 罗玲,王宗明,宋开山,等. 2000—2006 年松嫩平原农田生产力时空特征与影响因素研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2010,26(4):468-474.
- [14] 朱峰,刘志明,王宗明,等. 东北地区农田净初级生产力时空特征及其影响因素分析[J]. 资源科学,2010,32(11):2079-2084.
- [15] 马强,宇万太,沈善敏,等. 旱地农田水肥效应研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(3):665-673.
- [16] 张树文,张养贞,李颖,等. 东北地区土地利用/覆盖时空特征分析[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [17] 国志兴,王宗明,刘殿伟,等. 基于 MOD17A3 数据集的三江平原低产农田影响因素分析[J]. 农业工程学报,2009,25(2):152-155.
- [18] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation Index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(5):1111-1117.
- [19] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in the United States agriculture, 1982-1998 [J]. Global Change Biology, 2002,8(8):722-735.
- [20] 张福春,朱志辉. 中国作物的利用指数[J]. 中国农业科学,1990,23(2):83-87.
- [21] 苏本营,张璐,陈圣宾,等. 区域农田生态系统生产力的时空格局及其影响因子研究:以山东省为例[J]. 生态环境学报,2010,19(9):2036-2041.

(上接第 119 页)

- [11] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报,2012,67(3):388-397.
- [12] 王随继,李玲,颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. 地理研究,2013,32(3):395-402.
- [13] 张调风,朱西德,王永剑,等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学,2014,36(11):2256-2262.
- [14] 王宝鉴,宋连春,张强,等. 石羊河流域水资源对气候变暖的响应及对生态环境的影响[J]. 地球科学进展,2007,22(7):730-737.
- [15] 韩永刚,王维明,杨玉盛. 闽北不同土地利用方式径流量动态变化特征[J]. 水土保持通报,2006,26(5):262-266.
- [16] 李加强,陈亚宁,李卫红,等. 天山北坡中小河川降水与径流变化特征:以精河为例[J]. 干旱区地理,2010,33(4):615-622.
- [17] 陈忠升,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化[J]. 地理学报,2011,66(1):89-98.
- [18] 邓振镛,张强,王润元,等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1267-1275.
- [19] 张晓晓,张钰,徐浩杰,等. 河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(4):66-72.
- [20] 李春梅,高素华. 我国北方干旱半干旱地区水资源演变规律及其供需状况评价[J]. 水土保持学报,2002,16(2):68-71.
- [21] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988.
- [22] Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1992,16(4):482-493.
- [23] 高诞源,叶寿征,张君友,等. 水文下垫面分析与分类初探[J]. 水文,1999,19(4):13-18.
- [24] 乌云娜,张凤杰,冉春秋. 近 50 年蒙古高原东部克鲁伦河流域气候变化分析[J]. 大连民族学院学报,2009,11(3):193-195.