

中国生态系统 GPP 变化热点区域检测与归因分析*

赵泉博 朱秀芳[†] 谢 天 颜辰亦

(北京师范大学地理科学学部, 100875, 北京)

摘要 结合趋势分析与热点分析检测中国 GPP 变化的热点区域,从热点区和像元 2 个尺度探讨了自然和人类活动对热点区域 GPP 变化的影响.结果表明:1982—2017 年中国 GPP 总体呈增加趋势,变化均值为 $1.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;GPP 正向变化的热点区域位于川西高原、黄土高原、华北平原及云贵高原;GPP 负向变化的热点区域位于藏南、长江三角洲和东南沿海地区;研究考虑的 3 个自然因子中,气温与 GPP 相关程度最高;以气温和人类活动为主导因素的像元比例最高,达 43.86%.气温和人类活动在各热点区域的影响方向不同,总体上在 GPP 显著增加的 4 个热点区域都起到了促进作用,在 GPP 显著减少的 3 个热点区域都起到了负面影响.

关键词 总初级生产力;趋势分析;热点分析;突变点监测;相关分析

中图分类号 P942

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021101

陆地生态系统为人类的生存与持续发展提供了物质基础,在全球碳循环中发挥着重要作用,是大气中 CO_2 等气体的重要来源^[1].植物作为陆地生态系统中重要的组成部分,通过光合作用吸收 CO_2 并转化为有机物,对生物圈的物质循环和能量流动起关键作用,是全球变化与陆地生态系统关系研究的重点^[2].陆地生态系统初级生产力是陆地生态系统与大气之间进行碳素交换的主要途径^[3],是描述生态系统碳吸收能力的主要指标.其中,总初级生产力(gross primary production, GPP)指一定时间内植物通过光合作用所固定的有机碳总量. GPP 能够有效表征生态系统中的植被生产力状况,反映了自然环境下陆地生态系统的生产力水平^[4].研究初级生产力的时空变化及其驱动机制,不仅有利于理解生态系统碳循环过程对气候变化和人类活动的响应^[4-5]及生态系统碳循环的生物化学动态过程^[6],还可以为评价生态工程成效和制定生态环境保护政策等提供科学依据^[7-8].

目前,国内外关于生态系统 GPP 研究主要集中在遥感模型模拟^[9]、时空变化特征^[10-11]及其与主要影响因子的响应关系^[12]等.对于生态系统 GPP 的影响因素,已有的研究多探究其与气候因子之间的关系.如: Yao 等^[13]研究了 1982—2015 年中国 GPP 与气候的关系,发现 GPP 年际变化的主要驱动因素是温度的区域面积最大; Jia 等^[14]分析了气候变化、 CO_2 体积分数和土地利用

覆盖变化对 1981—2010 年中国 GPP 的影响,发现气候变化是 GPP 年际趋势、年际变化和季节变化的主导控制因素; Mo 等^[15]模拟分析了 2000—2013 年中国植被 GPP 的变化,发现 GPP 的年际变化与降水和叶面积指数呈较强的相关关系;刘刚等^[16]对 2001—2014 年中国植被 NPP 进行了估算,分析了其与气温、降水的相关性; Xie 等^[17]探讨了人类活动对植被生产力的影响,估算 1982—2017 年中国三北地区 GPP 时空变化,发现气候变化、 CO_2 体积分数和人类活动在不同子区域对 GPP 趋势的贡献有显著差异;陈探等^[18]对沈阳经济区的土地利用和植被净初级生产力的关系进行了研究; Liu 等^[19]对武汉地区的土地利用和植被 GPP 的关系进行了研究;周夏飞等^[20]研究了黄土高原退耕还林工程累积造林面积与植被净 GPP 的变化情况;王耀斌等^[21]通过设置城市缓冲区研究了秦巴山区人类活动对植被净 GPP 的影响;裴凤松等^[22]对长江三角洲城市建成区绿化覆盖率和植被 GPP 的关系进行了研究.虽然针对生态系统 GPP 的研究在多尺度、多区域上均有开展,但已有的研究多数从一定的研究区域出发,先依据特定的方式,如经济区位^[18, 22]、地形地貌单元^[5, 21, 23]、河流流域^[24]、自然保护区^[8]等,确定研究区域后再进行分析.已有研究鲜见在全国尺度分离出 GPP 显著变化的热点区域,横向比较不同 GPP 显著变化区域的 GPP 变化成因差异.

* 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202010027004)

[†] 通信作者:朱秀芳(1982—),女,博士,副教授,研究方向:遥感应应用. E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-26

综上所述,本研究通过识别 GPP 显著增加和减少的热点区域,在像元和区域尺度探讨 GPP 变化的影响因子,比较分析不同热点区域、不同尺度下各因子对 GPP 变化的贡献率大小,以及不同因子之间的交互影响.本研究可以为深入探索我国陆地生态系统 GPP 变化情况及其与人为因素、自然因素的内在联系,改善生态环境、合理开发和利用自然资源,制定相关的政策^[8]等提供理论依据.

1 数据与预处理

本文共使用了 4 种数据:

1) GLASS GPP 产品,时间范围为 1982—2017 年,空间分辨率 0.05°. 该套数据基于 EC-LUE 模型生产^[25],数据精度较高且无缺失值,能够进行长时间序列的分析.

2) 来源于欧洲中期天气预报中心的 ERA 5 月尺度再分析气象数据集^[26],分辨率为 0.25°,具体包括 2 m 气温、平均总降水量和表面净太阳辐射 3 个产品.

3) 来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心的分辨率为 1 km 的 1980 和 2015 年的土地利用覆盖数据.

4) 来源于美国国家地理数据中心 1 km 分辨率的 1992—2013 年 DMSP/OLS 数据.

数据预处理包括:

1) 使用 ArcGIS10.4 提取研究区范围内的气象数据.

2) 对月降水数据求和得到年总降水量,对月尺度气温和净太阳辐射求均值得到年均温和年均净太阳辐射,在此基础上进行投影变换并将其重采样至与 GPP 数据分辨率一致.

3) 对于土地利用覆盖数据首先将耕地、林地、草地类型合并为植被类型,其他土地利用类型合并为非植被类型,然后通过叠置分析建立土地利用转移矩阵,评价植被的变化情况.

4) 对于夜间灯光数据,由于 DMSP/OLS 使用了多组传感器数据且传感器未经过星上定标,各期影像之间缺乏可比性,参考卢秀等^[27]的研究,对数据的饱和问题和连续性问题进行了校正.

2 技术路线

利用长时间序列 GPP 数据,在趋势分析基础上分离出中国范围内 GPP 变化的热点区域.引入土地利用和夜间灯光数据作为人为驱动力的表征,结合气温、降水和净太阳辐射等自然因子,从像元和热点区域 2 个尺度定量分析不同因素单独和交互作用对 GPP 的影响.技术路线如图 1 所示,具体步骤包括:

1) GPP 变化热点区域识别.使用 Theil-Sen median

(Sen)方法^[10]逐像元计算中国陆表 GPP 变化趋势,并结合 Mann-Kendall(M-K)方法^[10]进行显著性检验,对于通过显著性检验($P < 0.01$)的像元,使用热点分析识别具有统计显著性的热点和冷点集聚区,提取面积 $> 10\,000\text{ km}^2$ 的热点和冷点集聚区域作为后续研究中关注的 GPP 变化热点区域. M-K 检验是一种被广泛应用于长时间序列的趋势检测分析中的非参数统计检验方法,可计算时间序列变化的显著性并不受离群值影响; Sen 方法得到序列斜率的中值并减少测量误差和异常数据的干扰;热点分析基于局域关联指数 Getis-Ord G_i^* ^[28],该方法被广泛用于测量极值点集聚分布形成的具有统计学意义的高值区和低值区.

2) 热点区域 GPP 和影响因子的变化特征分析.逐年计算各个热点区域的 GPP、GPP 残差、气温、降水和净太阳辐射的趋势值,分析其变化趋势,并使用 M-K 突变点检验^[29]分析各热点区域 GPP、GPP 残差、气温、降水和净太阳辐射的均值的突变时间.使用 1980 和 2015 年 2 期土地利用覆盖数据,建立转移矩阵分析热点区域的植被变化情况.使用夜间灯光数据表征人类活动强度,基于趋势分析得到夜间灯光数据的变化趋势.将残差分析得到的 GPP 残差表征人类活动对 GPP 的作用, GPP 残差 > 0 、 < 0 或 $= 0$ 时分别表示人类活动对 GPP 产生正向、负向影响或无影响.

3) 热点区域的像元尺度驱动力分析.使用相关分析计算气温、降水、净太阳辐射与 GPP 之间的相关系数,以表征自然因子对 GPP 的影响程度^[10].由于自然因素之间通常具有交互作用,在相关分析的基础上,使用偏相关系数表征剔除其他变量影响时 2 个变量的相关程度;使用复相关系数表征不同自然因子对 GPP 之间的交互影响程度.逐像元对自然因子和 GPP 做相关分析并进行显著性检验,将 3 个自然因子与 GPP 的显著性复相关系数记作 P_1 .使用多元线性回归拟合 GPP 和气温、降水和净太阳辐射之间的回归方程,得到气温、降水和净太阳辐射 3 个因子的标准回归系数(b_1 、 b_2 和 b_3).通过残差分析得到各像元 GPP 的残差序列,并进行显著性检验,记残差趋势显著性值为 P_2 .设定如图 1 所示的判定规则逐像元进行 GPP 变化主导影响因素分析.若 $P_1 < 0.05$ 且 $P_2 < 0.05$,说明 3 个自然因子和 GPP 的复相关系数和残差的趋势均通过 0.05 水平的显著性检验,3 个自然因子和人类活动均对 GPP 的变化有显著贡献;若 $P_1 < 0.05$ 且 $P_2 > 0.05$,说明 3 个自然因子对 GPP 的变化有显著贡献.进一步比较 3 个因子的标准回归系数 b_1 、 b_2 和 b_3 .若 b_1 最大,则认为气温和人类活动是主导影响因素;若 b_2 最大,则认为是降水和人类活动是主导影响

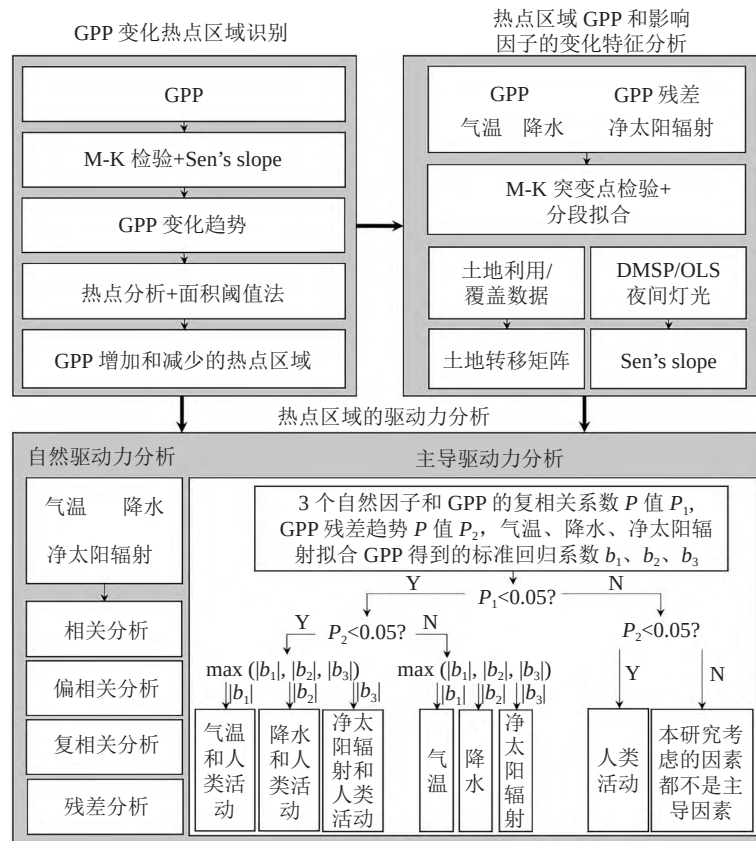


图1 技术路线

因素;若 b_3 最大,则认为日照和人类活动是主导影响因素.若 $P_1 > 0.05$ 且 $P_2 < 0.05$,说明只有残差的趋势通过了 0.05 水平的显著性检验,认为人类活动对 GPP 变化有显著贡献;若 $P_1 > 0.05$ 且 $P_2 > 0.05$,说明 3 个自然因子和 GPP 的复相关系数和残差的趋势均未通过 0.05 水平的显著性检验.本研究所考虑的因子对 GPP 的变化的贡献均不显著.

3 研究结果与分析

3.1 GPP 变化热点区域识别 趋势分析显示有 33.89% 的区域通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验(图 2-a),与 Yao 等^[13] 基于涡流通量数据反演得到的 1982—2015 年中国 GPP 变化趋势分布格局相似.基于热点分析,结合面积阈值法提取出 7 个 GPP 变化显著的区域(图 2-b).其中,4 个 GPP 显著增加的区域分别位于四川西部和青海东南、西藏东北部(I1,简称川西高原区)、黄土高原及汾渭谷地(I2,简称黄土高原区)、华北平原(I3)和云贵高原(I4),变化趋势值分别为 7.64、8.48、8.69 和 $7.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.3 个 GPP 显著减少的区域主要位于藏南地区(D1)、长江三角洲(D2)和珠江三角洲及福建沿海地区(D3,简称东南沿海区),其 GPP 变化趋势值分别为 -7.25、-8.05 和 $-6.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.所有的热点区域 GPP 变化趋势值绝对值都显著高于全国的

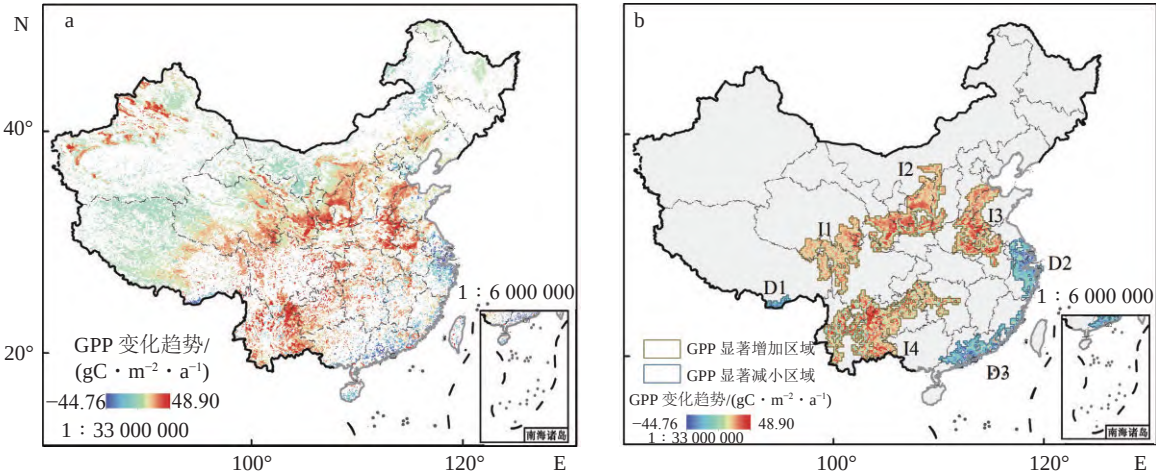
均值 $1.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

3.2 热点区域 GPP 和潜在影响因子的变化特征分析

3.2.1 热点区域 GPP 变化特征分析 M-K 突变分析和残差分析结果(图 3)显示,各热点区域 GPP 和 GPP 残差的逐年变化趋势相似,且突变时间点接近,相差均 $< 5 \text{ a}$.除长江三角洲和藏南地区 GPP 变化趋势分别在 1999 和 2010 年出现由正向转为负向的变化外,其他热点区域突变年份前后变化趋势未发生改变.除藏南地区外,其他区域残差值变化趋势均极显著,说明人类活动在这些地区对 GPP 有重要影响.

3.2.2 热点区域自然因子变化特征分析 热点区域气温、降水、净太阳辐射的突变时间点,突变点前后和整个时间序列的变化趋势如图 4 所示.1982—2017 年,所有热点区域的气温均显著上升,而降水的变化在不同地区趋势有所不同.除华北平原和藏南地区,净太阳辐射都有显著增加.其中,川西高原、东南沿海、华北平原、云贵高原、长江三角洲气温突变点,以及川西高原、云贵高原净太阳辐射突变时间点和对应区域 GPP 突变点很接近,相差 $< 3 \text{ a}$.

3.2.3 热点区域人类活动变化特征分析 在 GPP 变化热点区域中,植被和非植被之间的土地利用类型转移总面积约为 3.52 万 km^2 (图 5-a),占研究区总面积的 2.55%.在 GPP 显著减小的区域中,土地利用类型



a. 通过($P<0.01$)M-K 显著性检验的像元分布; b. GPP 变化热点区域.

图 2 GPP 变化热点区域识别

热点区	GPP	GPP 变化趋势				GPP 残差变化趋势			
		突变时间	突变前	突变后	整体	突变时间	突变前	突变后	整体
GPP 增加 热点区域	川西高原	2001				2000			
	黄土高原	2003				2007			
	华北平原	1994				1990			
	云贵高原	1995				1995			
GPP 减少 热点区域	藏南地区	2010				2011			
	长三角	1999				2004			
	东南沿海	1991				1996			

图例

0.01 水平显著上升 0.05 水平显著上升 不显著上升 0.01 水平显著下降 0.05 水平显著下降 不显著下降

图 3 热点区域 GPP 和 GPP 残差 M-K 突变点检验结果

热点区		气温	气温变化趋势			降水	降水变化趋势			净太阳辐射	净太阳辐射变化趋势		
		突变时间	突变前	突变后	整体	突变时间	突变前	突变后	整体	突变时间	突变前	突变后	整体
GPP 增加 热点区域	川西高原	2002				1984				2000			
	黄土高原	1993				2001				1996			
	华北平原	1996				2005				1991			
	云贵高原	1997				2001				1997			
GPP 减少 热点区域	藏南地区	2005				2000				1998			
	长三角	1996				1995				1991			
	东南沿海	1993				1985				1988			
图例		0.01 水平显著上升0.05 水平显著上升不显著上升						0.01 水平显著下降0.05 水平显著下降不显著下降					

图 4 热点区域自然因子 M-K 突变点检验结果

的转移方向主要是植被向非植被转移,净转出面积约 1.50 万 km^2 , 占区域总面积的 7.40%。其中,长江三角洲和东南沿海热点区域建设用地面积显著上升,城市化进程迅速,由植被转为非植被类型的土地面积是非植被转为植被类型的 20 倍以上。在 GPP 显著增加的区域中,土地利用类型整体上变化较小,植被净转出面积约 0.84 万 km^2 , 占区域总面积的 0.73%。其中,川西热点区域植被面积增幅较大,植被覆盖净转入面积约 1 080 km^2 , 占区域总面积的 0.49%。I2、I3、I4 区域植被覆盖面积均有所减少,净转出面积分别占区域

总面积的 0.42%、2.33%、0.72%。热点区域内的夜间灯光强度呈现上升趋势(图 5-b)。其中长三角、珠三角地区(D2、D3)夜间灯光变化幅度最为显著,夜间灯光强度变化均值高,表明这些区域城市化程度高,受到人类活动影响的强度大。川西、藏南、云贵高原热点区域的夜间灯光强度变化幅度不明显,表明这些区域受到人类活动影响较弱。

3.3 热点区域 GPP 变化的驱动力分析

3.3.1 自然驱动因素分析 图 6 显示了热点区域 GPP 与气温、降水、净太阳辐射的简单相关、偏相关、复相关

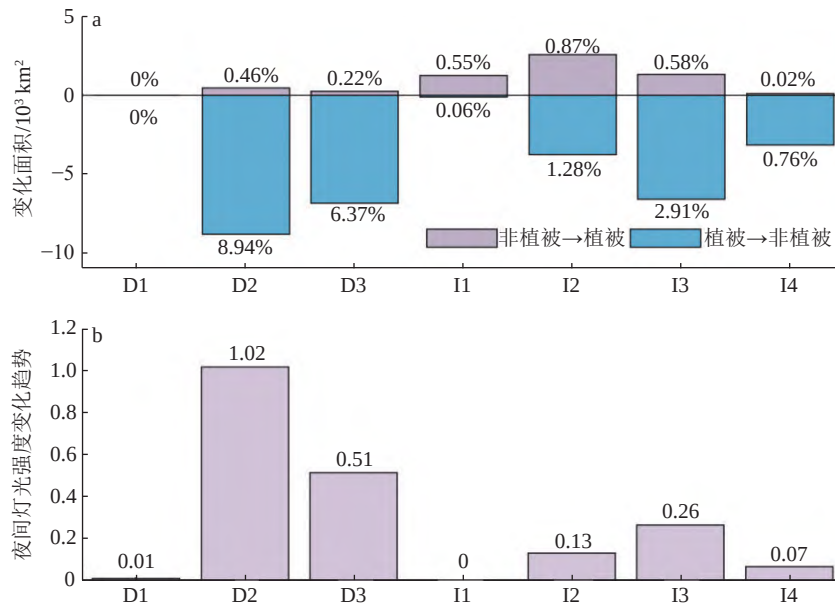
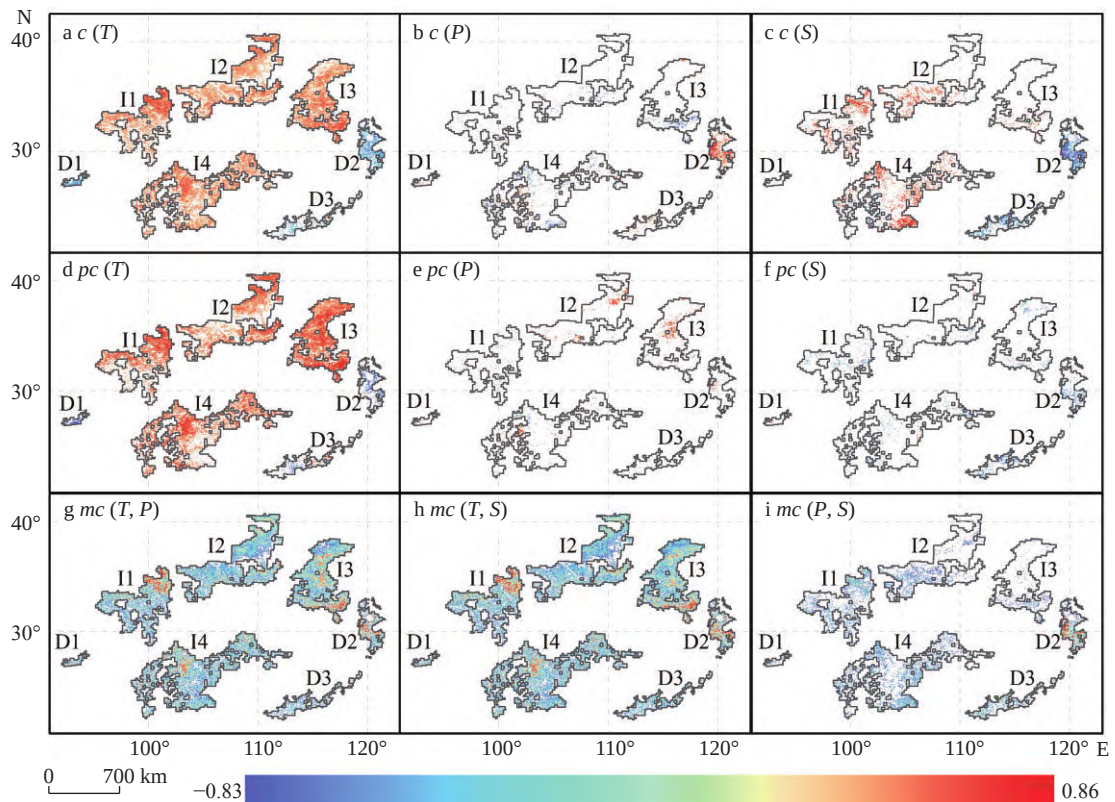


图5 热点区域植被非植被之间土地利用类型转移统计(a)和夜间灯光强度变化趋势统计(b)



显示通过 $P < 0.05$ 显著性检验的像元; c 为相关系数, pc 为偏相关系数, mc 为复相关系数。

图6 热点区域 GPP 与气温(T)、降水(P)和净太阳辐射(S)的相关分析

系数。经统计,热点区域中分别有 60.75%、9.34%、17.11% 的区域的 GPP 与气温、降水、净太阳辐射的简单相关系数通过显著性水平为 $P < 0.05$ 的检验;分别有 55.44%、5.59%、6.99% 的区域的 GPP 与气温、降水、净太阳辐射偏相关系数均通过了显著性水平为 $P < 0.05$ 的检验;分别有 73.45%、74.24% 和 26.93% 的

区域的 GPP 与气温和降水、气温和净太阳辐射、降水和净太阳辐射的复相关通过了显著性水平为 $P < 0.05$ 的检验。3 个因子中,温度与 GPP 的简单相关和偏相关最显著,包含温度时自然因子与 GPP 的复相关系数高于不包含温度时自然因子与 GPP 的复相关系数,复相关系数的值总体要高于偏相关和简单相关的

值. 由此可以看出 3 个自然因子中, 气温是与 GPP 相关程度最高的自然驱动因素, 且自然因子对植被总初级生产力的影响存在交互作用, 复合影响效果更强.

3.3.2 主导驱动因素分析 通过相关分析和残差分析得到 GPP 与 3 个自然因子的复相关系数(图 7-a)和 GPP 残差趋势(图 7-b), 基于图 1 中 GPP 像元尺度主导因素分析方法, 得到 GPP 变化的主导因素空间分布图(图 7-c)及比例分布(表 1). 在所有热点区域中, “气温和人类活动”为主导因素的区域占比最大(43.86%), 其次是“气温”(26.86%). 不同热点区域间主导因素存在差异: 在 GPP 增加的热点区域中, 占比最大的是以“气温和人类活动”为主导因素的区域(48.60%), 其次是以“气温”为主导因素的区域(26.01%). 在 GPP 减小的热点区域中, “气温”为主导因素的区域占比最大, 达 31.58%.

表 2 显示了不同 GPP 变化主导因素区的夜间灯

光强度和土地利用变化情况. 识别出的人类活动为主导因素的区域中, 校正后夜间灯光强度的平均变化高于自然因子主导及人类活动和自然因子共同主导的区域. 在不同类型主导因素区中, 植被的面积均呈减少趋势, 其中, 自然因子为主导因素的区域植被总体变化最小, 植被减少了 1.59%, 人类活动主导区域植被减少了 1.67%, 人类活动和自然因子共同主导区域植被减少了 1.86%. 以上结果间接验证了本研究 GPP 变化主导因素识别的准确性.

3.3.3 主导自然因素和人类活动对不同热点区域 GPP 变化影响方向对比分析 综合上述分析, 可以看出人类活动和气温是热点区域 GPP 变化的主导因素, 然而二者在 7 个子区域的影响方向不同. 总体来说, 对于 GPP 显著增加的热点区域, 气温和人类活动对 GPP 的增加都有促进作用, 而对于 GPP 显著减少的 3 个热点区域, 气温和人类活动都起到了负面影响.

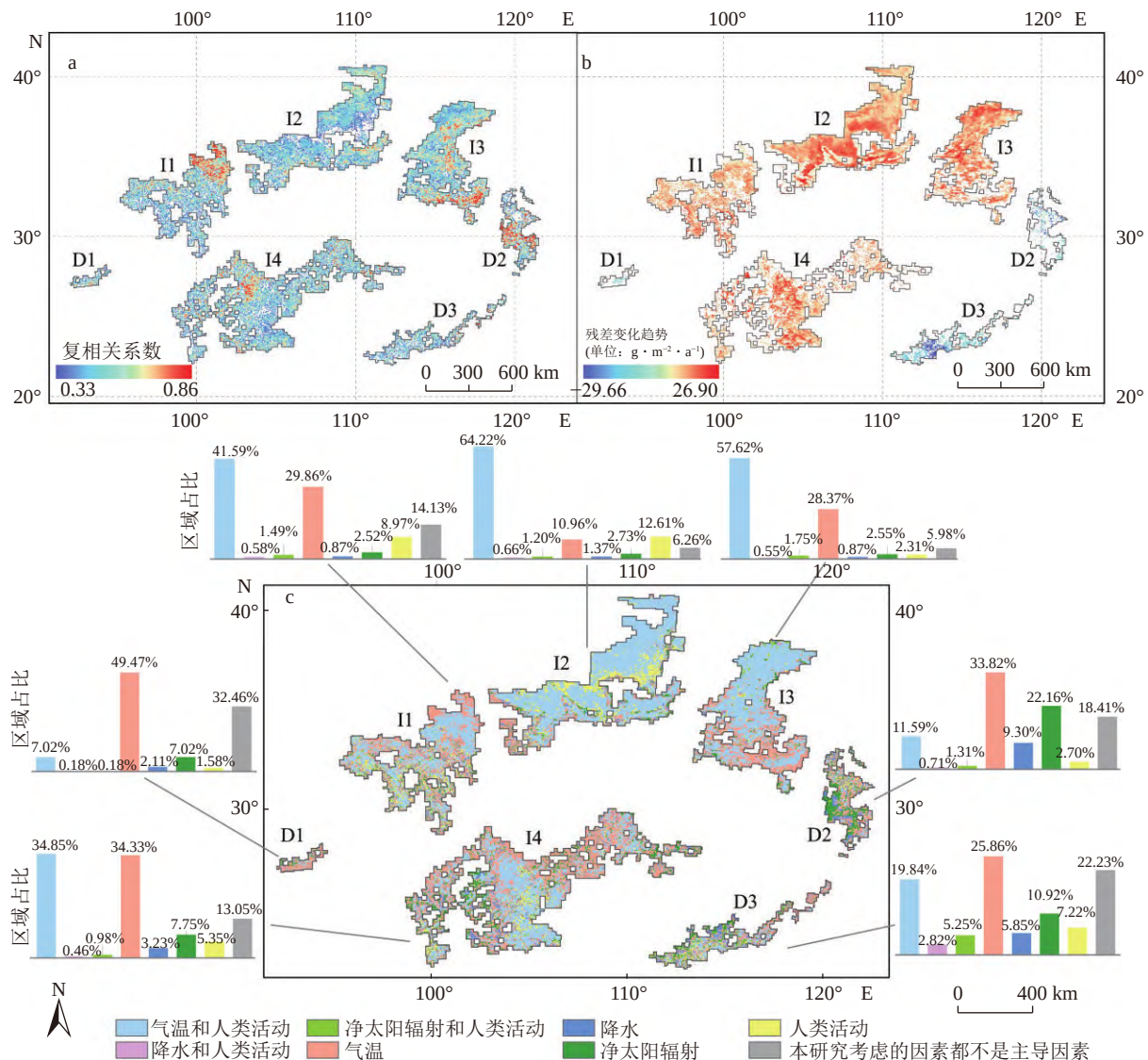


图 7 热点区域 GPP 与自然因子的复相关系数(a)、GPP 残差趋势(b)和 GPP 变化主导因素(c)空间分布

表1 热点区域 GPP 变化主导因素占比 %

主导因素	所有热点区域	GPP增加的热点区域	GPP减少的热点区域
气温和人类活动	43.86	48.60	15.01
降水和人类活动	0.69	0.55	1.65
净太阳辐射和人类活动	1.52	1.29	3.05
气温	26.86	26.01	31.57
降水	2.47	1.80	7.01
净太阳辐射	5.88	4.35	15.49
人类活动	7.01	7.38	4.71
本研究考虑的因素都不是主导因素	11.70	10.01	21.51

表2 不同主导因素区域人类活动变化情况

主导因素	夜间灯光平均强度变化趋势	植被变化百分比/% (转入-转出)
人类活动主导	1.38	-1.67
人类活动和自然因子共同主导	1.36	-1.86
自然因子主导	1.23	-1.59

就气温来看(图 6-a), 气温升高对川西高原、云贵高原、黄土高原、华北平原的 GPP 增加都有促进作用. 原因可能是对于山区和高寒草原, 冬季和春季气温偏低, 气温可能成为影响植被生长的主要限制因子^[21], 气候暖湿化使得高原区域植被 GPP 增加^[30-31], 同时也促进了华北作物复种指数提高, 周年面积产量增加^[32]. 此外, 气温升高可以减少低温冷冻灾害, 帮助越冬作物安全过冬^[33]. 全球植被生长的最适温度约为 23℃^[34], 在长江三角洲和东南沿海地区, 气温升高可能促使植被受高温胁迫, 进而降低 GPP^[34]. 藏南地区大部分区域为喜马拉雅山脉东部的茂密森林, 人类活动强度较低, 土地覆盖类型长时间内保持不变. 该热点区域光照充足, 辐射强, 日温差大, 雨季集中, 冬春季干燥多风^[35], 是森林火灾高风险区^[36]. 气温升高可能导致该地区林火频率增加, 从而减少 GPP.

就人类活动来看(图 7-b), 在 GPP 显著正向变化的热点区域, 人类活动对 GPP 的促进作用主要得益于政府大规模实施的生态环境保护工程, 如退耕还林还草工程、天然林保护工程、“三北”防护林体系建设工程等^[37]. M-K 突变点检验显示, 黄土高原和云贵高原热点区域的 GPP 分别在 2003 和 1995 年之后呈现显著增加趋势, 这与生态工程建设实施的时间段和已有研究得出的结论一致^[7, 38-39]. 在云贵高原热点区域, 喀斯特地貌土壤侵蚀导致的养分流失是植被 GPP 限制因素^[40], 石漠化治理工程的实施使植被 GPP 有了显著提高^[7]. 川西高原热点区域是黄河上游重要的水源

涵养地, M-K 突变点检验显示该地区的 GPP 正向突变发生在 2000 年, 这与该热点区域实施的退牧还草、天然草原植被恢复等工程时间范围相一致^[31], 已有研究证实这些生态工程收到了较明显的生态收益^[41]. 华北热点区域是我国重要的粮食产区, 该地区土地覆盖类型以耕地为主, GPP 残差发生突变的时间点为 1990 年, 与我国开始大量施用化肥的趋势相符^[42]. Wang 等^[43]在三江平原的研究显示, 氮沉积的增加有利于提高 GPP, 作物单产与施肥量和土壤有机碳含量显著相关^[44], 可以推测该热点区域 GPP 的增加和灌溉、化肥施用等农业管理手段密切相关^[33]. 在 GPP 显著减小的区域, 长三角和东南沿海热点区域受到城市化进程影响, 植被覆盖面积呈减少趋势. GPP 减少程度最高的区域主要出现在一些经济发展较快的区域周边, 如广州、上海、深圳、苏州等城市的周边地区, 与夜间灯光数据显示的人类活动高强度区域相符. 人类活动通过土地利用方式的改变来改变生态系统的结构、类型和功能, 从而改变植被的 GPP. 这些地区经济发展较快, 人口集中, 城市化快速发展, 建设用地规模快速扩张, 使得区域 GPP 减少^[45].

4 结论与讨论

4.1 结论 本文在全国尺度上关注不同类型 GPP 变化(增加和减少)的热点区域, 引入土地利用土地覆盖和夜间灯光数据作为人为驱动力, 结合气温、降水和日照等自然因素, 利用不同的统计分析方法, 从像元和热点区域 2 个尺度, 定量分析不同因素单独和交互作用对 GPP 的影响, 横向对比了不同热点区域 GPP 变化的驱动力. 得到的主要结论如下:

1) 1982—2017 年 72.14% 的区域 GPP 变化趋势为正向, 中国 GPP 总体呈增加趋势.

2) 识别得到川西高原、黄土高原、华北平原及云贵高原 4 个 GPP 呈显著增加趋势的热点区域和藏南、长三角和东南沿海 3 个 GPP 呈显著减少趋势的热点区域.

3) 在所研究的 3 个自然因子中, 气温与 GPP 变化的相关程度最高, 其次是净太阳辐射.

4) 气温和人类活动是主导各热点区域 GPP 变化的主要驱动因素. 在不同的热点区域人类活动对植被 GPP 的影响方式不同, 总体上生态工程 and 环境保护措施起到了正向影响, 而城市化和建设用地扩张带来的植被覆盖面积减少造成了负面的效应.

4.2 讨论 本研究尚存在如下不足.

1) 本研究使用的 GLASS 产品的 AVHRR GPP 栅格数据集是基于气温、PAR(光合作用有效辐射)等

参量反演得到的产品,所使用的气候数据来自于欧洲中期天气预报中心(ECWMF)推出的第 5 代再分析产品 ERA5. 原始数据集的精度及数据本身存在的误差会影响本研究的结果.

2)灯光数据和土地利用覆盖数据的时间尺度与所研究的时间范围不完全匹配,可获取的数据时间范围小于 GPP 数据的时间范围,不能完全反映研究时间段内的灯光和土地利用覆盖变化情况. 在数据可用的情况下,可以扩大所分析的影响因子的时间范围,以提高分析结果的准确性.

3)对于所有热点区域而言,“本研究所考虑的因素都不是主导因素”的像元的占比为 11.70%,说明本文考虑的影响因素还不够全面,未来有必要增加更多的潜在影响因子进行分析.

5 参考文献

- [1] 李银鹏,季劲钧. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 379
- [2] LIU X F, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982-2012[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5331
- [3] 常顺利,杨洪晓,葛剑平. 净生态系统生产力研究进展与问题[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(5): 517
- [4] 刘青瑞. 中国陆地生态系统总初级生产力变化趋势及成因分析[D]. 南京: 南京大学, 2017
- [5] MO X G, LIU S X, MENG D J, et al. Exploring the interannual and spatial variations of ET and GPP with climate by a physical model and remote sensing data in a large basin of Northeast China[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6): 1945
- [6] LI F, PENG Y F, ZHANG D Y, et al. Leaf area rather than photosynthetic rate determines the response of ecosystem productivity to experimental warming in an alpine steppe[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(7): 2277
- [7] 姜岩. 生态工程下桂西北植被NPP时空演变及影响因素分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016
- [8] 祁威, 摆万奇, 张德铨, 等. 生态工程实施对羌塘和三江源国家级自然保护区植被净初级生产力的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(2): 127
- [9] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 等. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 541
- [10] 董懿, 尹冬勤, 李渊, 等. 黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 120
- [11] 王莹莹, 袁金国, 张莹, 等. 中国温带地区植被物候期时空变化特征及对总初级生产力的影响[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 377
- [12] FIBBI L, MORIONDO M, CHIESI M, et al. Impacts of climate change on the gross primary production of Italian forests[J]. *Annals of Forest Science*, 2019, 76(2): 1
- [13] YAO Y T, WANG X H, LI Y, et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 184
- [14] JIA B, LUO X, CAI X, et al. Impacts of land-use change and elevated CO₂ on the interannual variations and seasonal cycles of gross primary productivity in China[J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 2020, 11: 235
- [15] MO X, LIU S, CHEN X, et al. Variability, tendencies, and climate controls of terrestrial evapotranspiration and gross primary productivity in the recent decade over China[J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(4): e1951
- [16] 刘刚, 孙睿, 肖志强, 等. 2001—2014年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 4936
- [17] XIE S D, MO X G, HU S, et al. Contributions of climate change, elevated atmospheric CO₂ and human activities to ET and GPP trends in the Three-North Region of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 295: 108183
- [18] 陈探, 刘森, 胡远满, 等. 沈阳经济区土地利用和净初级生产力变化[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8231
- [19] LIU S S, DU W, SU H, et al. Quantifying impacts of land-use/cover change on urban vegetation gross primary production: a case study of Wuhan, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(3): 714
- [20] 周夏飞, 马国霞, 曹国志, 等. 2001—2013年黄土高原植被净初级生产力时空变化及其归因[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(14): 48
- [21] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 等. 2000—2015年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其驱动因子[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2373
- [22] 裴凤松, 王坤, 刘小平, 等. 长江三角洲城市化地区植被初级生产力的时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(6): 862

- [23] 谭森, 周启刚. 2000—2015年典型山地区域净初级生产力时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 339
- [24] 潘竞虎, 黄克军, 李真. 2001—2010年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 1888
- [25] YUAN W P, LIU S G, YU G R, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416
- [26] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present[Z]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019
- [27] 卢秀, 李佳, 段平, 等. 中国区域DMSP/OLS夜间灯光影像的校正[J]. 测绘通报, 2019(7): 127
- [28] ORD J K, GETIS A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis, 2010, 27(4): 286
- [29] 刘聚涛, 方少文, 冯倩, 等. 基于Mann-Kendall法的湖泊稳态转换突变分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3707
- [30] 徐浩杰, 杨太保. 黄河源区植被净初级生产力时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. 资源科学, 2013, 35(10): 2024
- [31] 李波, 邵怀勇. 气候变化与人类活动对川西高原草地变化相对作用的定量评估[J]. 草学, 2017(3): 16
- [32] 胡延斌, 肖国举, 李永平. 气候带北移及其对中国作物种植制度的影响研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 269
- [33] 陈实. 中国北部冬小麦种植北界时空变迁及其影响机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020
- [34] HUANG M T, PIAO S L, CIAIS P, et al. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes[J]. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(5): 772
- [35] 白玛央宗, 奚凤, 戴睿, 等. 基于遥感技术对山南地区火灾监测的个例分析[J]. 西藏科技, 2016(10): 68
- [36] 林志强, 路红亚, 罗布次仁, 等. 基于GIS的西藏地区森林火险风险区划[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2318
- [37] 金凯. 中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019
- [38] 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
- [39] 许玉凤, 张永雷, 潘网生. 云贵高原植被净初级生产力(NPP)时空格局动态变化[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(1): 96
- [40] HAO Z, GAO Y, SUN X M, et al. Determining nitrogen and carbon footprints to reveal regional gross primary productivity and differentiation characteristics in Karst and non-Karst watersheds, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 1149
- [41] 单丽燕, 负旭疆, 董永平, 等. 退牧还草工程项目遥感分析与效益评价: 以四川省阿坝县为例[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 173
- [42] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869
- [43] WANG J B, ZHU T C, NI H W, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen deposition on ecosystem carbon fluxes on the Sanjiang plain wetland in Northeast China[J]. PLoS One, 2013, 8(6): e66563
- [44] ERISMAN J W, SUTTON M A, GALLOWAY J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(10): 636
- [45] IMHOFF M L, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 434

Detection and attribution analysis of hotspots of ecosystem gross primary production change in China

ZHAO Quanbo ZHU Xiufang XIE Tian YAN Chenyi

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Terrestrial gross primary production (GPP) is a key process for understanding land ecosystem dynamics. Detecting hotspots of GPP change and analyzing impact factors are helpful to understand ecosystem carbon cycle and provide reference for ecological environment protection and management. In the present study, trend analysis and hotspot analysis were combined to detect hotspots of GPP changes in China and to analyze the impact of natural factors and human activities on GPP changes. GPP was found to have an increasing trend from 1982-2017 in China, with an average change of $1.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The hotspots with significant positive GPP change were found located in eastern Qinghai-Tibet Plateau, The Loess Plateau, North China Plain and The Yunnan-Guizhou Plateau. Hotspots with significant negative GPP change were found located in the southern part of Tibet, The Yangtze River delta and the southeast coastal areas. The combined influence of temperature, precipitation and radiation on GPP was greater than any single natural factor, correlation between temperature and GPP was the highest. The proportion of pixels with temperature and human activities as the dominant factors of GPP change was the highest, accounting for 43.86%, followed by temperature (26.86%). The influence of temperature and human activities varied in different hotspots. On the whole, they played a positive role in 4 GPP increasing hotspots and a negative role in 3 GPP decreasing hotspots.

Keywords gross primary productivity; trend analysis; hotspot analysis; mutation point monitoring; correlation analysis

【责任编辑:刘先勤】