2001—2013年黄土高原植被净初级生产力时空变化及其归因

周夏飞,马国霞,曹国志,贾 倩,於 方* (环境保护部环境规划院,北京 100012)

摘要 基于光能利用率模型(CASA),利用遥感数据、气象数据和基础地理数据,测算了2001—2013年黄土高原植被净初级生产力(NPP),并辅以一元线性回归、Hurst 指数及相关分析等方法,分析了2001—2013年黄土高原 NPP 时空变化特征、未来变化趋势及其驱动因素。结果表明,2001—2013年黄土高原植被年均 NPP 呈显著增加趋势,年增速为4.9g/(m²·a)。黄土高原植被 NPP 空间分布差异显著,表现出由东南向西北递减的趋势。黄土高原植被 NPP 呈增加趋势和减少趋势的面积分别占78.0%和22.0%。Hurst 指数表明研究 区未来植被 NPP 变化的正向特征显著,呈持续性和反持续性的比重分别为72.1%和28.9%。黄土高原植被 NPP 变化与降水、气温相关性不大,人类活动是影响植被 NPP 变化的重要因素,且对 NPP 有双重影响。 关键词 植被净初级生产力;时空;黄土高原

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)14-0048-06

Spatiotemporal Change and Associated Driving Forces of Vegetation Net Primary Productivity in the Loess Plateau during 2001 – 2013

ZHOU Xia-fei, MA Guo-xia, CAO Guo-zhi, YU Fang* et al (Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012) **Abstract** Based on the Carnegie-Ames-Stanford-Approach (CASA), the Net Primary Productivity (NPP) of vegetation in the Loess Plateau during 2001 – 2013 was measured and calculated with the related remote sensing data, meteorological data and basic geographic data. The temporal and spatial variation characteristics of NPP in the Loess Plateau during 2001 – 2013, the future trend and its driving factors were analyzed. The results showed that: The average annual NPP of vegetation in the Loess Plateau increased significantly during 2001 – 2013, with an annual growth rate of 4.9 g/(m² · a). The spatial distribution of vegetation NPP in the Loess Plateau showed a significant trend, with a decreasing tendency from southeast to northwest. The area of improved and degraded NPP accounts for 78.0% and 22.0% of the total study area, respectively. The NPP of the vegetation in the study area was supposed to have a significant positive trend, the area of positive and reverse characteristic accounts for 72.1% and 28.9% of the total study area, respectively. There was no significant correlation between the NPP change and the precipitation as well as the air temperature in the Loess Plateau. The human activities were the core elements affecting the change of the vegetation NPP, leading to both negative effect and positive effect.

Key words NPP; Spatial-temporal; Loess plateau

植被净初级生产力(NPP)是指单位时间、单位面积上, 植被通过光合作用所产生的有机物总量扣除自养呼吸后的 剩余部分^[1]。NPP 作为地表碳循环的重要组成部分^[2],不仅 能反映植被群落在自然环境条件下的生产能力,表征陆地生 态系统的质量状况^[3],还是判定生态系统碳源、碳汇和调节 生态过程的主要因子^[4]。目前,全球/区域碳源、碳汇、碳平 衡成为全球变化科学研究的热点问题之一^[5-7]。因此,动态 监测 NPP 在调节全球碳平衡、维护气候稳定及减缓温室效应 等全球变化问题中具有重要意义^[8]。

黄土高原地处干旱和湿润的过渡区,是我国生态环境最为脆弱、水土流失最为严重的地区之一^[9]。为改善黄土高原日益恶化的生态环境,从1999年开始我国在黄土高原地区实施退耕还林还草等大规模植被建设。1999—2010年黄土高原累计造林面积已达到1890.6×10⁴hm²,该地区植被得到一定恢复^[10-11]。然而,如此大规模的生态工程,很可能会改变黄土高原地区生态系统景观格局,从而影响生态系统特征,而其直接体现在 NPP 变化上。因此,研究黄土高原自退耕以来 NPP 的变化具有重要的生态学意义^[12]。

目前,已有学者对黄土高原植被 NPP 开展了大量研究, 并取得了一定成果。谢宝妮等^[12]研究表明,2000—2010 年 黄土高原大部分地区 NPP 呈增加趋势;史晓亮等^[10]研究指 出,退耕还林还草生态工程实施之前(1982—1998年),黄土 高原大部分区域植被 NPP 变化不明显,自 1999 年后该区植 被 NPP 增加趋势显著;李登科等^[13]基于 MOD17A3 数据集的 研究认为,2000—2006 年陕西省大部分地区 NPP 呈增加趋 势;许红梅等^[14]研究指出,黄土丘陵沟壑区植被 NPP 对温度 升高比对降雨变化的响应更为敏感。综上,以往研究多局限 于对植被 NPP 时空变化特征进行分析,并从整体上探讨植被 与气候因子的相关性,而关于黄土高原地区植被 NPP 变化未 来趋势尚不明确。笔者基于光能利用率模型(CASA),利用 遥感数据、气象数据和基础地理数据测算 2001—2013 年黄 土高原 NPP,并辅以一元线性回归、Hurst 指数、相关分析等 方法,分析植被 NPP 时空变化特征、未来趋势及其驱动因素, 以期为黄土高原生态环境保护、建设及生态环境管理提供科 学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 黄土高原位于我国中部偏北,地理坐标 为33°43′~41°16′N,100°54′~114°33′E,总面积64万km²。 在行政单元上,区域地跨山西、陕西、甘肃、青海、河南、宁夏 以及内蒙古等省区(图1)。该区地势西高东低,平均海拔在 1500~2000m,气候为大陆性季风气候,冬季寒冷干燥、夏 季炎热少雨,年均气温3.6~14.3℃,年降水量300~ 800mm。植被类型主要包括常绿针叶林、落叶阔叶林、灌丛、 草地和农田,主要土壤类型为黄绵土、草原风沙土和褐土。

收稿日期 2017-03-22

基金项目 国家自然科学基金项目(41371533);国家科技支撑计划项 目(2015BAK12B02)。

作者简介 周夏飞(1991—),男,湖南祁东人,硕士研究生,研究方向: 资源与环境遥感。*通讯作者,研究员,博士,从事环境经 济、环境损害评估研究。



图 1 研究区地理区位 Fig.1 Geographical location of study area

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据。遥感数据为 2001—2013 年的 MOD13A1 数据,来源于美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS 数据产品(http://e4ftl01.cr.usgs.gov),空间分辨率为 500 m×500 m,时间分辨率为 16 d。由于 MODIS/NDVI 产品 经过水、云、气溶胶等处理,保证了数据质量,加之较高的空间分辨率,因此被广泛应用于植被 NPP 估算的研究中。首先,利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)将4 景 MOD13A1 数据进行合并,并将其投影为 Albers(Albers Conical Equal Area);然后,采用最大合成法(MVC),消除异常值的影响,合成月 NDVI 数据;最后,利用研究区边界裁切 NDVI 影像,得到 2001—2013 年逐月 NDVI 影像。

1.2.2 土地利用类型数据。采用的土地利用类型数据为2001—2013年的 MCD12Q1,来源于美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS 数据产品(http://e4ftl01.cr.usgs.gov),空间分辨率为500m×500m。该数据集下共有5种土地覆盖分类方案,采用第1种分类方案即 IGBP 全球植被分类体系,将其划分为常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林等17类。数据处理流程同遥感数据处理流程一致。

1.2.3 气候数据。采用的气象数据为2001—2013 年黄土高 原 73 个气象站点的逐日数据(平均气温、降水量、日照时数),来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。

1.2.4 造林面积数据。来源于各省区统计年鉴和《中国林 业统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 植被 NPP 估算。采用基于遥感和光能利用率改进的 CASA 模型^[4,15]来估算植被 NPP。NPP 主要由植被所吸收的 光合有效辐射与实际光能利用率 2 个变量确定,详细计算过

1.3.2 趋势分析。采用一元线性回归分析方法分析 2001—2013 年黄土高原 13 年每个栅格植被 NPP 的变化趋势,计算公式为

Slope =
$$\frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times Y_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} Y_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2}$$
(1)

式中,Slope 为趋势线的斜率,即 NPP 的变化趋势; Y_i 为栅格 第*i*年的 NPP 值;*n* 为监测时段的年数(n = 13)。Slope > 0 时,表明 NPP 呈增加趋势;Slope < 0 时,表明 NPP 呈下降 趋势。

1.3.3 Hurst 指数。Hurst 指数是预测时间序列数据相对于 过去未来发展趋势的一个重要指数,目前被广泛应用于水 文、气象等经济领域^[16-18]。基于重标极差(*R/S*)的 Hurst 指 数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法,其基本 原理^[19]是:

(1)定义一个时间序列

$$(\xi)_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \cdots$$
 (2)

(2)计算累积离差

程参考朱文泉等^[4,15]的方法。

$$X(t,\tau) = \sum_{u=1}^{r} (\xi(u) - (\xi)_{\tau}) \qquad 1 \leq t \leq \tau$$
(3)
(3)计算极差

$$R(\tau) = \max_{1 \le t \le \tau} X(t,\tau) - \min_{1 \le t \le \tau} (t,\tau) \qquad \tau = 1, 2, \cdots$$
(4)
(4) 计算标准差

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(t) - (\xi)_{\tau})^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(5)

若存在 $R/H \propto \tau^{H}$,则说明时间序列{ $\xi(t)$ }, $t = 1,2,\cdots$ 存在 Hurst 现象。H 值称为 Hurst 指数,其值可在双对数坐 标系($\ln\tau$, $\ln R/S$)中用最小二乘法拟合得到。Hurst 指数为

0~1.0,0 < Hurst ≤0.5 时,表明该时间序列具有反持续性, 即未来的变化趋势与过去趋势相反,且 Hurst 越接近于0,反 持续性越强;0.5 < Hurst < 1.0,表明该时间序列是一个持续 序列,即未来变化趋势与过去趋势一致,且 Hurst 越接近于 1.0,持续性越强。Hurst 为0.5 时,表明该时间序列为随机序 列,即未来的变化趋势与过去趋势无关。

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 数据验证 对模拟结果进行验证是后期结

果分析的基础。区域 NPP 模型模拟精度验证方法主要有 2 种:一种是与实测数据进行比较;另一种是与其他模型模拟 结果进行比较。由于黄土高原实测数据相对较少,笔者将模 型估算的 2001—2013 年各植被类型平均 NPP 与其他模型模 拟的结果及部分实测数据进行比较,结果见表 1。由表 1 可 知,该研究模拟的平均 NPP 值与同期的 MOD17A3 数据的值 较为接近,基本在实测范围值内,与其他模型估算的结果差 距也不大,表明估算结果具有一定的可靠性。

ble 1 Co	mnarison of annual n	nean NPP simulated in this	study with that of other resea	arches based on vegetation types	$g/(m^2 \cdot a)$

古 	黄土高原 The Loess Plateau		我国 China			
植伮尖型 Vegetation type	该研究模型	MOD17A3 ^[12]	朴世龙等	陶波	朱文泉等	实测值
vegetation type	Model of this study		Pu Shi-long et al ^{[20}	^{D]} Tao bo ^{$[21]$}	Zhu wen-quan et al ^[15]	Measured value ^[22]
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	344.0	325.0	354.0	515.0	367.1	395.5
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	687.0	343.0	304.0	517.6	642.9	671.8
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	476.0	_	432.0	379.1	438.8	490.0
混交林 Mixed forest	496.0	401.0		—	—	
灌丛 Shrub	274.0	274.0	283.0	272.0	367.7	364.0
草地 Grassland	293.0	_		414.6	226.2	230.6
耕地 Cultivated land	399.0	278.0	216.0	648.8	426.5	532.9

表1 该研究模拟的不同植被类型 NPP 均值与其他模型模拟的 NPP 均值比较

2.2 植被年均 NPP 年际变化 由图 2 可知,2001—2013 年 黄土高原植被 NPP 的年际波动较大,但总体上呈增加趋势, 年增速为 4.9 g/(m²·a)(P < 0.05)。植被年均 NPP 在 2001 年最低[274.0 g/(m²·a)],2013 年最高[378.0 g/(m²·a)], 平均值为 333.0 g/(m²·a)。值得注意的是,植被 NPP 在 2006 和 2010 年年均 NPP 下降较大,前者可能是由于 2006 年 降水稀少,导致 NPP 有所下降,后者可能是由于新退耕还林 的植被覆盖较低所致。







由图 3 可知,2001—2013 年 NPP > 500 g/(m²·a)的区 域面积百分比整体呈增加趋势,而 NPP < 100 g/(m²·a)的 区域面积百分比整体呈减少趋势。NPP > 500 g/(m²·a)的 植被主要为林地,说明退耕还林还草使得人类对于森林干扰 减少,使其得到较好的恢复。

2.3 植被年均 NPP 空间变化

2.3.1 空间分布特征。从空间分布来看(图4),黄土高原 NPP格局呈现由东南向西北递减的趋势,高值区主要分布在 陕西省南部、甘肃省南部、青海省、河南省等地区,这主要是 由于这些区域的植被类型主要为针叶林、灌丛,植被长势也 相对较好;低值区主要分布在内蒙古、宁夏南部、甘肃北部等



图 3 2001-2013 年黄土高原 NPP 年际变化

Fig. 3 Inter-annual variations of NPP of the Loess Plateau during 2001 – 2013

地区,这些地区多为牧区和荒漠,植被覆盖较少、环境较为 恶劣。

2.3.2 空间变化趋势。从空间变化上看(图5),黄土高原 NPP 整体上呈增加趋势,呈增加趋势和减小趋势的面积分别 占总面积的78.0%和22.0%,其中28.0%的区域呈显著增 加趋势,主要分布在陕西北部、山西北部、宁夏南部、青海南 部等区域,这可能是由于这些地区原本的植被覆盖度相对较 低,然而在"退耕还林还草"等工程实施下,该地区 NPP 呈增 加趋势;黄土高原仅有4.0%的区域呈显著下降趋势,主要分 布在内蒙古西部、宁夏北部,这主要是由于这些地区城市化 进程速度加快,占用了大量林地、草地,导致其 NPP 下降。

2.4 植被 NPP 未来趋势 黄土高原植被 NPP 的 Hurst 指数 平均值为 0.551 8,其中,Hurst 指数大于 0.5 的像元数占 72.1%,说明植被 NPP 变化的正向特征显著;而 Hurst 指数小 于 0.5 的像元数占 28.9%。Hurst 指数高值区主要分布在内 蒙古、宁夏西部、甘肃省北部、青海省等地区,说明这些地区 植被 NPP 变化具有同向特征,即未来变化趋势与过去变化趋



图 4 黄土高原 NPP 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NPP in the Loess Plateau



图 5 2001—2013 年黄土高原年均 NPP 动态变化



势一致;而 Hurst 指数低值区主要分布在陕西省西部及南部、 宁夏东部及南部、山西省等地区,说明这些地区植被 NPP 变 化具有反向特征,即未来变化趋势与过去变化趋势相反 (图6)。

将 Hurst 指数与一元线性回归分析结果进行叠加分析发 现,植被 NPP 持续改善地区主要分布在内蒙古南部、陕西北 部、甘肃北部、宁夏南部等地区,这主要是由于这些区域长期 实行退耕还林工程,已取得明显效果;植被 NPP 持续退化地 区主要分布在陕西南部、内蒙古北部、青海北部等地区,这可 能是由于这些区域未开展退耕还林工程或工程措施不到位; 植被 NPP 由改善转退化地区主要分布在陕西中部、甘肃南 部、山西等地区,这可能是由于退耕还林工程措施不到位;植 被 NPP 由退化转改善地区主要分布在青海省西部、内蒙古西 部、山西东部等地区,这可能是由于这些区域之前未实施退 耕还林工程,近年来开始开展退耕还林工程所致(图6)。

2.5 黄土高原植被 NPP 影响因素

2.5.1 植被 NPP 与气候因子的相关性。降水和气温等气候 因子的变化对陆地植被的生长发育具有重要影响,因此笔者 利用逐像元的相关分析方法,分别对 2001—2013 年的年植 被 NPP、年降水量和年平均气温的相关系数进行分析,从而 在空间尺度分析植被 NPP 与主要气候因子的关系。从图 7 可以看出,黄土高原植被 NPP 与年降雨量和年均温具有一定 的相关性,但相关性不大。在黄土高原,73.3% 的区域年降 雨量与 NPP 呈正相关,其中仅有 6.9% 的区域通过了 0.05 显 著性检验,主要分布在黄土高原东部及西部地区,表明降水 量增加,NPP 增加;60.8% 的区域年均温与 NPP 呈负相关,其 中仅有 9.9% 的区域通过了 0.05 显著性检验,主要分布在黄 土高原北部,这些区域 NPP 随着温度的升高反而减小 (图 7)。

2.5.2 人类活动的影响。除气温、降水等自然因素外,人类



图 6 黄土高原植被 Hurst 指数(a)及未来趋势(b)

Fig.6 Hurst index(a) and future trend(b) of NPP in the the Loess Plateau



注:a. 年降雨量;b. 年均温

Note: a. Annual rainfall; b. Mean annual temperature

图 7 2001-2013 年黄土高原 NPP 与自然要素的相关性

Fig.7 Spatial distribution of correlation coefficients between NPP and natural factors on the Loess Plateau during 2001 - 2013

活动也会对黄土高原 NPP 的时空分布格局产生重要影响,人 类活动对其影响包括正面影响(如退耕还林)和负面影响 (如城市扩张)。笔者主要分析了黄土高原退耕还林工程的 历年累积造林面积与植被 NPP 变化情况,结果见图 8。由图 8 可知,自1999 年退耕还林还草工程实施以来,黄土高原造 林面积持续上升,植被 NPP 总体上也表现出升高趋势,表明 退耕还林还草工程可以在一定程度上提高植被 NPP,有效改 善黄土高原的生态环境;但 NPP 变化并未与造林面积变化严 格一致,存在一定的波动性,尤其是 2010 年波动较大,这可 能是由于近年来城市化、放牧等活动对植被 NPP 造成负面 影响。

3 结论与讨论

该研究以黄土高原为研究区域,基于光能利用率模型 (CASA),利用遥感数据、气象数据和基础地理数据测算了 2001—2013年黄土高原植被净初级生产力(NPP),并辅以一 元线性回归、Hurst指数、偏相关分析等方法,分别从3个尺 度分析了植被NPP时空变化特征、未来趋势及驱动因素,得 到以下结论:

(1)2001-2013 年黄土高原植被年均 NPP 呈增加趋势,





年增速为4.9 g/(m²·a),植被年均 NPP 在 2001 年最低 [274.0 g/(m²·a)],2013 年最高[378.0 g/(m²·a)],平均值 为333.0 g/(m²·a)。

(2)黄土高原 NPP 格局呈现由东南向西北递减的趋势, 高值区主要分布在陕西省南部、甘肃省南部、青海省、河南省 等地区,低值区主要分布在内蒙古、宁夏、甘肃北部等地区。

(3)黄土高原 NPP 整体上呈增加趋势,呈增加趋势和减

小趋势的面积分别占总面积的78.0%和22.0%,其中28.0%的区域呈显著增加趋势,主要分布在陕西北部、山西北部、宁夏南部、青海南部等区域。

(4) Hurst 指数分析表明,黄土高原植被 NPP 变化正向 特征显著,植被 NPP 由改善转退化的地区主要分布在陕西中 部、甘肃南部、山西等;植被 NPP 由退化转改善的地区主要分 布在青海西部、内蒙古西部、山西东部等。

(5)黄土高原植被 NPP 与降水量及温度相关性不大, 73.3%的区域年降雨量与 NPP 呈正相关,其中仅有 6.9%的 区域通过了 0.05 显著性检验;60.8%的区域年均温与 NPP 呈负相关,其中仅有 9.9%的区域通过了 0.05 显著性检验。

(6) 植被 NPP 变化是气象变化和人类活动共同作用的 结果,区域气候变化不大背景下,随着"退耕还林"等一系列 生态保护工程的实施,黄土高原生态环境将进一步好转。

由于受遥感数据(MODIS 数据)时间分辨率的影响,该 研究未分析黄土高原大规模生态工程实施前后的植被 NPP 时空演变。采用逐像元线性回归模型融合多种数据源构建 长时间序列遥感数据,并进行植被 NPP 估算,深入分析黄土 高原退耕还林前后 NPP 变化及原因是未来研究的重点。

参考文献

- FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTRÖM C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing [J]. Remote sensing of environment, 1995, 51(1):74 – 88.
- [2] PIAO S L,CIAIS P,LOMAS M, et al. Contribution of climate change and rising CO₂ to terrestrial carbon balance in East Asia: A multi-model analysis[J]. Global & planetary change,2011,75(3/4):133 – 142.
- [3] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281 (5374):237 – 240.
- [4]朱文泉,张锦水,潘耀忠,等.中国陆地生态系统生态资产测量及其动

(上接第45页)

析应用领域提供支持。

4 结论

健全且运行良好的环境统计制度是确保环境数据真实、 有效的重要条件,也是落实资源环境承载能力监测预警机制 和生态文明制度的有力保障。笔者在回顾中国环境统计制 度发展历程的基础上,识别出现阶段存在的法律法规制度建 设滞后、配套管理制度尚不健全与监督机制严重缺失3方面 的问题,并从用户与体制需求2方面进行了深入分析,提出 了中国环境统计制度建设的5个目标,即形成具有较高独立 性、现代化和专业化、高效和及时的环境统计体系。并根据 近期与远期的需求,详述了中国未来环境统计制度的主要任 务和改革路线图。最后,作为环境政策研究者,希望通过不 断加深对中国国情和体制的理解,深入完善该研究的架构和 路线图,为中国环境统计制度改革提供更多的理论支撑。当 然,笔者所阐释的改革方案仅属于初步尝试,期待更多有质 量的研究和讨论。

参考文献

[1] 陈默. 我国环境统计改革思路[J]. 中国统计,2007(12):8-9,10.

态变化分析[J].应用生态学报,2007,18(3):586-594.

- [5] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算 [J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [6] LOBELL D B, HICKE J A, ASNER G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982 – 98 [J]. Global change biology, 2002, 8(8):722 – 735.
- [7] 李晶,任志远,基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值 评价[J].中国农业科学,2011,44(14):2943-2950.
- [8] 张岩,韦振锋,黄毅.1999-2012年三江源区植被净初级生产力及固碳 释氧量测评[J].水土保持通报,2016,36(1):100-105.
- [9] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.2000~2014年黄土高原植被覆盖时空变化 特征及其归因[J].中国环境科学,2016,36(5):1568-1578.
- [10] 史晓亮,杨志勇,王馨爽,等.黄土高原植被净初级生产力的时空变化 及其与气候因子的关系[J].中国农业气象,2016,37(4):445-453.
- [11] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的 关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.
- [12] 谢宝妮,秦占飞,王洋,等.黄土高原植被净初级生产力时空变化及其 影响因素[J].农业工程学报,2014,30(11):244-253.
- [13] 李登科,范建忠,王娟,基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征 [J]. 生态学杂志,2011,30(12):2776-2782.
- [14] 许红梅,高清竹,黄永梅,等. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟[J]. 生态学报,2006,26(9):2939-2947.
- [15] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学 通报,2006,51(6):700-706.
- [16] 张翀,任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势 [J]. 资源科学,2011,33(11):2143-2149.
- [17] 李双双,延军平,万佳.近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化 特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [18] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000-2011年三江源区植被覆盖时空变 化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.
- [19] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研 究中的应用为例[J]. 地理科学,2004,24(2):177-182.
- [20] 朴世龙,方精云,郭庆华.利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产 力[J].植物生态学报,2001,25(5):603-608.
- [21] 陶波.中国陆地生态系统净初级生产力与净生态系统生产力模拟研究[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2003.
- [22] NI J,ZHANG X S,SCURLOCK J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests [J]. Annals of forest science, 2001, 58(4);351-384.
- [2] 彭立颖,贾金虎.中国环境统计历史与展望[J].环境保护,2008(4): 52-55.
- [3] 齐珺,魏佳,罗志云.对我国环境统计制度的思考和建议[J].环境与可 持续发展,2011,36(2):66-69.
- [4] 郑向群,张铁亮,姚秀荣. 我国农业资源环境信息统计的历史回顾与未 来展望[J].农业环境与发展,2011,28(3):6-10.
- [5] 程次,彭晓春,钟义,等. 我国环境统计与总量控制概述[J]. 安徽农业 科学,2012,40(12):7315-7318.
- [6] 陈静,黄伟为,邵丰收,等. 我国环境统计与污染物总量减排协调发展 分析[J]. 资源节约与环保,2015(11):131-132.
- [7] 杨威杉,赵学涛,臧宏宽.国际环境统计的发展及对中国的借鉴[J].环 境保护,2016,44 (Z1):102-105.
- [8] VELTHOF G L. Agri environmental indicators: Recommendations for priority data collection and data combination [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011.
- [9] 包忠明. 我国政府统计体制改革模式的选择[J]. 统计与决策,2006 (13):66-67.
- [10] 李锁强. 国际环境统计的发展趋势[J]. 中国统计,2006(3):43-44.
- [11] 陈默,周颖.美国和欧盟环境统计的借鉴意义[J].中国统计,2009(7): 52-53.
- [12] Commission of the European communities. Development of agri environmental indicators for monitoring the integration of environmental concerns into the common agricultural policy[R]. 2006.
- [13] IED. Industrial emission directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010. Official Journal of the European Union; 1.334/17 (17 December 2010) [R]. 2010.