

河北省 2005—2014 年植被 NPP 时空演变及其与气候因子的关系

李肖¹, 袁金国^{2,3}, 孟丹¹

(1. 首都师范大学 地球空间信息科学与技术国际化示范学院, 北京 100048; 2. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 3. 河北省环境演变与生态建设省级重点实验室, 石家庄 050024)

摘要:在 GIS 软件的支持下,利用 2005—2014 年 MOD17A3H 与 MCD12Q1 数据集,结合河北省 2005—2012 年的 142 个气象站点资料,利用一元线性回归法分析了河北省 10 年间 NPP 的时空演变特征,利用相关系数法分析了 NPP 与气候因子的相关关系。结果表明:河北省年 NPP 主要集中在 200~400 g/(m²·a),其中 NPP 高值区分布在燕山北部区域和太行山东侧一带。2005—2014 年河北省年 NPP 均值与最大值均在波动中微弱上升,年 NPP 均值在 2012 年最大为 337.63 g/(m²·a)。2005—2014 年 NPP 增长率大于 10% 的地区分布在冀西北区域和东南边界,其面积占比为 43.03%。河北省 5 种植被覆盖类型按 NPP 年均值从大到小排列依次为:阔叶林、灌丛、草地、针叶林、农用地。河北省 NPP 与气温主要呈负相关,与降水主要呈正相关。

关键词:净初级生产力(NPP); MOD17A3H; 河北省; 时空演变; 气候因子

中图分类号:TP79; Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0109-06

Spatiotemporal Distribution of Vegetation Net Primary Productivity and Its Relationship with Climate Factors in Hebei Province from 2005 to 2014

LI Xiao¹, YUAN Jinguo^{2,3}, MENG Dan¹

(1. College of Geospatial Information Science and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 3. Hebei Key Laboratory of Environment Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract:Based on MOD17A3H and MCD12Q1 products of MODIS and meteorological data, spatiotemporal changes of net primary productivity (NPP) in Hebei Province during 2005—2014 were quantitatively analyzed by the method of linear regression. The correlations between NPP and climate factors were analyzed by using the method of correlation coefficient. The results showed that the annual NPP value in Hebei Province mostly ranged from 200 g/(m²·a) to 400 g/(m²·a), among which the high NPP values distributed in the north of Yanshan Mountain and the east of Taihangshan Mountain. The annual average NPP and maximum NPP value in Hebei Province from 2005 to 2014 presented the same fluctuation change and slightly upward trend. The annual average NPP peaked at 337.63 g/(m²·a) in 2012. The areas with the growth rate more than 10% occupied 43.03% of the area of Hebei Province, and mainly distributed in the northwest and southeast of the Hebei Province. The annual average NPP of the five vegetation cover types decreased in the order: broadleaf forest>shrublands>grasslands>needleleaf forest>croplands during 2005—2014. Correlation between NPP and air temperature was mainly negative, while the correlation between NPP and precipitation was mainly positive.

Keywords:net primary productivity; MOD17A3H; Hebei Province; spatiotemporal change; meteorological factor

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, 简称 NPP)是指绿色植物在单位时间、单位面积上所积累的有机干物质总量,是光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后剩余的部分^[1-2]。NPP 是表征植被活动的重要指标,也是判定陆地生态系统碳循环和碳汇的重要指示因子^[3],主要受气候与土地利用变化因子的影响^[4-5]。研究 NPP 的时空演变规律及其与气候因子之间的关系为调节陆地生态系统功能状况、提高固碳能力等工作提供了理论依据。

植被 NPP 的估算研究自 20 世纪 60 年代以来受到学者重视,最初的方法是实地测量^[6],这种方法不仅耗时耗力且不适用于大范围尺度的应用;后又发展为经验模型估算^[7],如 Chikugo 模型等,其以实测 NPP 资料为基础,建立其与气候环境因子的函数关系,并利用此函数关系估算生产力;随着遥感技术的发展,以遥感影像为基础的估算模型逐步发展成熟并被广泛应用,如 BIOME-BGC 模型^[8]、CASA 模型^[9],这些模型考虑了植被与生态环境相互作用的生态、物理过程,使 NPP 的估算更为精确^[10]。由于遥感范围广、速度快的特点,使得大面积、长周期的 NPP 研究成为可能,王亚林等^[11]对 2001—2013 年中国灌木生态系统 NPP 进行研究,认为其受降水影响更多;陈福军等^[4]利用 CASA 模型分析了近 30 年中国陆地生态系统 NPP 的时空变化,认为不同地形、气候特征的区域其 NPP 对气候因子的响应有显著差异,而针对河北地区的 NPP 相关研究较少。本文利用 MODIS 遥感数据集,对河北省植被 NPP 的时空变化特征及其与气候因子的关系进行分析,从多个方面充实河北省植被 NPP 的相关信息,为河北省生态环境动态监测和相应政策的制定提供依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

河北省(36°01′—42°42′N, 113°22′—119°58′E)地处华北平原,东临渤海,西为太行山,北为燕山,属温带大陆性气候。年降水量在 300~800 mm,主要集中在 7 月、8 月份,降水在全省空间分布差异显著,在燕山南侧,太行山东侧,渤海西侧地区降水量充沛,可达到 600~800 mm,而地处内陆的张北高原降水量不足 400 mm。河北省西北部地区植被覆盖主要为草地,东南部主要为农用地,太行山、燕山地区主要为阔叶林,针叶林分布极少。在所有的植被地分布中,农用地面积约占 50.3%,草地约占 37.7%,阔叶

林约占 7%,灌丛约占 4.9%,针叶林约占 0.1%。

1.2 数据来源与处理

本文中所涉及的数据均投影到同一坐标系下,投影方式为双标准纬线等面积圆锥投影(Albers 投影),采用的椭球体为 WGS84 椭球体,主要投影参数为:第一标准纬线 $STDPR1 = 25^\circ$,第二标准纬线 $STDPR2 = 47^\circ$,中央经线 105° 。

1.2.1 NPP 数据与处理 NPP 遥感数据为 NASA 的 EOS/MODIS 提供的 2005—2014 年共 10 a 的 MOD17A3H 数据集,下载网址为: <https://lpdaac.usgs.gov/>,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a,是 Terra 卫星上搭载的 MODIS 传感器生成的净初级生产力影像数据产品。

利用从 LPDAAC 下载的 MRT 工具,对 MOD17A3H 数据进行镶嵌和投影转换,并在 ArcGIS 中将镶嵌结果裁剪出河北省范围内影像。根据 MOD17A3H 数据的产品说明,MOD17A3H 的有效值为 $-3\ 000 \sim 32\ 700$,该范围以外的都为无效值,利用 ArcGIS 属性提取工具对裁剪结果进行有效值提取。

1.2.2 气象数据与处理 气象数据为 2005—2012 年河北省 142 个气象站点的逐旬或逐月的气温、降水数据。对气温数据求年平均,对降水数据求年总和。在 ArcGIS 中对气温数据采用克里金法(Ordinary 普通克里金)^[12],对降水数据采用样条函数法(Regularized 规则样条函数)^[13]进行空间插值,插值结果数据空间分辨率设置为 500 m。

1.2.3 土地覆盖数据与处理 土地覆盖遥感数据为 NASA 的 EOS/MODIS 提供的 2005—2013 年的 MCD12Q1 数据集,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a,该产品有 5 种土地覆盖分类方案,本文采用 IGBP 分类方案,包含了 17 种主要类型。利用 MRT 工具,对 MCD12Q1 数据进行镶嵌和投影转换并裁剪出河北省范围内影像。根据 MCD12Q1 数据的产品说明,将植被覆盖划分为 5 种类型,分别是针叶林、阔叶林、灌丛、草地、农用地,其他类型去除为 null 值(表 1)。

以 2010 年的植被覆盖图为例(图 1),河北省植被覆盖主要为农用地、草地,其次为阔叶林、灌丛,针叶林分布最少。

1.3 研究方法

1.3.1 一元线性回归法 采用一元线性回归方法对 NPP、气温、降水数据进行了时间变化趋势分析,以 NPP 为例,分析每个像元的 NPP 随时间变化的线性倾向,可以减小极端年份出现 NPP 极端值的干扰,得

到长时间序列的 NPP 的变化趋势^[14]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: θ_{slope} 为单个像元的多年回归的斜率,即线性倾向值; n 为年份数; NPP_i 为某一点像元第*i*年的 NPP 值。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时,随时间*i*的增加,NPP 呈上升趋势;当 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 时,随时间*i*的增加,NPP 呈下降趋势; θ_{slope} 值的大小反映了 NPP 上升或下降的速率。

利用 NPP 变化率^[10]表征 10 年间 NPP 的变化程度。

$$\text{NPP 变化率} = \frac{\theta_{\text{slope}}}{\text{NPP}_{\text{Avr}}} \times n \times 100\% \quad (2)$$

式中:NPP 变化率以百分率来表示; NPP_{Avr} 为 10 a 平均 NPP; n 为年份数。

表 1 MCD12Q1 的 IGBP 分类描述及重分类方案

原始值	IGBP 全球 植被分类	重分类后 植被类型	重分类 后值
0	水	非植被	Null
1	常绿针叶林	针叶林	1
2	常绿阔叶林	阔叶林	2
3	落叶针叶林	针叶林	1
4	落叶阔叶林	阔叶林	2
5	混交林	阔叶林	2
6	稠密灌丛	灌丛	3
7	稀疏灌丛	灌丛	3
8	木本热带稀树草原	草地	4
9	热带稀树草原	草地	4
10	草地	草地	4
11	永久湿地	非植被	Null
12	农用地	农用地	5
13	城市和建筑区	非植被	Null
14	农用地/自然植被	农用地	5
15	雪和水	非植被	Null
16	贫瘠用地/无植被地	非植被	Null
254	未分类	非植被	Null
255	背景值	非植被	Null

1.3.2 相关系数的计算 为研究 NPP 与气温、降水因子的相关关系,对每一个像元均建立其 NPP 与气温、降水因子的线性关系,计算出每个像元 NPP 与气温、降水因子间的相关系数^[15]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2 \times \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \quad (3)$$

式中: R 为相关系数; N_i 为某一点像元第*i*年的 NPP; \bar{N} 为多年平均 NPP; M_i 为对应位置像元的某种气候

因子值, \bar{M} 为多年平均某种气候因子值; n 为年份数。 R 的值为 $-1 \sim 1$,其绝对值越大,表明两变量的相关程度越高。

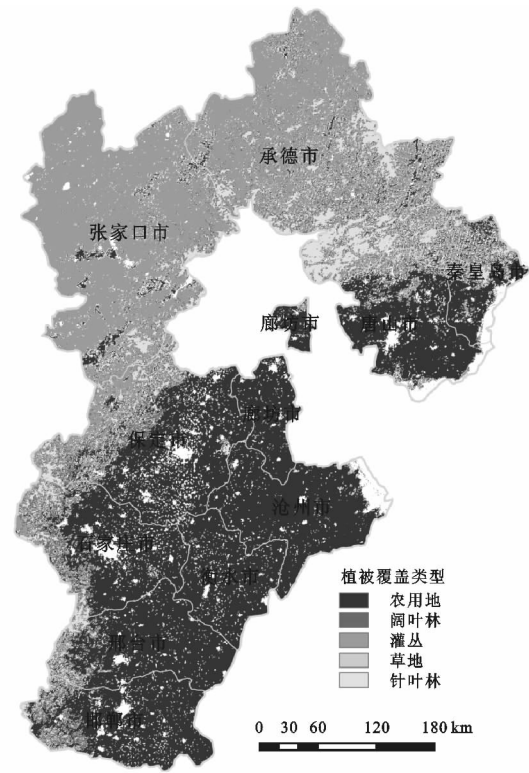


图 1 2010 年河北省植被覆盖类型

根据计算出的*R*的结果值,对其进行如下划分: $-1 < R \leq -0.8$ 为高度负相关, $-0.8 < R \leq -0.3$ 为中度负相关, $-0.3 < R \leq 0$ 为低度负相关; $0 < R \leq 0.3$ 为低度正相关, $0.3 < R \leq 0.8$ 为中度正相关, $0.8 < R \leq 1$ 为高度正相关。

2 结果与分析

2.1 2005—2014 年河北省植被 NPP 空间分布格局

2005—2014 年河北省各地市植被年 NPP 见表 2,河北省年 NPP 的变化范围为 271~338 g/(m²·a),10 年平均值为 314 g/(m²·a),年 NPP 最大值出现在 2012 年,为 338 g/(m²·a),最小值出现在 2007 年为 271 g/(m²·a)。10 年平均 NPP 分布(图 2)在全省呈现北高南低的趋势,其中不低于河北省 10 年 NPP 均值[314 g/(m²·a)]的地市有张家口市、承德市、秦皇岛市、唐山市,最低值出现在衡水市为 235 g/(m²·a)。

由图 2 可知,河北省的东北部地区形成了一个 NPP 高值区,其中承德市北部、秦皇岛市东部年均 NPP 在 400 g/(m²·a)以上;在河北省西南边界(太行山东侧)形成了一个 NPP 高值带,年均 NPP 在 300 g/(m²·a)以上。由该高值带向东的平原地区主要为人

工作物,其年均 NPP 为 200~300 g/(m²·a),其中在廊坊市南部—沧州市西部、邢台市东部、邯郸市中部形成了 3 个 NPP 低值区,年均 NPP 在 200 g/(m²·a)以下。

2.2 2005—2014 年河北省植被 NPP 年际变化

由图 3 可知,河北省 2005—2014 年的 NPP 最大值和均值呈现在波动中微弱上升的趋势。NPP 均值年际间变化波动性较小,在 2012 年出现最大值,为 337.63 g/(m²·a),其次是 2008 年为 337.40 g/(m²·a),在 2007 年出现最低值,为 270.72 g/(m²·a)。NPP 最大值的波

动趋势与 NPP 均值的波动趋势呈现出密切的相关性,并在 2012 年出现最大值为 846.50 g/(m²·a)。

通过对气温、降水数据进行统计,在 2005—2012 年中,河北省平均气温在 2007 年最高,为 10.68℃,平均降水较少,为 471.45 mm;2008 年河北省平均气温为 10.07℃,平均降水较多,为 522.46 mm;2012 年河北省平均气温为 9.25℃,平均降水最多,为 624.20 mm,大致反映了一定范围内气温的降低、降水的增多与植被 NPP 增长有密切关系。

表 2 2005—2014 年河北省植被年 NPP g/(m²·a)

地区	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	平均
河北省	319	308	271	337	302	302	324	338	334	304	314
邯郸市	290	298	260	276	262	271	290	288	229	292	276
邢台市	267	264	223	270	254	264	261	265	227	265	256
石家庄市	276	288	229	316	293	253	290	288	274	245	275
衡水市	250	217	195	255	244	236	231	231	241	252	235
保定市	290	282	243	325	301	268	315	320	317	258	292
沧州市	256	215	212	265	242	232	232	242	242	231	237
廊坊市	244	249	206	254	238	219	256	258	250	187	236
张家口市	311	305	263	331	279	313	309	338	370	317	314
承德市	411	395	344	433	379	389	428	448	444	403	407
秦皇岛市	417	364	384	425	383	374	410	441	423	353	397
唐山市	323	314	290	346	309	290	328	341	335	284	316

像元面积占 42.47%,变化率大于 10%的像元面积占 43.03%。表明这 10 年间河北省 42.47%的区域 NPP 比较稳定,43.03%的区域 NPP 呈明显的上升趋势。

由图 4A 可以看出,河北省的西北部区域和东南边界一带的 NPP 呈明显的上升趋势,变化率主要为 10%~30%,部分地区大于 30%;NPP 变化率小于-30%的地区主要分布在沧州市西部、石家庄市西南部、邢台市西部、邯郸市南部,这些区域占研究区总面积的 2.69%。

为了探究 2005—2014 年 10 年间 NPP 变化率呈现如此空间分布的原因,对与植被生长息息相关的两个气候因子——气温、降水作线性回归分析。利用 2005—2012 年气温、降水插值栅格图像逐像元进行一元线性回归分析,计算每个像元在 8 年间的变化率,由图 4B 可以看出,河北省绝大部分地区气温呈下降趋势,其中河北省西北部地区气温下降趋势最为显著;由图 4C 可以看出,河北省大部分地区降水呈上升趋势,其中在张家口市西北部、沧州市南部、衡水市南部、邢台市东部区域降水呈显著上升趋势,这些区域与 NPP 变化率大于 10%的区域对应。降水量的增加为植被生长提供了更加充足的水分,气温降低则会减少植被的水分蒸发量,这两个因素共同影响着植被 NPP 的变化。

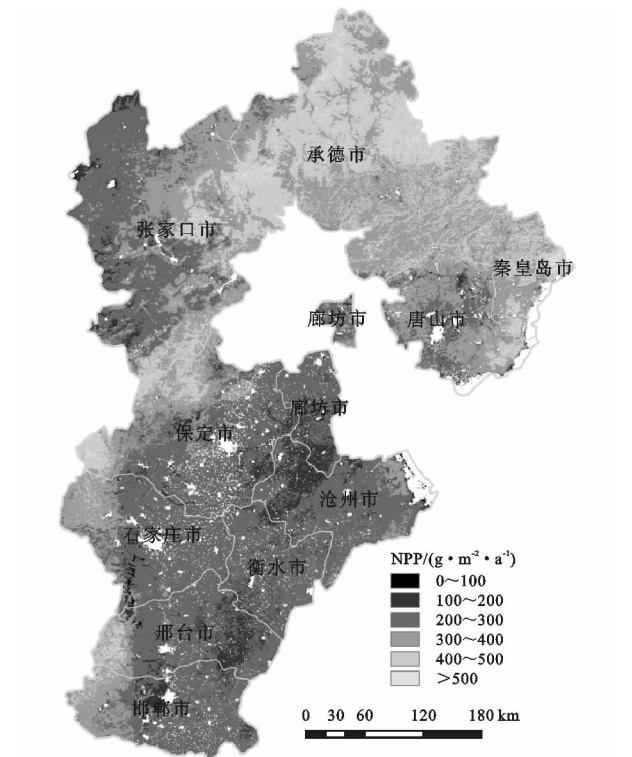


图 2 2005—2014 年河北省年平均植被 NPP 分布

2.3 河北省植被 NPP 年际变化率分析

对 NPP 年际变化率结果(图 4A)统计分析得到表 3,2005—2014 年间 NPP 的变化率在-10%~10%的

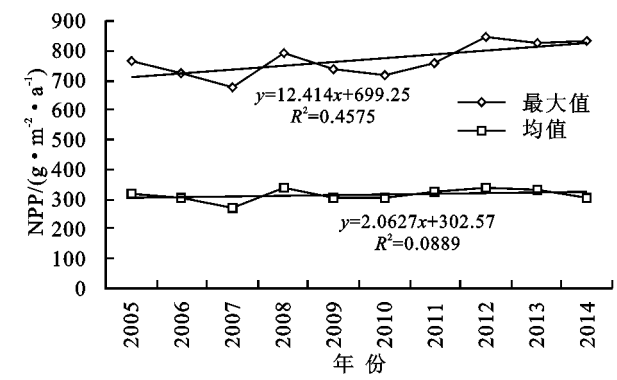


图 3 2005—2014 年河北省年均 NPP 值变化

表 3 2005—2014 年河北省植被 NPP 变化百分率所占比例

变化率	<-30	-30~-10	-10~10	10~30	>30
所占比例	2.69	11.80	42.47	40.47	2.56

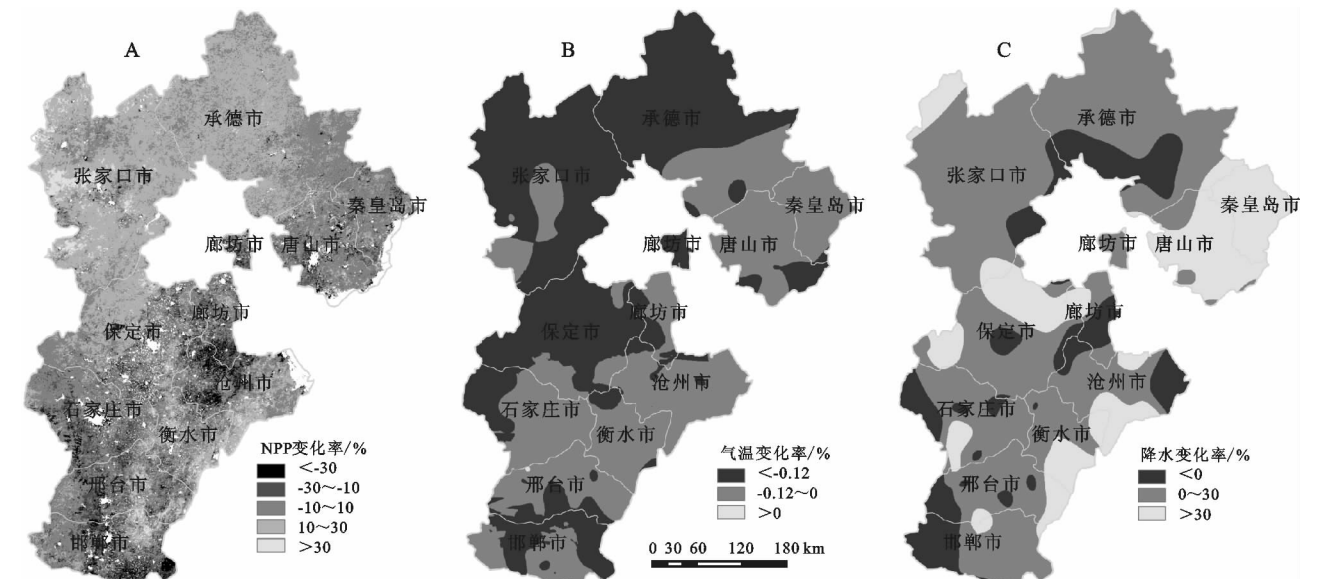


图 4 2005—2014 年河北省植被 NPP 变化百分率、气温与降水年际变化率分布

根据 MCD12Q1 数据集可知,针叶林、灌丛在河北省植被覆盖中占比极少,且大多分布在阔叶林的周围,由于混合像元的存在,在统计其 NPP 时可能混入了阔叶林的 NPP,导致其 NPP 贡献率上升。

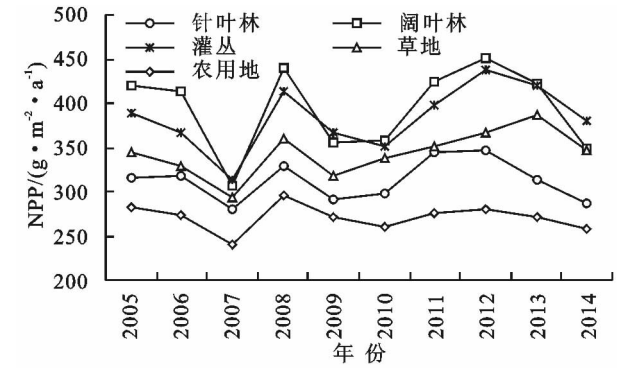


图 5 不同植被类型 NPP 年际变化

2.5 NPP 与气候因子相关性分析

由图 6A 可知,NPP 与气温呈中度负相关和高度负

2.4 不同植被类型 NPP 变化分析

利用 2005—2013 年 MCD12Q1 土地覆盖数据对 2005—2014 年 NPP 数据进行分区统计,由于缺失 2014 年的 MCD12Q1 数据,考虑到相邻年间土地覆盖的差别不大,故用 2013 年的 MCD12Q1 数据对 2014 年的 NPP 数据进行分区统计。统计结果见图 5,不同植被类型的 NPP 差异较大,其中阔叶林、灌丛的年 NPP 的较高,约为 400 g/(m²·a),其次是草地约为 325 g/(m²·a),农用地的年 NPP 最低,约为 275 g/(m²·a)。所有植被类型的 NPP 都在 2007 年形成一个低谷,在 2008 年急剧上升达到峰值,又在 2010 年形成一个低谷,然后上升在 2012 年达到峰值。与河北省全省范围内 NPP 均值的年际波动情况完全符合。

相关的区域主要分布在冀西北地区,面积约占整个研究区总面积的 63.33%,下垫面主要为草地。NPP 与气温呈低度相关(相关系数为-0.3~0.3)的区域主要分布冀东南地区,面积约占研究区总面积的33.65%,下垫面主要为农用地。NPP 与气温呈中度正相关及高度正相关的区域主要分布在河北省东南边界,面积约占 3.02%,下垫面主要为农用地。

由图 6B 可知,NPP 与年降水呈中度负相关和高度负相关的区域主要分布在河北省西南边界与东南边界处,面积约占整个研究区总面积的 11.50%,下垫面主要为农用地、林地。NPP 与年降水呈低度相关(相关系数为-0.3~0.3)的区域面积约占研究区总面积的 42.57%,下垫面主要为农田和草地。NPP 与年降水呈中度正相关和高度正相关的区域分布广泛,面积占 45.94%,下垫面主要为草地、农田。

整体来看 NPP 与气温主要呈负相关(面积占 87.05%),与降水主要呈正相关(面积占 73.37%),这种现象在张家口市、承德市表现最为明显。这两个区域植被覆盖多为自然状态下的草地与林地,气

温、降水成为限制植被生长的最重要的两个因素。一定范围内的温度的降低,降水量的增多为植被生长提供了更为充足的水分,进而增加植被 NPP 的积累速度^[16]。

表 4 NPP 与两种气候因子相关性所占面积的比例 %

项目	负相关			正相关		
	高度负相关	中度负相关	低度负相关	低度正相关	中度正相关	高度正相关
范围	<-0.8	-0.8~-0.3	-0.3~0	0~0.3	0.3~0.8	>0.8
气温	4.36	58.97	23.72	9.93	2.99	0.03
降水	0.46	11.04	15.14	27.43	44.33	1.61

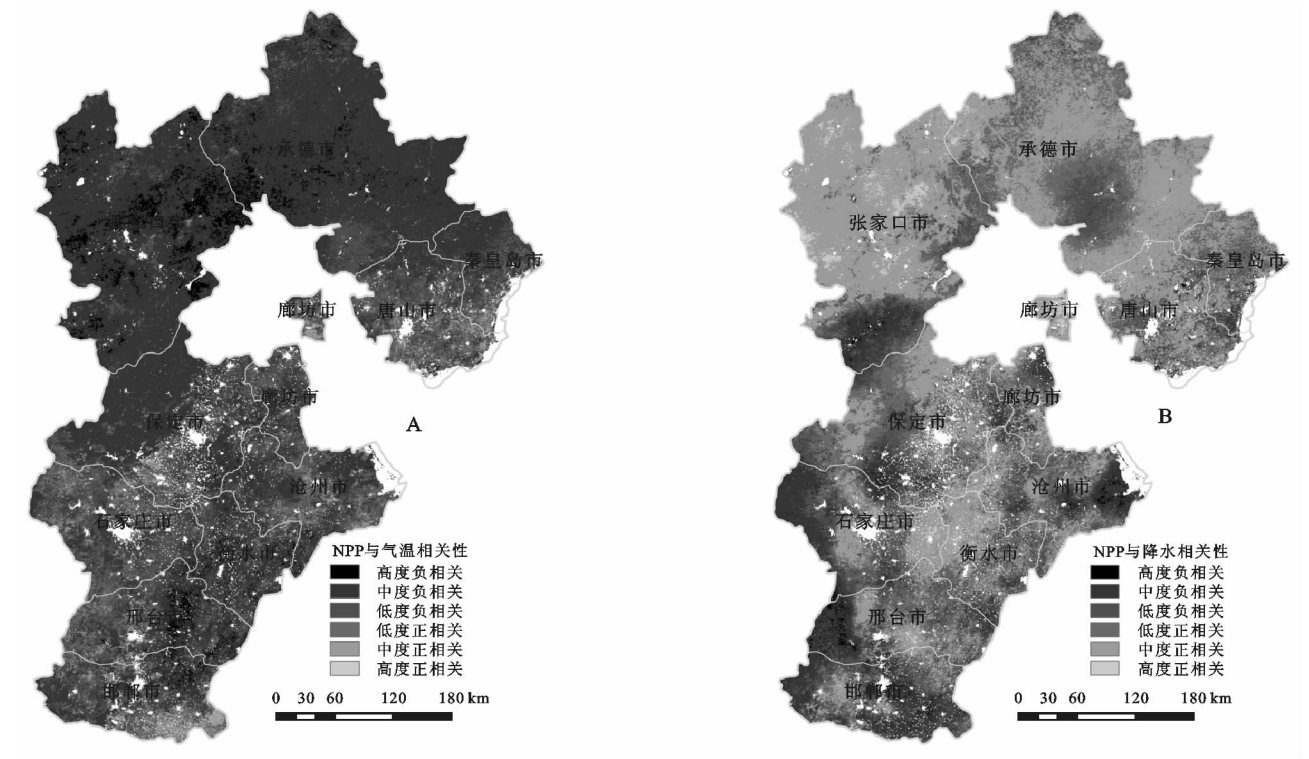


图 6 多年 NPP 与气温、降水的相关性分布

3 结论

(1) 2005—2014 年河北省及各地市年 NPP 主要集中在 200~400 g/(m²·a)。河北省 NPP 年均值与最大值均在波动中微弱上升,年均值在 2012 年最大为 337.63 g/(m²·a),在 2007 年最低为 270.72 g/(m²·a)。河北省 10 a 平均 NPP 大于 300 g/(m²·a)的区域分布在燕山北部和太行山东侧;廊坊市、沧州市、邢台市的部分地区 NPP 小于 200 g/(m²·a);其他地区 NPP 主要在 200~300 g/(m²·a)。

(2) NPP 呈增加趋势的区域分布在河北省西北部和东南边界,NPP 增长率大于 10%的面积占研究区总面积的 43.03%。5 种植被类型的 NPP 随年际变化的波动情况相同,其中阔叶林年均 NPP 最高,农用地年均 NPP 最低。

(3) 河北省植被 NPP 与气温呈中度负相关和高

度负相关的面积占 63.33%,下垫面主要为草地,与降水主要呈中度正相关和高度正相关的面积占 45.94%,下垫面主要为草地和农田。

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] 刘春雨,董晓峰,刘英英. 不同尺度视角下大敦煌 NPP 分布格局研究[J]. 资源科学,2014,36(2):406-412.

[3] 李刚,周磊,王道龙,等. 内蒙古草地 NPP 变化及其对气候的响应[J]. 生态环境,2008,17(5):1948-1955.

[4] 陈福军,沈彦俊,李倩,等. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J]. 地理科学,2011,31(11):1409-1414.

[5] 施新民,黄峰,陈晓光,等. 气候变化对宁夏草地生态系统的影响分析[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(2):65-69.

(下转第 120 页)

- [8] 杜军,路红亚,建军. 1961—2012 年西藏极端降水事件的变化[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 990-1002.
- [9] 任正果,张明军,王圣杰,等. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 640-649.
- [10] 袁文德,郑江坤,董奎. 1962—2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 766-772.
- [11] 王炳钦,江源,董满宇,等. 1961—2010 年北方半干旱区极端降水时空变化[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 913-920.
- [12] 赵安周,朱秀芳,潘耀忠. 1965—2013 年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1): 43-50.
- [13] 余敦先,夏军,张永勇,等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化特征及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [14] 于泽兴,胡国华,陈肖,等. 近 45 年来浏阳河流域极端降水变化[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 139-143.
- [15] 李胜利,巩在武,石振彬. 近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 120-127.
- [16] 余卫东,柳俊高,常军,等. 1957—2005 年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 913-920.
- [17] 朱叶玉,顾万龙,王记芳,等. 河南省汛期极端降水事件分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 913-920.
- [18] Ghosh M, Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Publications of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [19] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scalling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3): 350-363.
- [20] 韩艳,赵国永,江蕾蕾,等. 1951—2013 年河南省降水量时空变化特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(25): 235-240.

~~~~~

(上接第 114 页)

- [6] 王建国,樊军,王全九,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被地上生物量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 556-564.
- [7] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [8] 李世华,牛铮,李壁成. 植被净第一性生产力遥感过程模型研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 126-128.
- [9] Yuan J, Zheng N, Wang C. Vegetation NPP distribution based on MODIS data and CASA model: A case study of northern Hebei Province[J]. Chinese Geographical Science, 2006, 16(4): 334-341.
- [10] 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.
- [11] 王亚林,龚容,吴凤敏,等. 2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 925-937.
- [12] 谢军飞,李薇. 年均气温空间插值方法的比较分析: 以北京为例[J]. 生态科学, 2013, 32(6): 752-756.
- [13] 刘劲松,陈辉,杨彬云,等. 河北省年均降水量插值方法比较[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3493-3500.
- [14] 张莎,袁金国,张宇佳,等. 河北省 2001—2010 年植被 NPP 时空变化及与气候因子相关性分析[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2014, 34(5): 516-523.
- [15] 穆少杰,李建龙,杨红飞,等. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 6-15.
- [16] 吴楠,高吉喜,苏德毕力格,等. 长江上游植被净初级生产力年际变化规律及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 389-396.