

# 基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与 实际蒸散的变化关系分析

王娟, 何慧娟, 卓静, 董金芳

(陕西省农业遥感信息中心, 陕西 西安 710014)

**摘要:** [目的] 分析陕西省植被净初级生产力(NPP)及实际蒸散量(ET),为生态环境中碳循环、水循环特征提供理论支持。[方法] 基于美国航天局(NASA)提供的净初级生产力产品(MOD17 A3)及蒸散产品(MOD16)数据,利用 GIS 与数理统计等方法,对陕西省 2000—2014 年植被 NPP 与 ET 的时空分布特征及其关系进行分析。[结果] 陕西省植被 NPP 与 ET 的分布特征均为南高北低;2000—2014 年陕西省植被 NPP 在波动中呈现上升趋势,其中陕北地区增加最大,陕南地区增加最不显著;陕西省 ET 年际变化呈波动状态。植被 NPP 与 ET 空间相关性较显著,陕北地区相关系数极高,而陕南地区相关性并不显著。[结论] 在较为干旱区域植被 NPP 与 ET 的关系更为密切。

**关键词:** 植被 NPP; ET; MODIS 数据; 空间特征; 陕西省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)03-0264-06

**中图分类号:** P426.2

**文献参数:** 王娟, 何慧娟, 卓静, 等. 基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 264-269. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.045; Wang Juan, He Huijuan, Zhuo Jing, et al. Analysis on relationship between net primary productivity and evapotranspiration based on MODIS data in Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 264-269. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.045

## Analysis on Relationship Between Net Primary Productivity and Evapotranspiration Based on MODIS Data in Shaanxi Province

WANG Juan, HE Huijuan, ZHUO Jing, DONG Jinfang

(Remote Sensing Information Center for Agriculture in Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

**Abstract:** [Objective] Analyzing the vegetation net primary productivity(NPP) and the actual evapotranspiration(ET) in Shaanxi Province, to provide theoretical support with regard to carbon cycle, water cycle characteristics of ecological environment. [Methods] Based on data of the NASA products of net primary productivity(MOD17 A3) and evapotranspiration(MOD16), the spatial and temporal variation characteristics and relationships between NPP and ET in 2000—2014 of Shaanxi Province were analyzed by using the methods of GIS and mathematical statistics. [Results] The vegetation NPP and ET both showed a spatial distribution characteristics by gradually decreasing from the south to the north. In 2000—2014, interannual variability of Shaanxi vegetation NPP presented an increasing trend. The most significant increased region was Shanbei, the second was Guanzhong, and the lowest region was Southern Shaanxi; interannual variability of ET was not significant, and showed a trend of fluctuations. Spatial correlation between NPP and ET was significant for overall province, but regional difference existed; correlation coefficient in Shanbei region was highly significant, whereas in the southern Shaanxi region, it was not significant. [Conclusion] The vegetation NPP had closer relations with ET in arid area.

**Keywords:** NPP(net primary productivity); ET(evapotranspiration); MODIS; spatial distribution; Shaanxi Province

近年来,全球气候变暖所带来的环境问题已成为生态学领域研究的热点问题,碳循环及水循环是生态系统中重要的组成部分。植被净初级生产力(NPP)是指植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质总量<sup>[1]</sup>。植被 NPP 不仅是全球碳循环过程中的重要环节,而且是估算和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标<sup>[2]</sup>。开展植被 NPP 监测可对植被生长情况及其对碳循环过程的影响进行预测<sup>[3]</sup>。传统的 NPP 估算方法分为定位观测与不同尺度的模拟估算,但应用定位观测的方法,无法实现区域或全球大尺度的 NPP 测算,因此利用模型估算 NPP 成为了一种重要而被广泛应用的方法<sup>[4]</sup>。国内外学者在不同领域建立了侧重点不同的估算模型(气候关联模型、生态遥感耦合模型等)<sup>[5]</sup>,美国航天局(NASA)提供的 MOD17 A3 数据产品是通过 BIOME-BGC 模型计算出来的全球陆地净初级生产力年际变化产品<sup>[6]</sup>。此产品广泛应用于植被生长状况、植被生物量的估算及生态环境监测等研究中,国内外学者应用 MOD17 A3 产品进行不同尺度的 NPP 时空变化特征的研究得到了全球范围内得到验证<sup>[7-10]</sup>,中国学者应用 MOD17 A3 产品对东北地区、中原地区及南方部分地区进行了植被 NPP 时空分布特征分析,并验证了其可靠性<sup>[11-13]</sup>。

蒸散(Evapotranspiration, ET)是植被及地面向大气输送的水汽总通量<sup>[14]</sup>,包括地表蒸发量和植物蒸腾量两部分,是下垫面向大气水汽输送的重要途径<sup>[15]</sup>,对 ET 过程的研究可了解陆面过程的能量平衡和水分循环,尤其在干旱地区 90%的降水返回大气的途径是蒸散。它对维持地表水分循环和能量平衡起着至关重要的作用,并对全球气候变化和生态系统中水循环具有重要的研究意义<sup>[16]</sup>。传统的蒸散计算方法大多是基于气象站点观测同时利用一些蒸散公式估算蒸散量<sup>[17-18]</sup>,但由于许多区域观测站点分布不均衡且数量较少,因此估算出整个区域的实际蒸散特征并不能完全反映该区域的实际情况。近年来,随着遥感技术的飞速发展,应用遥感数据对蒸散进行反演已成为主要的方法。美国航天局(NASA)提供的 MOD16 应用 Penman-Monteith 公式反演的全球蒸散数据产品,被广泛应用于各项研究中<sup>[19-20]</sup>。

本文以 MOD 17 A3 及 MOD 16 数据产品为基础,应用 GIS 空间分析方法,研究陕西省植被 NPP 与 ET 的时空分布特征,并进一步分析植被 NPP 与 ET 之间的关系,为该地区退耕还林还草工程效果及评价提供科学依据。

## 1 研究区概况

陕西省位于西北地区东部,地理坐标为 105°29′—111°15′E,31°42′—39°35′N,南北向长约 880 km,东西宽约 160~490 km;地势中部低,南北高,海拔在 500~2 000 m,年平均降水量 576.9 mm,年平均气温 13.0 ℃,无霜期 218 d 左右,全省自北向南依次分布着温带草原、森林草原、暖温带落叶阔叶林和北亚热带常绿阔叶林,陕南地区植被生长茂盛,陕北地区植被覆盖较差,全省平均森林覆盖率 41.4%。陕西省是中国水土流失、沙化等环境问题最严峻的地区之一,水土流失面积占全省土地总面积的 66.9%<sup>[7]</sup>,植被生长状况变差、植被覆盖度下降是导致陕西省黄土高原水土流失的主要原因<sup>[5]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

本研究所用的植被 NPP 数据 MOD17 A3 为美国蒙大拿大学反演的 2000—2014 年的年 NPP 数据(<http://ntsg.umt.edu/>),空间分辨率 1 km×1 km。

MOD17 A3 的质量控制数据(NPP\_QC)应用 8 位二进制数来描述,其中包括了 MOD\_LAND, Sensor, DeadDetector, CloudState 和 SCF\_QC 五类。其中 SCF\_QC 的前 3 位表现模型算法反演质量:000 是反演结果最好;001 是反演结果良好;010 是模型反演失败;100 所显示的像元区域为城市、水体及荒漠等类型导致 NPP 无法估算。以上 4 个级别换算成 10 进制分别对应 NPP\_QC 数据的像元值:0, 32, 64 及 128。MOD16 蒸散数据集主要使用 2000—2014 年 MODIS 传感器遥感反演数据(下载地址同上),蒸散数据产品有两种:一种是蒸散(ET),即实际陆面蒸散量;另一种是潜在蒸散(Potential ET, PET)<sup>[15]</sup>,本文为了与 NPP 数据时间尺度保持一致,使用实际陆面蒸散量(ET)年值,空间分辨率 1 km×1 km。

MOD16 数据检验方法利用何慧娟等<sup>[15]</sup>应用气象站点蒸发皿观测数据与 PET 数据的相关性检验来验证 MOD16 蒸散数据的精度。对 NPP 及 ET 数据预处理流程为:利用 MRT 工具进行数据镶嵌及投影转化,并对处理过的数据进行区域裁剪。

### 2.2 研究方法

2.2.1 年际变化计算 应用一元线性回归分析法对陕西省 NPP 及 ET 进行时间趋势分析,其计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (1)$$

式中: $\beta$ ——线性倾向率; $n$ ——监测时间段的年数; $x_i$ ——第  $i$  年的植被 NPP 或 ET; $\bar{x}$ ——NPP 或 ET 多年平均值; $t_i$ ——第  $i$  年; $\bar{t}$ ——年份的平均值。

利用 NPP 或 ET 序列和时间序列的相关关系判断 NPP 或 ET 年际变化的显著性, $\beta$  值大小反映了 NPP 或 ET 年际变化的增加或降低, $\beta$  为正表示 NPP 或 ET 上升,反之则表示下降。此方法采用相关系数的检验方法进行显著性检验。

2.2.2 相关性计算 采用逐像元空间分析法,分析 NPP 与 ET 之间的相关系数,本文使用 Pearson 系数法,公式为<sup>[21]</sup>:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: $R_{xy}$ —— $x, y$  两变量的相关系数; $x_i$ ——第  $i$  年 NPP; $y_i$ ——第  $i$  年的 ET; $\bar{x}$ ——NPP 多年平均值; $\bar{y}$ ——ET 多年平均值; $n$ ——监测年份。

以上方法应用显著性检验结果分为如下等级:极显著( $p \leq 0.01$ ),很显著( $p \leq 0.05$ ),显著( $p \leq 0.1$ )。

### 3 结果与分析

#### 3.1 NPP 数据质量分析

应用 2000—2014 年 NPP\_QC 数据,分别以  $0 \leq \text{NPP\_QC} < 32$  为反演结果最好,  $32 \leq \text{NPP\_QC} < 64$  为反演结果良好,  $64 \leq \text{NPP\_QC} < 128$  为反演失败,

以及不能反演区域  $\text{NPP\_QC} > 128$ 。通过逐年统计,2000—2014 年 NPP 反演的可信度在良好以上的均达到 98% 以上,反演可信度较好,反演结果可以应用。

#### 3.2 MOD16 数据检验

MOD16 数据检验方法利用何慧娟等<sup>[15]</sup>应用气象站点蒸发皿观测数据与 PET 数据的相关性检验来验证 MOD16 蒸散数据的精度,结果表明利用气象站点观测数据与 MOD16 PET 数据进行相关分析时间相关系数与空间相关系数均通过了置信度为 0.001 的检验,说明 MOD 16 数据产品可应用于陕西地区 ET 与 PET 的时空分析及研究。

#### 3.3 2000—2014 年陕西省植被 NPP 时空分布特征

陕西省植被 NPP 空间分布如图 1a 所示,陕西省地形呈南北长东西窄分布,南北横跨近 10 个纬度,因此植被 NPP 空间分布有明显特征。全省 NPP 变化呈现由南向北递减的趋势,陕北地区主要由黄土高原丘陵沟壑区及长城沿线风沙区组成,该区域植被 NPP 均值最低,尤其是陕北北部长城沿线风沙区,年均 NPP(以 C 计)范围为  $0 \sim 100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;关中地区地形平坦,主要以农田为主要植被类型,植被 NPP 均值次之,尤其关中东部地区主要为旱作农业区,NPP 均值较关中其他地区低,西安、咸阳等城市周边植被覆盖极低,因此 NPP 均值最低;陕南主要以林地为主,植被 NPP 均值最高。

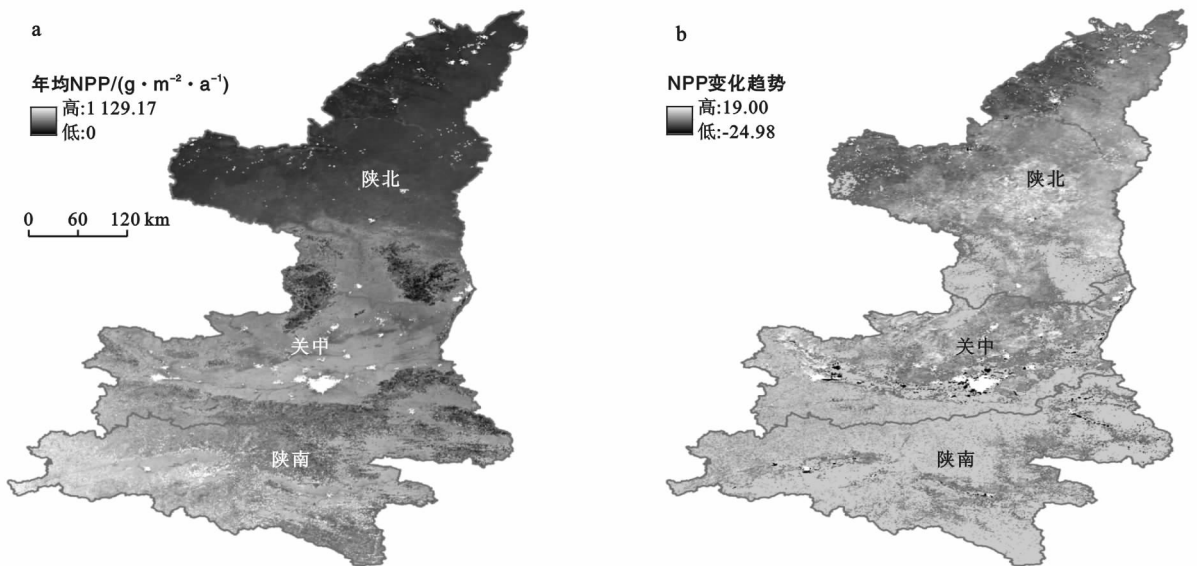


图 1 2000—2014 年植被 NPP 均值及年际变化

图 1b 为全省植被 NPP 年际变化率空间分布图,全省植被 NPP 呈增加趋势,仅有陕南大部分地区及

关中南部分地区增加趋势不显著,不显著区域占全省面积的 35.85%。陕北退耕还林区及关中西北部

及西部地区增加趋势显著,尤其在陕北黄土高原丘陵沟壑区,NPP 年际变化率 5~20,这与该区域实行退耕还林还草政策,植被覆盖度大幅提高有较大关系。关中平原其年际变化次之,但关中东南部地区华阴、潼关一带,年际变化增加较少,年际变化均值 1~5。整个陕南大部地区 NPP 均呈增加趋势但在陕南部分地区增加趋势并不显著,这与该区域植被覆盖水平持续较高,增长程度不会大幅增加有关;关中城市群周边植被生长状况变差,这是城市化发展的结果;陕北防风固沙区域明显呈现负增长,该区域生态环境较恶劣,植被生长受限,植被固碳能力降低,因此防风固沙工程还应该持续进展。

全省分区植被 NPP 年际变化如图 1 所示,2000—2014 年陕西省植被 NPP 呈波动性上升趋势,陕南地区各年均值较其他地区都高,陕北最低。分别统计陕西省 3 大区域的植被 NPP 均值、年际变化率及显著性检验(表 1),2000—2014 年全省植被 NPP (以 C 计)多年平均值为 349.08 g/(m<sup>2</sup>·a),2000 年为 333.88 g/(m<sup>2</sup>·a),2014 年增长到 373.48 g/(m<sup>2</sup>·a),年际变化率为 5.98,通过  $p \leq 0.05$  的显著性检验。陕北地区植被 NPP 多年平均值为 216.98 g/(m<sup>2</sup>·a),年际变化率最高达 5.98,通过  $p \leq 0.01$  的显著性检验;关中地区植被 NPP 年际变化率次之为 5.73,

陕南地区最低仅为 4.05,且未通过显著性检验( $p \leq 0.1$ )。

表 1 2000—2014 年陕西省各区域植被 NPP 均值及年际变化率

地区	NPP 值			
	平均值/ (g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	年际变化率	相关系数	显著性
陕北	216.98	5.98	0.72	极显著
关中	410.93	5.73	0.49	显著
陕南	457.37	4.05	0.33	不显著
全省	349.08	5.27	0.53	显著

注( $p < 0.01$ )

### 3.4 2000—2014 年陕西省实际蒸散(ET)时空分布特征

陕西省蒸散(ET)空间分布见图 2a,全省蒸散量分布有明显的空间差异,呈现由南向北递减的趋势。说明在陕西南部地区水分较为充足,而在陕西北部较为缺水<sup>[15]</sup>。整个陕北地区自然环境较为干旱缺水,蒸散量在 200 mm 左右,尤其是陕北长城沿线风沙区,年均蒸散量 100~200 mm;关中地区虽自然环境较好,但十年九旱,主要植被类型以农田为主,年均蒸散量为 600 mm 左右,尤其关中东部地区主要为旱作农业区,蒸散量均值较关中其他地区低;陕南主要以林地为主,区域内自然环境良好,年均降雨量较其他地区高,蒸散量也最大 700~800 mm。

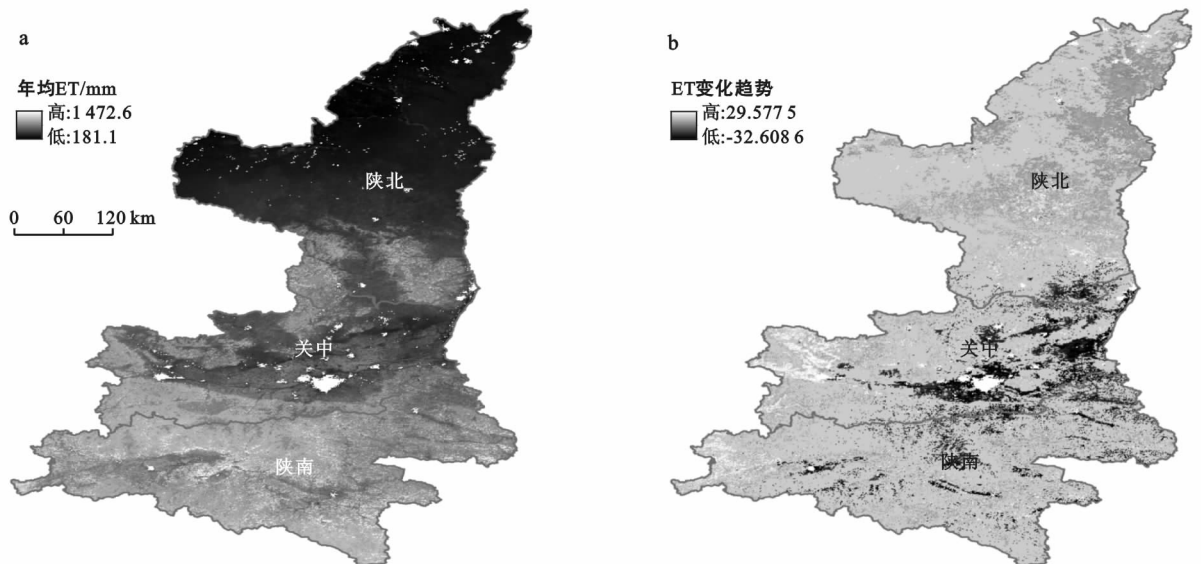


图 2 2000—2014 年 ET 平均值及年际变化

逐像元计算 2000—2014 年的全省蒸散量年际变化率,可以看到蒸散量变化趋势空间分布状况(图 2b)。全省蒸散量变化趋势与植被覆盖情况联系紧密,植被覆盖度高的地区蒸散量大。全省未通过显著性检验( $p < 0.1$ )的区域占区域总面积的 64.08%,通

过极显著与很显著正相关的区域所占面积比为 19.49%,通过极显著与很显著负相关的区域所占面积比仅为 2.87%。陕北地区通过检验的区域主要是增加趋势,陕北地区由于实行退耕还林还草工程,植被覆盖度大幅提高,蒸散量也显著增加;关中地区中

部及中东部通过检验的区域蒸散量呈下降趋势,这些地区城市化进程加快,导致植被覆盖面积在减少,干旱情况加剧,因此这些区域的蒸散量也呈下降趋势;关中西部地区年际变化呈增加趋势;陕南通过检验的区域很少,变化趋势有增加也有降低。

2000—2014 年陕西省蒸散量波动不大。全省 ET 均值 400~500 mm;陕南地区年均值较其他地区高,陕北最低,这与该区域干旱程度及植被覆盖程度关系较为密切。分别统计陕西省 3 大区域的蒸散量均值、年际变化率及显著性检验(表 2),2000—2014 年全省蒸散量多年平均值为 493.18 mm,2014 年较 2000 年仅增加了 34.11 mm,年际变化率仅为 0.99,未通过显著性检验。陕北地区蒸散量多年平均值为 325.20 mm,年际变化率为各区域最高达 2.11,蒸散量由 2000 年的 285.62 mm 上升到 2014 年的 345.02 mm;关中地区蒸散量均值为 518.87 mm,年际变化率为负,该区域城市较多,受城市化冲击较大,且地处较干旱地区,周边植被覆盖水平变差,蒸散量也较低;陕南地区蒸散量均值最高为 672.30 mm,年际变化率为 0.60,全省各区均未通过显著性检验( $p \leq 0.1$ )。

表 2 2000—2014 年陕西省各区域 ET 均值及年际变化率

地区	ET 值			
	平均值/mm	年际变化率	相关系数	显著性
陕北	325.20	2.11	0.30	不显著
关中	518.87	-0.21	-0.01	不显著
陕南	672.30	0.60	0.07	不显著
全省	493.18	0.99	0.14	不显著

### 3.5 2000—2014 年植被 NPP 与 ET 的关系

通过逐一分析陕西省植被 NPP 与蒸散量的时空分布特征,发现陕西省植被 NPP 与蒸散量在时空分布上都呈现由北向南递增的趋势。本节讨论植被 NPP 与蒸散量 ET 之间的关系。

通过 2000—2014 年全省年均植被 NPP 与年均蒸散量 ET 的时间相关性散点图可以看出(图 3),植被 NPP 与蒸散量 ET 呈指数变化,均通过  $p \leq 0.05$  的显著性检验。

逐像元分析植被 NPP 与蒸散量 ET 的空间相关关系,全省各区域均呈现正相关关系,但很多地区正相关系数较低,全省范围内没有通过显著性检验( $p \leq 0.1$ )的区域达到 40.48%,尤其是陕南绝大部分地区相关系数较低未通过检验;关中地区西北部呈现极显著正相关,关中地区渭北旱作区呈极显著正相关的区域也较多,这些区域植被生长状况直接影响到蒸散量大小;当该区域干旱得到缓解植被生长状况变好时,

蒸发量增加,当该区域干旱情况加重时,土壤水分减少,植被生长受阻,蒸散量减少,陕北地区达到显著正相关的区域达到 76.23%,正如相关介绍陕北地区自然环境较差,年降雨量较少,地面蒸发量与植被蒸腾作用产生的水汽含量较低,蒸散量也较低,植被生长状况较差,植被 NPP 较低。

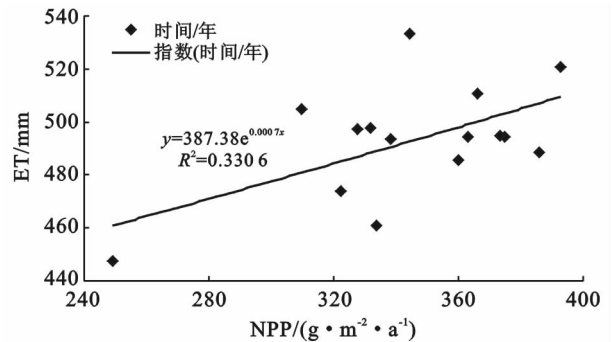


图 3 植被 NPP(以 C 计)与 ET 关系

由于陕北地区植被 NPP 与蒸散量 ET 相关性更加紧密,进一步建立一元线性回归方程分析陕北地区逐年植被 NPP 与蒸散量 ET 的相关关系,结果表明:2000—2014 年陕北地区植被 NPP 与蒸散量 ET 的相关关系在删除个别异常数据之后均呈极显著正相关关系( $p \leq 0.01$ )。在陕北地区植被 NPP 的大小与蒸散量的多少有着密切的关系,陕北地区年降雨量少,蒸散量是水分交换的主要途径,当干旱发生时,水分平衡发生了变化,地表蒸散及植被的蒸腾作用均较低,导致该区域植被生长水平状况受到影响,作为植被生长状况的主要衡量标准之一的植被 NPP 也因此受到了影响。当下垫面水分充足时,太阳净辐射、温度及风速等因素成为驱动蒸散发变化的主要因素,而当在下垫面比较干旱时,蒸散量主要受土壤水分影响<sup>[22-23]</sup>,干旱是影响植被生长的重要因素之一,因此越是在干旱的地区植被生长与蒸散量的关系愈发紧密。

## 4 结论

(1) 陕西省 2000—2014 年植被 NPP 均值呈现由南向北逐步减少的空间特征,陕南地区植被 NPP 最高,其次是关中地区,陕北地区尤其是长城沿线风沙区是被 NPP 最低。2000—2014 年陕西省植被 NPP 在波动中呈上升趋势,全省年际变化率达 5.27,陕北地区年际变化率最高达 5.98,陕南地区最低。

(2) 2000—2014 年年 ET 均值呈现由南向北逐步减少的趋势,陕南地区年均蒸散量 700~800 mm,该区域气候宜人,降雨充沛因此蒸散量 ET 值最高,

关中地区逐渐向陕北黄土高原区过渡,蒸散量 ET 值在 600 mm 左右,陕北地区较为干旱,蒸散量在 200 mm 左右。2000—2014 年全省蒸散量 ET 多年平均值为 493.18 mm,年际变化率仅为 0.99。全省各个区域均为通过显著性检验。

(3) 逐年分析植被 NPP 与 ET 相关性,结果表明陕西省植被 NPP 与蒸散量 ET 的相关系数较高,通过了  $p \leq 0.05$  的显著性检验。逐像元进一步分析植被 NPP 与蒸散量 ET 的相关关系结果表明全省 40.48% 的区域未通过显著性检验 ( $p \leq 0.1$ ),尤其是陕南绝大部分地区未通过检验;进一步分析陕北地区植被 NPP 与 ET 的相关关系,陕北地区植被 NPP 与蒸散量 ET 的相关系数均较高,且逐年均通过  $p \leq 0.01$  的显著性检验。

陕北地区植被 NPP 与蒸散量 ET 的相关性极高,两者相互作用,在下垫面水分交换的过程中,植被得到了充足的水汽才能良好的生长,特别是在干旱的区域,蒸散量的多少直接影响到植被 NPP 的大小即植被生长状况是否良好,相反植被生长状况也直接影响了植被的蒸腾作用,进一步影响到蒸散量的多少。本文的不足之处在于没有进一步分析不同植被类型下植被 NPP 与 ET 的关系,该区域十几年间植被覆盖类型发生巨大变化,在退耕还林还草过程中,大量的耕地被转变为林地、草地,进一步研究该区域不同土地利用类型对植被 NPP 与 ET 的影响,可探究该区域在下垫面的改变下植被 NPP 与 ET 的相关关系,对该区域生态环境建设提供理论依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [2] 袁博,白红英,章杰,等. 秦岭山地植被净初级生产力及对气候变化的响应[J]. 植物研究, 2013, 33(2): 225-231.
- [3] 李军玲,陈怀亮,邹春辉,等. 1994—2008 年河南省植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1424-1429.
- [4] 周广胜,张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [5] 李登科,范建忠,王娟. 基于 MOD17 A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [6] 李传华,赵军. 2000—2010 年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 712-718.
- [7] 王宗明,国志兴,宋开山,等. 2000—2005 年三江平原地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 136-146.
- [8] 王鹤松,贾根锁,冯锦明,等. 我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化[J]. 大气科学, 2010, 34(5): 882-889.
- [9] 王新闯,王世东,张合兵,基于 MODIS17 A3 的河南省 NPP 时空格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [10] 国志兴,王宗明,张柏,等. 2000—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [11] 刘琳,李月臣,朱翠霞,等. 2001—2010 年重庆地区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系[J]. 遥感信息, 2013, 28(5): 99-108.
- [12] 罗玲,王宗明,毛德华,等. 松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1533-1540.
- [13] 时忠杰,高吉喜,徐丽宏,等. 内蒙古地区近 25 a 植被对气温和降水变化的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1594-1601.
- [14] 范建忠,李登科,高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1536-1543.
- [15] 何慧娟,卓静,董金芳等. 基于 MOD16 检测陕西省地表蒸散变化[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 960-967.
- [16] 李超凡,罗格平,李均力,等. 近 20 a 中亚净初级生产力与实际蒸散发特征分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 919-927.
- [17] 张晓林,熊立华,林琳,等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 229-237.
- [18] 杜加强,熊珊珊,刘成程,等. 黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 831-840.
- [19] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 617-627.
- [20] 徐永明,赵巧华,巴雅尔,等. 基于 MODIS 数据的博斯腾湖流域蒸散时空变化[J]. 地理科学, 2011, 32(11): 1353-1357.
- [21] 张晗,任志远,韦振锋. 2000-2012 年陕西省复种指数时空分布及潜力分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 492-498.
- [22] 唐婷,冉圣宏,谈明洪. 京津唐地区城市扩张对地表蒸散发的影响[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 233-240.
- [23] 贺添,邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988.