DOI: 10.5846/stxb201906221320
叶许春,杨晓霞,刘福红,吴娟,刘佳.长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子.生态学报,2021,41(17):6949-6959.
Ye X C, Yang X X, Liu F H, Wu J, Liu J.Spatio-temporal variations of land vegetation gross primary production in the Yangtze River Basin and correlation with meteorological factors.Acta Ecologica Sinica,2021,41(17):6949-6959.

长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子

叶许春[1,*],杨晓霞[1],刘福红[1],吴　娟[1],刘　佳[2]
1 西南大学地理科学学院,重庆　400715
2 中国水利水电科学研究院/流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京　100038

摘要:长江流域是我国重要的工农业生产区和生态安全屏障。深入开展长江流域陆地植被总初级生产力(GPP)时空变化特征和驱动因子研究,对了解变化环境下区域植被生长状况和生物固碳能力、掌握生态环境质量具有重要意义。基于 MODIS GPP 遥感数据产品、土地利用和气象观测数据,采用趋势分析和偏相关分析法,系统研究了 2000—2015 年间长江流域陆地植被 GPP 时空变化特征,探讨了不同二级水资源区内气候因子对 GPP 变化影响的空间差异,揭示了不同土地利用类型 GPP 变化特征以及气候因子作用。结果表明:1)长江流域陆地植被覆盖区 GPP 在 0.3—2765 gC m^{-2} a^{-1}之间,均值约 990.46 gC m^{-2} a^{-1},多年平均 GPP 总量为 1.735 P gC;2)近年来,长江流域 GPP 呈不显著上升趋势,趋势率为 2.39 gC m^{-2} a^{-1}。空间上,GPP 上升区和下降区分别占总流域面积的 68%和 32%。各二级水资源区内,除了洞庭湖流域和太湖流域 GPP 呈下降趋势外,其他区 GPP 均呈上升趋势;3)不同土地利用类型 GPP 均值在 198.50—1276.90 gC m^{-2} a^{-1}之间。各土地利用类型中除水田 GPP 呈微弱下降外,其他均呈上升趋势,尤其是高、中、低覆盖度草地 GPP 上升趋势较为显著;4)不同气候因子对植被 GPP 变化的影响程度在不同二级水资源区、不同土地利用类型间均存在一定差异,但就长江流域整体而言,GPP 年际变化受温度影响显著,其次是蒸发,而降水等其他气候因子的影响不大。

关键词:植被总初级生产力,时空变化,趋势分析,偏相关分析,长江流域

Spatio-temporal variations of land vegetation gross primary production in the Yangtze River Basin and correlation with meteorological factors

YE Xuchun[1,*], YANG Xiaoxia[1], LIU Fuhong[1], WU Juan[1], LIU Jia[2]
1 *School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*
2 *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*

Abstract: The Yangtze River Basin is an important industrial and agricultural production area and ecological security barrier in China. Investigation of the spatio-temporal variations and driving factors of terrestrial vegetation gross primary production (GPP) is essential for understanding of vegetation growth and carbon sequestration capacity, grasping the quality of eco-environment and promoting the utilization of ecological resources. Based on MODIS GPP products, land use data and meteorological observations, the current study systematically examined the spatio-temporal variations of land vegetation GPP in the Yangtze River Basin during 2000—2015 by the application of trend analysis and partial correlation analysis. In addition, from the perspective of secondary water resource regionalization, the spatial differences of the impacts of

基金项目:国家自然科学基金项目(42071028,51822906);中央高校基本科研业务费(XDJK2019B074);中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WR0145B732017)
收稿日期:2019-06-22;　　**网络出版日期**:2021-06-11
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yxch2000@swu.edu.cn

meteorological factors on GPP change were investigated, and the characteristics of GPP change of different land use types and the effects of meteorological factors were revealed. Results showed that: 1) the vegetation GPP per unit area in the Yangtze River Basin ranged from 0.3 to 2765 gC m^{-2} a^{-1}, with an average value of 990.46 gC m^{-2} a^{-1}, and the annual mean total GPP of the basin was 1.735 P gC. 2) The GPP of the Yangtze River Basin showed an increasing trend but not significant in recent years with a linear change rate of 2.39 gC m^{-2} a^{-1}. Spatially, the increasing and decreasing areas of GPP account for 68% and 32% of the total watershed area, respectively. In each secondary water resources area, except for the Dongting Lake Basin and Taihu Lake Basin, the GPP in other areas showed an increasing trend. 3) The average GPP of different land use types ranged from 198.50 to 1276.90 gC m^{-2} a^{-1}. Except for paddy field, GPP of the other land use types showed an increasing trend, especially for grassland with high, medium and low coverage. 4) The impact of different meteorological factors on GPP changes varied obviously in different secondary water resources areas and in different land use types. However, annual variation of GPP for the whole Yangtze River Basin was significantly affected by temperature, followed by evaporation, while other meteorological factors have little influence.

Key Words: gross primary productivity (GPP); spatio-temporal variations; trend analysis; partial correlation analysis; the Yangtze River Basin

以温室气体 CO_2浓度增长为主要驱动的全球变暖现象,不仅对植物物候变化产生重要影响,而且可能导致陆地植被分布及生态质量发生明显变化[1-2]。植被总初级生产力(Gross primary productivity,GPP)是指单位时间内绿色植物通过光合作用途径所固定的有机碳总量,表征了进入陆地生态系统的初始物质和能量[3]。作为陆地生态系统吸收 CO_2的重要指标,GPP 在全球碳循环研究中具有极其重要的作用[4-6]。科学研究地表植被 GPP 时空变化规律及其对气候变化的响应,对深入理解陆地生态系统与大气之间的碳交换机理、评价陆地生态系统的环境质量以及预估未来气候变化的生态效应等具有重大意义[7-8]。近年来,随着对全球变化以及对碳循环方面的深入研究,以 GPP 和 NPP(Net primary productivity)为代表的陆地植被生产力及其对气候的响应以及与自然因素的关系逐渐成为研究重点。特别是在遥感技术的快速发展和支持下,越来越多的遥感数据被用于开展大尺度区域性植被生产力时空变化研究。MODIS 平台的 GPP/NPP 数据产品因其时空连续性好、数据精度高和获取成本低等优点,在陆地生态系统碳循环研究中被广泛应用[9-16]。众多研究结果表明,气候变化通过改变植物生长发育进程中光热和水分的匹配而影响生态系统生产力[17-18],气候因子对植被生产力的影响存在显著的时空差异[19-20],而不同植被类型生产力对气候因子的响应作用也不一致[21]。

长江流域是我国重要的工农业生产区和生态安全屏障,横贯东、中、西三大经济区。作为一个独特而完整的自然生态系统,长江流域具有强大的水土保持、生物育种、释氧固碳、环境净化等功能,对维护周边地区乃至全国的生态平衡和安全具有重要作用。关于长江流域的植被及其生产力动态变化,不少学者已开展过相关研究。如柯金虎等[22]基于生态过程模型-CASA 模型研究分析了长江流域植被 NPP 的动态变化。贾松伟[23]基于 4 次全国森林资源清查数据并结合生物量估算模型和植被含碳系数,研究了长江流域森林植被碳储量、碳密度分布特征及动态变化。Qu 等[24]研究了 1982—2015 年间以 NDVI 为表征的长江流域生长季植被覆盖度变化,结果显示受益于生态修复工程引起的土地利用变化,长江流域自 1994 年以来植被覆盖度显著上升。就气候驱动因子来看,大多研究表明温度是决定长江流域植被覆盖度的一个控制因子,而降水的影响相对较低[24-26]。这些研究对于揭示长江流域陆地生态系统及其生产力时空格局特点、变化过程及驱动机制等具有重要意义。GPP 研究能够量化植被的生长状况,是全球碳循环研究的重要组成部分,但目前对长江流域陆地生态系统 GPP 时空变异及控制因素的系统研究尚不多见。此外,长江流域地形地貌、气候条件空间分异显著,植被 GPP 变化与气候因子、土地利用类型之间关系及其空间差异如何还不清楚。为此,本文拟利用 MODIS 系列产品,并结合土地利用和气象观测数据,研究近年来长江流域 GPP 空间分异特征和时间变化规律,探讨不同土地利用类型 GPP 的变化差异,客观评价主要气候因子对陆地生态系统植被 GPP 的影响及其

空间差异,以期为了解变化环境下区域植被生长状况和生物固碳能力、掌握生态环境质量提供科学基础和参考依据。

1　研究区概况

长江是我国第一大河,世界第三长河,发源于青藏高原唐古拉山各拉丹冬雪山。长江干流自西向东流经青海、西藏、云南、四川、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏等地,于上海市注入东海,干流全长近 6400km。长江流域总面积约 180×10^4 km^2,占全国总面积的 18.75%(图 1)。流域地势西高东低,由河源至河口,总落差约 5400m,跨越中国地势的三大阶梯。流域大部分区域属于亚热带季风气候,在青藏高原的部分属于高山高原气候。流域多年平均气温呈东高西低、南高北低的分布趋势。位于江源附近气温极低,年平均气温在-4℃上下,而中下游大部分地区年平均气温在 16—18℃之间。流域多年平均降雨量约 1100mm,年降水量的时空分布很不均匀,空间上呈由西北向东南递增的趋势。

长江流域支流水系众多,不同水系子流域内地形地貌和气象条件差异显著。根据全国水资源管理区划,长江流域划分为 12 个二级水资源区:金沙江石鼓以上流域(JSJ-1)、金沙江石鼓以下流域(JSJ-2)、岷沱江流域(MTJ)、嘉陵江流域(JLJ)、乌江流域(WJ)、宜宾至宜昌段长江干流区间(UM)、洞庭湖流域(DL)、汉江流域(HJ)、鄱阳湖流域(PL)、宜昌至湖口段长江干流区间(MM)、湖口以下长江干流区间(LM)、太湖流域(TL)等(图 1)。本文后期将以此分区为依据,具体分析长江流域不同区域 GPP 变化的空间差异。

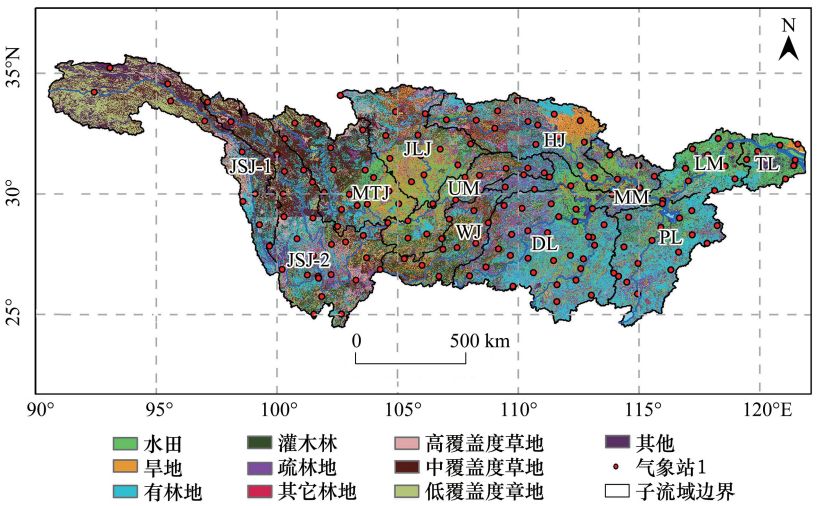

图 1　长江流域土地利用、二级水资源区划分及气象站空间分布图

Fig.1　Land use types and secondary water resources areas division of the Yangtze River Basin with distribution of meteorological stations

JSJ-1: 金沙江石鼓以上流域;JSJ-2: 金沙江石鼓以下流域;MTJ: 岷沱江流域;JLJ: 嘉陵江流域;WJ: 乌江流域;HJ: 汉江流域; DL: 洞庭湖流域;PL: 鄱阳湖流域;TL: 太湖流域 TLUM: 宜宾至宜昌段长江干流区间;MM: 宜昌至湖口段长江干流区间;LM: 湖口以下长江干流区间

2　数据及方法

2.1　数据来源及处理

本文所用的 GPP 数据来自于美国蒙大拿大学密苏拉分校地球动态数值模拟研究组(Numerical Terra dynamic Simulation Group-NTSG)发布的 2000—2015 年的 MOD17A3 全球 GPP 数据产品(Version 55)(下载网址为:http://www.ntsg.umt.edu/project/modis/mod17.php),空间分辨率为 30 弧秒(0.0083°),数据格式为 GeoTIFF,投影格式为 WGS84 投影,比例系数为 0.1。该数据的 GPP 估算模型参考利用了 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型,模型模拟得到陆地生态系统日 GPP,再进一步推算出 8 d GPP 值与年 GPP 值[27-28]。与美国

国家航空航天局(NASA)提供的 8 天和年 GPP 数据(V5)产品相比,该数据很好的消除了云对植被叶面积指数和光合有效辐射值的影响,提高了数值精度[27-29]。目前,该数据已与全球多个地区的通量站点数据进行了对比验证,在全球和区域植被生物量估算、碳循环和全球变化等研究中得到广泛应用。本研究通过对该数据进行格式转换、影像裁剪等处理,得到长江流域 2000—2015 年 GPP 年值数据集。

土地利用数据来源于中国科学院西部生态环境数据中心提供的 2010 年全国土地利用 1km 栅格数据。按照二级分类体系,将长江流域土地利用类型分为水田、旱地、有林地、灌木林、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地等 9 种,水域、裸地以及城镇等其他类型均归纳为无植被覆盖区类型(图 1)。

论文所有气象数据由中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.nmic.cn)提供,包括整个长江流域内共计 175 个气象站点的蒸发皿蒸发量、气温、降水、相对湿度、日照时数和风速等月值数据,数据时段为 2000—2015 年。各站点气候因子年平均数据由月数据汇总所得。长江流域及各二级水资源区各气候因子年平均值均由各自区域内所有气象站点实测值通过算术平均法求得。

2.2 研究方法

采用简单的一元线性回归模型($y = \alpha t + \beta$,α 为回归系数,β 为常数,t 为年份,y 为待分析变量)来分析 2000—2015 年 16 年期间长江流域 GPP 整体变化趋势及其空间异质性。该模型中的 回归系数 α 即为线性趋势斜率,其中,$\alpha<0$ 表示变量在计算时段内呈下降趋势,反之 $\alpha>0$ 表示增加趋势。对于线性变化趋势的显著性,采用 Mann-Kendall(MK)统计检验法[30]进行检验。根据该方法,在 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平下,如果标准化统计量 $|Z|\geqslant1.64$、$|Z|\geqslant1.96$ 和 $|Z|\geqslant2.32$,则不接受无趋势的零假设。此外,研究中通过计算标准偏差来反映植被 GPP 的空间变异程度。

本研究通过计算偏相关系数来分析主要气候因子与植被 GPP 年际变化之间的本质联系。因为在多元相关分析中,变量之间的相互关系很复杂,它们可能受到不止一个变量的影响,简单的线性相关系数不能真实的反映出两变量之间的本质联系。偏相关分析也称净相关分析,它是在控制其他变量的线性影响的条件下分析两变量间的线性相关性,所采用的工具是偏相关系数(净相关系数)。根据偏相关系数,从而可以判断自变量对因变量的影响程度。

3 结果分析

3.1 GPP 空间分布特征

图 2 显示了 2000—2015 年长江流域植被覆盖区多年平均 GPP 的空间分布。由图可知,GPP 总体上东南高西北低,由东南向西北递减。GPP 较大的区域主要位于鄱阳湖流域的南部和东北部,此外金沙江石鼓以下沿长江一定范围内的局部区域 GPP 也相对较大。空间上,GPP 最大值为 2765 gC m^{-2} a^{-1},最小值为 0.3 gC m^{-2} a^{-1},流域整体均值约 990.46 gC m^{-2} a^{-1}。统计结果显示,累计约 65%的区域 GPP 集中在 800—1500 gC m^{-2} a^{-1}之间,25%的区域 GPP 均值小于 800 gC m^{-2} a^{-1},GPP 均值大于 1500 gC m^{-2} a^{-1}的区域不足 10%(图 2)。

图 3 显示了海拔每隔 100m 统计的长江流域 GPP 的变化规律。由图可知,当海拔低于 2300m 的时候,植被 GPP 整体较高,在 1000—1300 gC m^{-2} a^{-1}之间,GPP 随海拔升高呈现出先增大、后降低、然后再增大的过程。在海拔 300m 和 2300m 左右,出现 GPP 的两个峰值。当海拔高于 2300m 的时候,GPP 整体上随海拔升高呈现急剧减小的趋势。海拔 5000m 以上,有植被的地方 GPP 已经降到很小,不足 80 gC m^{-2} a^{-1}。

就长江流域 12 个二级水资源区来看(表 1),鄱阳湖流域单位面积 GPP 最高(1361.83 gC m^{-2} a^{-1}),其次是洞庭湖流域(1255.99 gC m^{-2} a^{-1})和宜宾-宜昌段长江干流区间(1178.41 gC/m^2 a^{-1}),最低的是金沙江石鼓以上流域(231.63 gC m^{-2} a^{-1})。值得注意的是,宜昌至湖口段长江干流区间、湖口以下长江干流区间和太湖流域单位面积 GPP 大体相当;金沙江石鼓以下流域因南部沿长江一定范围内的局部区域 GPP 较高,使得整体单位面积 GPP 明显高于金沙江石鼓以上流域和岷沱江流域;岷沱江、嘉陵江和汉江等长江干流以北流域单

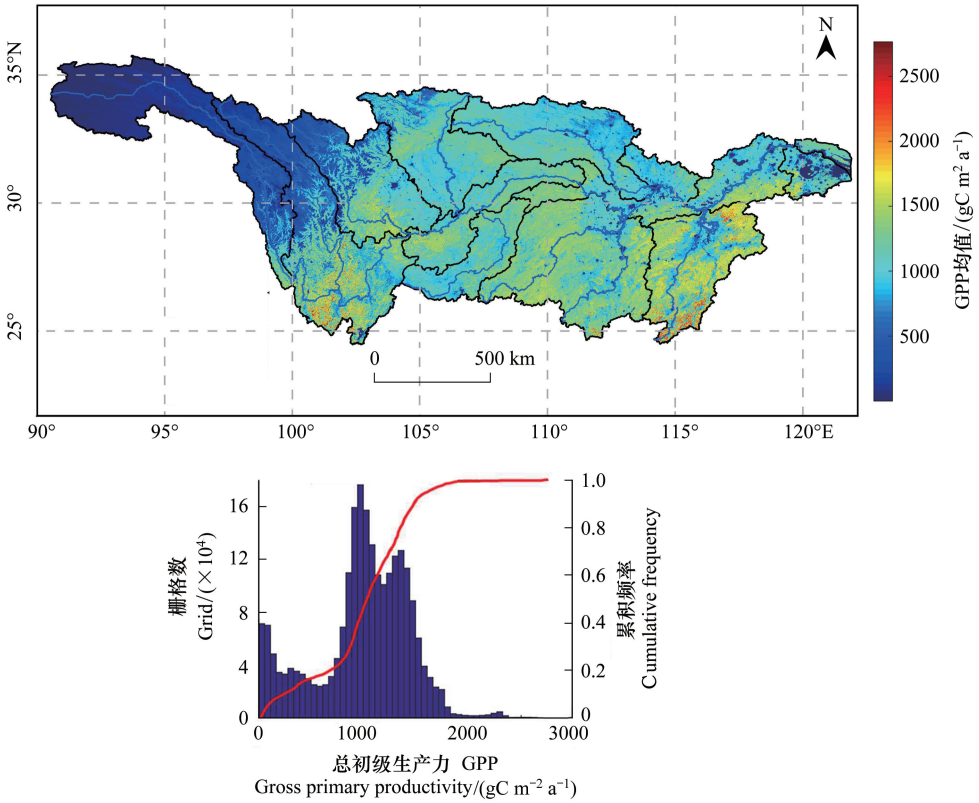

图 2　2000—2015 年长江流域平均 GPP 空间分布与统计特征

Fig.2　Spatial distribution and statistical characteristics of the average of annual GPP in the Yangtze River Basin during 2000—2015

位面积 GPP 小于长江干流以南流域。从标准差来看,金沙江石鼓以下流域、岷沱江流域和鄱阳湖流域较大,分别 514.86 gC m^{-2} a^{-1}、385.85 gC m^{-2} a^{-1} 和 376.50 gC m^{-2} a^{-1}。表明这三个流域植被 GPP 的离散程度大,空间变异剧烈。考虑到不同区域的面积大小,各区域 GPP 总量差异更为突出。计算结果表明,整个长江流域多年平均 GPP 总量为 1.735 P gC,其中洞庭湖流域 GPP 总量为 0.325 P gC,占比约 18.76%。其次,金沙江石鼓以下流域和鄱阳湖流域,其 GPP 总量分别为 0.265 P gC 和 0.216 P gC,占比约 15.28%和 12.42%。太湖流域因面积小,其 GPP 总量为 0.029 P gC,仅占长江流域 GPP 总量的 1.69%。

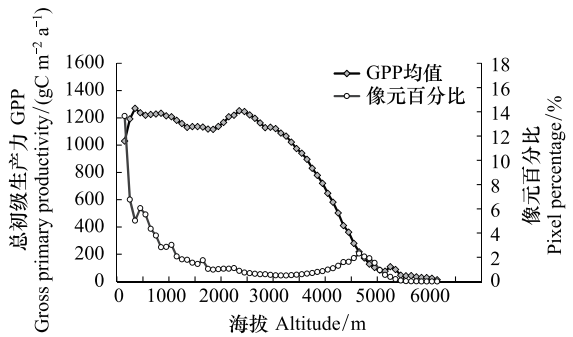

图 3　长江流域多年平均 GPP 随海拔分异规律

Fig.3　GPP variation with altitudes in the Yangtze River Basin

3.2　GPP 年际变化特征

2000—2015 年间长江流域植被覆盖区单位面积 GPP 总体上呈波动增加趋势(图 4)。其中,2000—2001 年间 GPP 相对偏低,2002—2008 年间 GPP 整体较高,2009—2012 年间 GPP 出现一个低谷,之后的 2013—2015 年间 GPP 又恢复较高水平。趋势分析可知 2000—2015 年间长江流域 GPP 年际变化线性趋势率为 2.39 gC m^{-2} a^{-1},上升趋势不显著(P>0.1)。

空间分析结果表明(图 5),长江流域累计约 68%的区域 GPP 线性变化趋势率大于 0,反映整个长江流域绝大部分地方 GPP 呈上升趋势,其他约 32%的区域 GPP 呈下降趋势。具体来看,嘉陵江和汉江流域北部区域、金沙江流域南部区域 GPP 上升趋势最为明显,太湖流域、洞庭湖流域以及四川盆地大部区域 GPP 下降最为突出。

表 1 长江流域及各二级水资源区 GPP 及变化特征

Table 1 Average annual GPP and its change characteristics of secondary water resources areas

流域 Basin	水资源原 Water resources areas	面积 Area/ ($10^4 km^2$)	均值 Mean/ ($gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)	标准差 Standard deviation/ ($gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)	GPP 总量 Total GPP/ (P gC)	线性趋势率 Linear trend/ ($gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)	MK 趋势检验统计量 Z Z value of the MK test
二级水资源区	JSJ-1	21.42	231.63	288.00	0.046	2.99	1.94*
Secondary water	JSJ-2	28.78	931.46	514.86	0.265	5.49	2.12**
resources areas	MTJ	16.30	896.86	385.85	0.144	1.27	0.59
	JLJ	15.98	1032.51	230.61	0.164	4.61	1.04
	WJ	8.79	1099.96	216.74	0.096	1.11	0.23
	UM	9.30	1178.41	232.33	0.109	2.98	0.77
	DL	26.28	1255.99	238.95	0.325	-1.05	-0.59
	HJ	15.90	1012.76	167.38	0.159	5.82	2.21**
	PL	16.22	1361.83	376.5	0.216	0.82	0.05
	MM	8.97	1110.48	242.68	0.095	1.96	0.09
	LM	8.46	1123.33	254.02	0.085	1.02	0.05
	TL	3.69	1098.48	272.97	0.029	-8.81	-2.48**
全流域 The Whole Yangtze River basin		180.09	990.46	448.42	1.735	2.39	0.86

GPP 平均值未包括裸地、水体等无植被区，* 表示通过 0.1 显著性检验；* * 表示通过 0.05 显著性检验；JSJ-1：金沙江石鼓以上流域；JSJ-2：金沙江石鼓以下流域；MTJ：岷沱江流域；JLJ：嘉陵江流域；WJ：乌江流域；HJ：汉江流域；DL：洞庭湖流域；PL：鄱阳湖流域；TL：太湖流域 TLUM：宜宾至宜昌段长江干流区间；MM：宜昌至湖口段长江干流区间；LM：湖口以下长江干流区间

各二级水资源区中，除了洞庭湖流域和太湖流域单位面积 GPP 呈下降趋势外，其他各区 GPP 均呈上升趋势(表 1)。其中，太湖流域 GPP 年际变化显著($P<0.05$)，线性趋势率为-8.81 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$。在所有 GPP 上升的区域中，金沙江石鼓以下流域和汉江流域 GPP 年际变化显著($P<0.05$)，线性趋势率分别为 5.49 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$和 5.82 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$。另外，金沙江石鼓以上流域单位面积 GPP 也有相对显著的上升趋势($P<0.1$)。

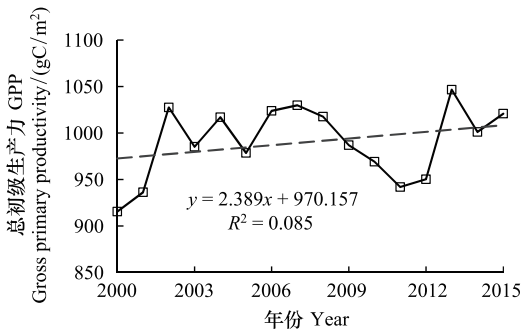

图 4 2000—2015 年长江流域 GPP 年际变化过程及线性趋势

Fig. 4 Inter-annual variation and linear trend of GPP in the Yangtze River Basin during 2000—2015

3.3 不同土地利用类型 GPP 变化比较

长江流域面积大，不同土地利用类型的 GPP 分布情况不同，本文依据二级分类体系，对研究区不同土地利用类型的地表植被进行了分类研究。图 6 所示的统计结果表明，耕地中的水田和旱地植被多年平均 GPP 大体相当，分别为 1075.80 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$ 和 1064.10 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$。耕地 GPP 整体上略低于林地。林地各类型 GPP 介于 1122.80—1276.90 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$之间，其中有林地最高，然后依次为疏林地、其他林地和灌木林。草地各类型 GPP 明显低于耕地和林地，而且不同覆盖度的草地 GPP 相差很大。高、中、低覆盖度草地 GPP 分别为 896.70 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$、671.80 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$和 198.50 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$。标准差结果反映高覆盖度草地和中覆盖度草地 GPP 离散程度最大，空间变化程度最为突出。水田、旱地 GPP 标准差最小，说明这两种人工植被土地利用类型 GPP 空间变异最小。

图 6 显示的 2000—2015 年间不同土地利用类型的单位面积 GPP 趋势变化中，除水田 GPP 呈微弱下降外，其他各土地利用类型的 GPP 均呈上升趋势。其中，线性变化趋势率以高、中覆盖度草地为最，分别为 4.63 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$和 6.41 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$，随后为灌木林(3.35 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)、旱地(3.19 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)、疏林地(3.07 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)、有林地(2.15 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)、其他林地(1.62 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)和低覆盖度草地(1.47 $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$)。显著

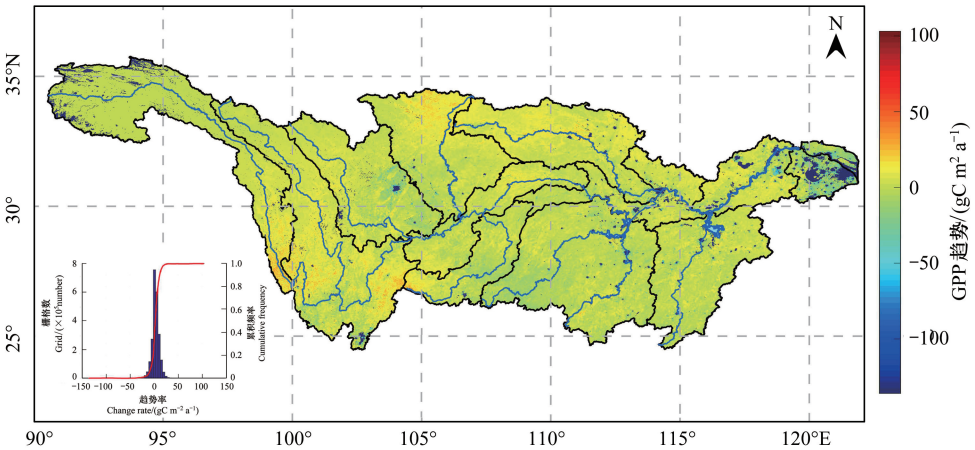

图 5　2000—2015 年长江流域 GPP 年际变化线性趋势率空间分布图

Fig.5　Spatial distribution of linear change rate of GPP in the Yangtze River Basin during 2000—2015

性检验表明,高覆盖度草地和中覆盖度草地 GPP 上升趋势显著($P<0.05$),低覆盖度草 GPP 上升趋势也较大($P<0.1$)。

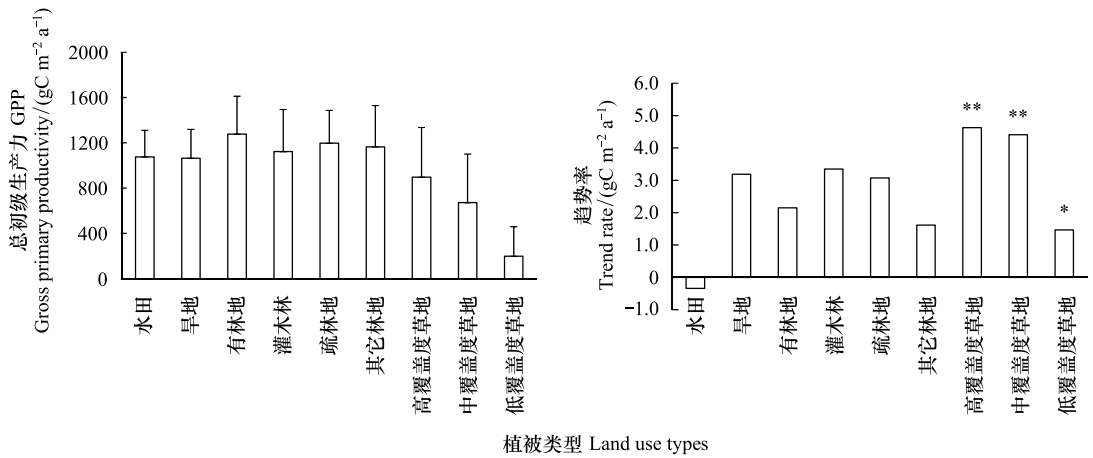

图 6　长江流域不同土地利用类型 GPP 均值及趋势特征

Fig.6　Mean and trend of GPP for different land use types in the Yangtze River Basin

*和**分别表示通过 0.1 和 0.05 显著性检验

3.4　GPP 时空变化与气候因子的关系

气候条件是影响陆地生态系统 GPP 变化的重要环境因素。本文选取蒸发皿蒸发量、降水、相对湿度、日照时数、风速和气温等 6 个变量作为长江流域 GPP 变化的潜在气候驱动因子。表 2 统计了 2000—2015 年长江流域及各二级水资源区 GPP 年际变化与主要气候因子的偏相关系数。总体上,蒸发对植被 GPP 变化起到一定的负作用(除太湖流域外),温度和日照主要起正作用,降水、相对湿度和风速对 GPP 变化的影响有正有负。不同气候因子对植被 GPP 年际变化的影响程度存在明显的区域差异。长江上游源头的金沙江石鼓以上流域和岷沱江流域 GPP 与温度呈显著的正偏相关关系,其他气候因子与 GPP 的偏相关关系均不显著。长江上游金沙江石鼓以上流域和嘉陵江流域的蒸发对 GPP 年际变化的负作用更为突出,其偏相关关系均较显著。另外,嘉陵江流域降水与 GPP 之间的偏相关关系也达到显著性水平,且其对 GPP 年际变化的正作用超过蒸发的负作用。乌江流域和长江上游干流区间,气候因子对 GPP 年际变化的影响作用十分复杂。其中,乌江流域相对湿度对 GPP 年际变化起显著负作用,其次是温度和降水,尽管两者与 GPP 之间的偏相关系数为正,但

其影响程度均不及相对湿度,其他因素影响不显著。长江上游干流区间蒸发、降水、风速和温度与 GPP 之间的偏相关系数都较显著,但是蒸发和风速对 GPP 年际变化起负作用,而降水和温度起正作用,并且其影响程度要强于前者。长江中游洞庭湖流域,温度和风速与 GPP 的偏相关关系均较为显著,其中温度影响的正作用要强于风速的负作用。汉江流域 GPP 年际变化主要受蒸发的负作用影响,两者之间呈显著的负偏相关关系,其他气候因子的影响均不明显。鄱阳湖流域各气候因子与 GPP 之间偏相关系数均不显著,但总体上温度的影响强于其他因子。长江中游干流区间的降水、温度与 GPP 之间呈显著的偏相关关系,两者对 GPP 年际变化起到较强的正作用。长江下游干流区间和太湖流域各气候因子与 GPP 之间偏相关系数均不显著。对长江流域整体而言,GPP 年际变化主要受温度影响,两者之间呈显著的正偏相关关系,其他气候因子的作用均不明显。

表 2 长江流域及各二级水资源区 GPP 年际变化与气候因子的偏相关系数

Table 2 Partial correlation coefficient between annual GPP and major climate factors in different regions in the Yangtze River Basin

流域 Basin	水资源原 Water resources areas	蒸发 Evaporation	降水 Precipitation	相对湿度 Relative humidity	日照时数 Sunshine duration	风速 Wind speed	温度 Temperature
二级水资源区	JSJ-1	-0.293	0.201	0.038	0.373	0.262	0.633**
Secondary water	JSJ-2	-0.593*	-0.036	0.005	0.244	-0.162	0.252
resources areas	MTJ	-0.236	-0.208	0.027	0.254	0.193	0.517*
	JLJ	-0.538*	0.558*	0.413	0.406	0.069	0.457
	WJ	-0.399	0.577*	-0.692**	0.305	-0.138	0.671**
	UM	-0.575*	0.649**	-0.173	0.343	-0.518*	0.727**
	DL	-0.413	0.142	0.100	0.491	-0.528*	0.631**
	HJ	-0.657**	0.035	0.213	0.302	0.044	0.223
	PL	-0.345	0.080	0.128	0.400	-0.031	0.492
	MM	-0.261	0.699**	-0.453	0.012	0.081	0.718**
	LM	-0.154	0.107	0.383	0.440	-0.378	0.321
	TL	0.114	0.011	0.098	0.009	0.154	0.453
全流域 The whole Yangtze River basin		-0.468	0.191	-0.062	0.276	-0.208	0.697**

* 表示通过 0.1 显著性检验; * * 表示通过 0.05 显著性检验

对于不同土地利用类型,植被 GPP 年际变化与主要气候因子的偏相关系数见表 3。由表可知,不同土地利用类型 GPP 年际变化同样主要受温度和蒸发影响,其中温度对植被 GPP 变化起正作用,蒸发起到一定的负作用(除低覆盖度草地外)。林地各主要类型以及高、中覆盖度草地的 GPP 与温度之间的偏相关关系达到显著性水平,而耕地(水田与旱地)与低覆盖度草地的 GPP 与温度之间的偏相关关系不显著。蒸发的负作用对高覆盖度草地 GPP 的影响十分显著,而对其他土地利用类型的影响并不突出。对所有土地利用类型而言,降水、相对湿地、日照和风速对 GPP 变化的影响均不显著。

4 讨论

水分和温度及其相互配合构成的水热条件是影响植被生长和分布的主要因素[31]。总体上,长江流域陆地植被 GPP 的空间分布特征与流域水热条件的分布情况高度一致。然而,值得注意的是,长江流域植被单位面积 GPP 随高程变化,在海拔 300m 和 2300m 左右存在两个峰值。对于这一现象,主要是受以下因素影响:(1)长江流域海拔 300m 左右的高程区,主要分布于长江中下游和四川盆地的低山丘陵,地表植被以亚热带常绿阔叶林为主。长江中下游和四川盆地海拔 300m 以下地区大多的以水田和旱地为主,而耕地 GPP 整体低于林地。300m 以上区域,气温受垂直地带性影响随海拔升高逐渐降低,从而不利于植被生长;(2)海拔 2300m

左右的高程区,主要分布在我国地势一、二级阶梯的交界处,集中分布在四川盆地和云贵高原向青藏高原过度的横断山区外围地带。这里山高谷深,地表植被主要分布于河谷两岸的山坡地带,以高山阔叶林为主。由于河谷地带大多气候干热,局地“焚风”气候效应形成了独特的垂直植被带倒置现象:河谷低海拔地带因气候干热植被稀少,而海拔较高的山坡地带随降水增多,植被生长逐渐转好。从植被 GPP 随高程的变化结果来看,西部干热河谷区海拔 2300m 处整体水热条件最好。张文江等[32]对岷江上游干热河谷植被分布的研究也表明,岷江上游以 2000—3000m 高程带水热组合条件最好,分布了川滇高山栎等阔叶林;3000m 以上逐渐受热量制约,植被依次为针叶林、灌木、草甸和高山植被;2000m 以下受干热河谷效应及人类活动影响,植被以灌木类为主。

表 3　长江流域不同土地利用类型 GPP 年际变化与气候因子的偏相关系数

Table 3　Partial correlation coefficient between annual GPP and major climate factors among different land use types in the Yangtze River Basin

土地利用类型 Land use type	蒸发 Evaporation	降水 Precipitation	相对湿度 Relative humidity	日照时数 Sunshine duration	风速 Wind speed	温度 Temperature
水田 Paddy field	−0.256	0.060	−0.036	0.077	−0.249	0.483
旱地 Dry land	−0.434	0.067	0.079	0.249	−0.045	0.498
有林地 Forest	−0.408	0.281	−0.100	0.285	−0.272	0.697**
灌木林 Shrub	−0.496	0.120	0.030	0.315	−0.133	0.698**
疏林地 Sparse forest	−0.509	0.163	0.053	0.336	−0.142	0.605**
其他林地 Other forest	−0.390	0.165	−0.062	0.237	−0.310	0.613**
高覆盖度草地 High-covered grassland	−0.630**	0.296	−0.138	0.446	0.237	0.705**
中覆盖度草地 Middle-covered grassland	−0.475	0.338	−0.319	0.319	0.282	0.742**
低覆盖度草地 Low-covered grassland	0.083	0.270	−0.377	−0.055	−0.031	0.388

* * 表示通过 0.05 显著性检验

以往的研究中,大多注重气温和降水对植被生产力的影响[10,11,13-14, 16]。本研究除气温和降水外,还系统探讨了蒸发、湿度、日照和风速等气候因子的协同作用。对长江流域整体而言,GPP 年际变化主要受温度影响,这与众多相关研究的结论一致,因为温度对植被光合作用和生产力的促进作用最为突出[33]。此外,由于长江流域地处亚热带湿润气候,流域水分条件好,能够充分满足植被生长的需要,使得降水和相对湿度的变化对 GPP 的影响作用较弱,而日照、风速等因素可以通过影响蒸发过程从而对植被 GPP 产生作用[34]。总体上,陆地生态系统的组成、结构和功能受气候干湿状况的影响较为突出,特别是干旱对植被生长极为不利。杜文丽等[35]的研究表明,在时间尺度上,1980—2013 年中国陆地生态系统 GPP 与 SPEI 年际变化格局基本吻合,干旱年份的 GPP 显著降低;在空间尺度上,北方大部分地区的 GPP 与 SPEI 呈正相关,南方大部分地区呈负相关。Zhao 和 Running[29]的研究也表明,2000—2009 年间全球陆地植被 NPP 的减少是干旱引起的。需要指出的是,受长江流域内部地形地貌及气象条件分异显著的影响,不同气候因子对 GPP 年际变化的影响存在明显的空间差异。本文的研究结果表明,在不同子流域内,蒸发、降水、相对湿度、风速和温度等都有可能成为 GPP 年际变化的主要气候因子(表 2)。对不同土地利用类型而言,GPP 年际变化主要受温度和蒸发的影响,降水等其他因素的影响较小(表 3)。因此,有关气候变化对植被生产力的影响研究中,不应简单的分析气温和降水的影响,而应考虑流域所处气候条件,分析其他气候因子或流域干湿状况的综合作用。

在时间上,长江流域陆地植被 GPP 呈波动增加趋势,流域累计约 68%的区域 GPP 线性变化趋势率大于 0。就不同土地利用类型来看,除水田 GPP 呈微弱下降外,其他均呈上升趋势,尤其是草地 GPP 上升趋势较为显著。这些结果表明长江流域整体的固碳能力在逐步增强,生态系统环境质量有逐渐改善的趋势,这与近年来长江流域植被覆盖度显著上升有较好的对应[24]。从流域气候变化的角度来看,近几十年来长江流域气温上升明显,局部地区降水也呈现出一定的增加趋势[36],这对提高流域植被 GPP,促进生态系统质量改善具有积极作用,但应注意气候过程的极端化对生态系统可持续发展的潜在风险。此外,流域内人类活动对植被

GPP 的影响也不容忽视。特别是近年来,随着城市化的快速扩张,部分区域地表覆被状况发生了显著改变,从而影响地表植被生产力和生态系统服务功能的时空变化[37-38]。另一方面,在国家生态文明建设的倡导下,长江流域积极开展生态修复工程,导致植被覆盖度显著上升,流域生态系统质量得到显著改善[24]。为客观认识变化环境下陆地生态系统固碳能力和生态服务功能的变化,积极开展气候和土地利用变化对植被生产力和生态系统状况的影响研究具有重要的现实意义。

5 结论

本文以 MODIS GPP 数据为基础,系统研究了长江流域 2000—2015 年植被 GPP 的时空变化特征,并探讨了植被 GPP 年际变化与主要气候因子的关系,获得结论如下:

(1)长江流域植被覆盖区 GPP 在 0.3—2765 gC m^{-2} a^{-1}之间,均值约 990.46 gC m^{-2} a^{-1}。植被 GPP 在海拔 300m 和 2300m 左右存在两个峰值,分别为 1269.30 gC m^{-2} a^{-1}和 1251.80 gC m^{-2} a^{-1}。当海拔高于 2300m 的时候,GPP 随海拔升高急剧减小。不同水资源区内,单位面积 GPP 以鄱阳湖流域最高,金沙江石鼓以上流域最低。长江流域多年平均 GPP 总量为 1.735 P gC,其中洞庭湖流域总量最高,约占整个长江流域总量的 18.76%,太湖流域最小,占比仅 1.69%。

(2)长江流域 GPP 在 2000—2015 年间呈缓慢的波动上升趋势,趋势率为 2.39 gC m^{-2} a^{-1}。空间上,GPP 上升区和下降区分别占总流域面积的 68%和 32%。对于各二级水资源区,除洞庭湖流域和太湖流域 GPP 呈下降趋势外,其他各区均呈上升趋势,尤其是金沙江流域和汉江流域的上升趋势较为著性。

(3)长江流域不同土地利用类型 GPP 平均值在 198.50—1276.90 gC m^{-2} a^{-1}之间。其中,草地各类型空间变化程度最为突出,水田和旱地空间变异程度最小。各土地利用类型中除水田 GPP 呈微弱下降外,其他均呈上升趋势,尤其是高、中、低覆盖度草地 GPP 上升趋势显著。

(4)总体上,主要气候因子中蒸发对植被 GPP 变化起到一定的负作用(除太湖流域外),温度和日照主要起正作用,降水、相对湿度和风速对 GPP 变化的影响有正有负。不同气候因子对植被 GPP 变化的影响程度在不同区域、不同土地利用类型间均存在一定差异,但就长江流域整体而言,GPP 年际变化受温度影响显著,其次是蒸发,而降水等其他气候因子的影响不大。

参考文献(References):

[1] 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. 地理学报, 2017, 72(1): 39-52.

[2] 李泽椿, 郭安红, 延昊, 钱拴, 张国平, 侯英雨, 王月冬. 气候变化对生态保护工程的影响. 气候变化研究进展, 2015, 11(3): 179-184.

[3] Gitelson A A, Viña A, Verma S B, Rundquist D C, Arkebauer T J, Keydan G, Leavitt B, Ciganda V, Burba G G, Suyker A E. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D8): D08S11.

[4] 程春晓, 徐宗学, 王志慧, 刘昌明. 2001—2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析. 资源科学, 2014, 36(11): 2401-2412.

[5] Law B. Carbon dynamics in response to climate and disturbance: recent progress from multi-scale measurements and modeling in Ameri-Flux// Omasa K, Nouchi I, De Kok L J, eds. Plant Responses to Air Pollution and Global Change. Tokyo: Springer, 2005: 205-213.

[6] Zhang Q Y, Cheng Y B, Lyapustin A I, Wang Y J, Xiao X M, Suyker A, Verma S, Tan B, Middleton E M. Estimation of crop gross primary production (GPP): I. impact of MODIS observation footprint and impact of vegetation BRDF characteristics. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 191: 51-63.

[7] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 李正泉, 伏玉玲. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, 34(SII): 15-29.

[8] Cheng Y B, Zhang Q Y, Lyapustin A I, Wang Y J, Middleton E M. Impacts of light use efficiency and f-PAR parameterization on gross primary production modeling. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 187-197.

[9] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析. 生态环境学报, 2018, 27(3): 397-405.

[10] 陈智. 2000—2015 年中国东北森林生产力和碳素利用率的时空变异. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1625-1632.

[11] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 郭恒亮, 魏海涛. 2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子. 水土保持研究, 2019, 26(2): 255-262.

[12] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 孙莉, 乔青, 王辉, 宁杨翠. 基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究. 生态环境学报, 2015, 24(1): 8-13.

[13] 闫敏, 李增元, 田昕, 陈尔学, 谷成燕. 黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应. 植物生态学报, 2016, 40(1): 1-12.

[14] 刘海江, 尹思阳, 孙聪, 彭福利, 周澎. 2000—2010 年锡林郭勒草原 NPP 时空变化及其气候响应. 草业科学, 2015, 32(11): 1709-1720.

[15] 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. 环境与可持续发展, 2018, 43(1): 96-99.

[16] 姚炳楠, 陈报章, 车明亮. 鄱阳湖流域植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子分析. 植物学报, 2016, 51(5): 639-649.

[17] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.

[18] Piao S L, Ciais P, Lomas M, Beer C, Liu H Y, Fang J Y, Friedlingstein P, Huang Y, Muraoka H, Son Y, Woodward I. Contribution of climate change and rising CO_2 to terrestrial carbon balance in East Asia: a multi-model analysis. Global and Planetary Change, 2011, 75(3/4): 133-142.

[19] Zhu W Q, Pan Y Z, Yang X Q, Song G B. Comprehensive analysis of the impact of climatic changes on Chinese terrestrial net primary productivity. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(23): 3250-3260.

[20] 候英雨, 柳钦火, 延昊, 田国良. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1546-1553.

[21] Khalifa M, Elagib N A, Ribbe L, Schneider K. Spatio-temporal variations in climate, primary productivity and efficiency of water and carbon use of the land cover types in Sudan and Ethiopia. Science of the Total Environment, 2018, 624: 790-806.

[22] 柯金虎, 朴世龙, 方精云. 长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究. 植物生态学报, 2003, 27(6): 764-770.

[23] 贾松伟. 长江流域森林植被碳储量分布特征及动态变化. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 997-1002.

[24] Qu S, Wang L C, Lin A, Zhu H J, Yuan M X. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: climate change or anthropogenic factors?. Ecological Indicators, 2018, 90: 438-450.

[25] Cui L F, Wang L C, Qu S, Singh R P, Lai Z P, Yao R. Spatiotemporal extremes of temperature and precipitation during 1960-2015 in the Yangtze River Basin (China) and impacts on vegetation dynamics. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(1/2): 675-692.

[26] 白淑英, 王莉, 史建桥. 长江流域 NDVI 对气候变化响应的时滞效应. 中国农业气象, 2012, 33(4): 579-586.

[27] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.

[28] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. BioScience, 2004, 54(6): 547-560.

[29] Zhao M S. Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329 (5994): 940-943.

[30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007.

[31] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 娄安如. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[32] 张文江, 宁吉才, 宋克超, 黎小东, 王焱, 王欣, 覃光华. 岷江上游植被覆被对水热条件的响应. 山地学报, 2013, 31(3): 280-286.

[33] 沈振西, 付刚. 藏北高原高寒草甸水分利用效率与环境温湿度的关系. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1259-1263.

[34] 米娜, 于贵瑞, 王盘兴, 温学发, 孙晓敏, 张雷明, 宋霞, 王树森. 基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO_2 通量季节变异的模拟. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1119-1131.

[35] 杜文丽, 孙少波, 吴云涛, 宋照亮. 1980—2013 年中国陆地生态系统总初级生产力对干旱的响应特征. 生态学杂志, 2020, 39(1): 23-35.

[36] Tian Q, Yang S L. Regional climatic response to global warming: trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s. Quaternary International, 2017, 440: 1-11.

[37] 袁甲, 沈非, 王甜甜, 罗小瑞. 2000—2010 年皖江城市带土地利用/覆被变化对区域净初级生产力的影响. 水土保持研究, 2016, 23(5): 245-250.

[38] 李建国, 王欢, 王净, 李强, 张忠启, 刘丽丽, 濮励杰. 基于线性拟合的城市化过程对陆地生态系统生产能力的影响——以江苏省为例. 资源科学, 2018, 40(1): 32-43.