

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.171>



气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响

崔利芳¹, 王伦澈^{2*}, 屈赛³, 邓利欢¹, 王兆夺¹

1. 黄冈师范学院地理与旅游学院, 湖北黄冈 438000

2. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078

3. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079

摘要: 为了了解气温、降水量和人类活动对流域植被 NDVI(normalized difference vegetation index)的影响,以长江流域为研究区,运用一元线性回归分析法和 Theil-Sen Median 趋势分析法研究了长江流域气温、降水量和植被 NDVI 变化特征,同时利用相关分析法和残差分析法探讨气温、降水量和人类活动对植被 NDVI 变化的影响.结果表明:1960—2015 年长江流域年平均温度显著上升,而降水量的变化趋势并不显著;1982—2015 年流域 NDVI 呈显著增加趋势;1982—2015 年流域 NDVI 与气温的相关性较高,然而与降水量的相关性并不显著;人类活动使流域 NDVI 增加的区域主要分布于流域北部、东南和西南部分地区,而使 NDVI 下降的区域位于流域中西部区域和长三角地区.气温对长江流域植被 NDVI 变化的影响大于降水,气候变暖和人类活动对流域生态环境具有一定程度的影响.

关键词: 气温;降水量;NDVI;长江流域;遥感.

中图分类号: P951

文章编号: 1000-2383(2020)06-1905-13

收稿日期: 2019-04-26

Impacts of Temperature, Precipitation and Human Activity on Vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China

Cui Lifang¹, Wang Lunche^{2*}, Qu Sai³, Deng Lihuan¹, Wang Zhaoduo¹

1. School of Geography and Tourism, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China

2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

3. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: To investigate the impacts of temperature, precipitation and human activity on the vegetation normalized difference vegetation index (NDVI) variation, in this study, taking Yangtze River basin (YRB) as the study area, temperature, precipitation and vegetation NDVI variation were analyzed using linear regression (LR) analysis and Theil-Sen Median trend analysis. The impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI variation were analyzed using the Pearson correlation analysis and residuals analysis. The results show that the annual mean temperature significantly increased over the whole basin during 1960—2015. However, the precipitation shows little change. The annual mean NDVI shows a significant increasing trend over the whole study area during 1982—2015. The correlation coefficients between NDVI and temperature are high. However, the mean NDVI has no significant correlation with annual precipitation. The regions where the NDVI increased caused by human activity were mainly located in the northern, southeastern and southwestern YRB, while the regions where the NDVI decreased caused by human activity were mainly located in the small part of mid-western YRB and YRD. This study highlights that the mean air temperature has stronger effects on vegetation NDVI than precipitation and the effects of global

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41601044);黄冈师范学院博士基金项目(No.204201832603);高级别培育项目(No.204201911503).

作者简介: 崔利芳(1986—),女,讲师,主要从事气候变化与资源环境遥感研究. ORCID: 0000-0002-6165-9584. E-mail: cuilifang1104@126.com

* **通讯作者:** 王伦澈, ORCID: 0000-0001-7783-5725. E-mail: wang@cug.edu.cn

引用格式: 崔利芳,王伦澈,屈赛,等,2020.气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响.地球科学,45(6):1905-1917.

warming and human activity on ecological environment at the local scale.

Key words: temperature; precipitation; NDVI; Yangtze River basin; remote sensing.

0 引言

作为对全球变化响应最直接、最重要的生态指示器,植被能很好地反映气候变化和人类活动对区域生态环境的影响(Forkel *et al.*, 2016).因此,随着全球变化的加剧以及对全球变化研究的不断深入,科学界越来越多地关注植被变化对全球变化的响应,迫切了解气候变化和人类活动对植被变化的影响与反馈(朴世龙和方精云等, 2001; 向菲菲等, 2018).

根据大量前人所做研究证明,气候变化是植被变化的最主要驱动力之一(秦大河, 2014). Ichii *et al.* (2002)利用 1982—1990 年全球气温、降水量和植被 NDVI(normalized difference vegetation index)数据,分析植被 NDVI 与气温、降水量之间的相关关系.结果表明在北半球的中、高纬度 NDVI 的增加与气温的上升呈正相关关系,而在南半球 NDVI 的减少与降水量的下降呈显著相关.在干旱地区,由于降水量稀少,蒸发量大,植被生长对降水量极为敏感,较气温植被 NDVI 与降水量的相关性更高(Li *et al.*, 2015a).我国干旱地区 NDVI 与降水量的相关性更显著(穆少杰等, 2012),其余大部分地区 NDVI 随着气温的升高而增加(Piao *et al.*, 2015).除气候因素外,人类活动也是影响植被覆盖变化的重要驱动因素(李辉霞等, 2011).最新研究表明全球植被变化主要是由人类活动造成(Mao *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2018),其中中国和印度通过植树造林和提高农业效率,使得他们在全球陆地植被变化中起到了主导地位(Chen *et al.*, 2019).易浪等(2014)研究了人类活动对黄土高原植被覆盖同时具有正向和负向作用,退耕还林还草工程极大地促进了该地区的植被覆盖程度,而城市扩张、乱砍乱伐以及过度放牧则对植被产生了破坏作用.Zhang *et al.* (2016) 研究结果表明,近 30 年人类活动在一定程度上加快了气候变化对三江源区植被生长的影响,尤其是进入 21 世纪以来人类活动对植被恢复起着重要作用,即生态保护与建设行动取得初步成效,但生态措施的实施效果存在空间差异.

长江流域是我国人口、经济和科学技术等方面最发达的地区之一.近些年来,随着气候变化、人口

的急剧上升和经济的快速发展,长江流域的生态环境状况形势严峻.因此,党中央、国务院高度重视长江经济带生态环境保护工作,强调推动长江经济带发展,坚持生态优先、绿色发展,树立和践行“绿水青山就是金山银山”的基本理念.作为世界第三大流域,长江流域植被覆盖是维护我国、毗邻地区乃至全球生态平衡不可缺少的重要生态屏障.因此,在气候变化与人类活动双重影响下,认清长江流域植被覆盖的变化特征,分离量化气候变化和人类活动在影响植被变化中的相对贡献显得尤为重要与必要.研究成果有助于加深对大流域尺度下植被变化过程的认知,为保护流域生态环境、促进长江经济带绿色发展提供科学支撑.

1 研究区、数据与方法

1.1 研究区概况

长江流域位于 $24^{\circ}30' \sim 35^{\circ}45' \text{N}$, $90^{\circ}33' \sim 122^{\circ}25' \text{E}$ (图 1), 总面积约 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Qu *et al.*, 2018). 长江流域呈多级阶梯性地形,地貌类型复杂多样,山地、高原、盆地、丘陵和平原均有分布,属于亚热带季风气候区,植被主要为常绿阔叶林,整个流域的林地面积占全国林地面积的 29.7%.

1.2 数据与方法

本文共用到气象数据和 GIMMS NDVI 数据两种.气象数据为 1960—2015 年气温(TEM)、降水(PRE)日值数据,该数据来自中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn>)提供,并且经过了严格的质量控制,包括极值检验和时间一致性检验等.实验共选取长江流域 214 个气象站点进行研究.个别站点的气温或降水量数据在研究时段内存在数据缺失,主要采用 Kriging 空间插值方法和相邻站点的数据进行推测(田清, 2016).

GIMMS NDVI 数据来自美国国家海洋和大气管理局(the National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)推出的全球植被指数变化数据(Piao *et al.*, 2006).GIMMS NDVI 数据集是目前时间序列最长的 NDVI 数据.该数据时间范围为 1982—2015 年,时间分辨率为 15 d,空间分辨率为 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ (Eastman *et al.*, 2013).在数据处理过程中,采

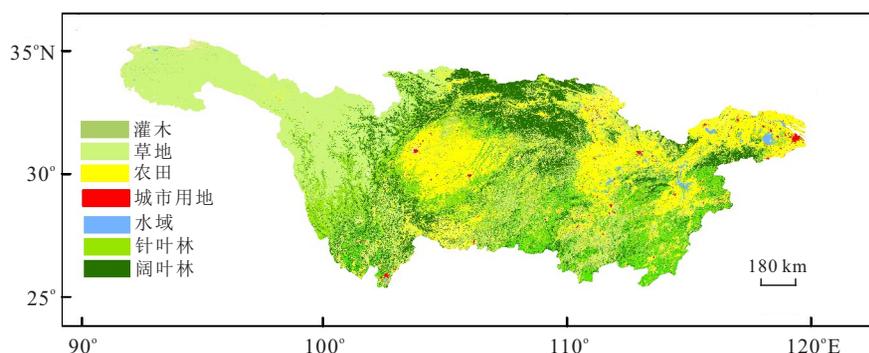


图 1 长江流域的地理位置和植被覆盖类型

Fig.1 Location of the Yangtze River basin (YRB) and vegetation cover type

用国际通用的最大值合成(maximum-value composites, MVCs)法,进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰(Tian *et al.*, 2016).

本文主要采用线性回归分析法、Theil-Sen Median 趋势分析法、Mann-Kendall(MK)非参数检验法和空间插值(Gillespie *et al.*, 2018; 钱莉莉等, 2019; 王朋辉等, 2019)分析长江流域气候变化和植被变化特征,同时利用 Pearson 相关分析法(赵松等, 2018; 郑峰峰等, 2018)和残差分析法(Jiang *et al.*, 2017)探讨气候变化和人类活动对植被变化的影响.MK 非参数统计法所用样本序列不需要遵从一定的分布,数据检验能力不受序列中少数异常值和中断点的干扰和影响,因而已经在水文气象—植被指数等时间序列分析中得到广泛应用(田清, 2016).利用残差分析法实现气候要素和人类活动对植被动态影响的分离(Jiang *et al.*, 2017).植被年度 NDVI 主要由区域气候条件和人类活动强度所决定.根据气候条件和 NDVI 之间的相关关系,分离出气候变化对 NDVI 的贡献,通过建立两者的回归模型预测各年度由气候条件所决定的 NDVI.在不考虑其他非决定性因素情况下,NDVI 实际值与基于气候变化的预测值之间的残差即为人类活动所贡献的部分.在没有人类活动影响的情况下,残差年际变化应围绕零值呈现随机变化特征,如果残差的年际变化呈现出显著的下降趋势,表明人类活动引起植被退化.反之,表明人类活动改善了生态环境(李辉霞等, 2011).

2 气温、降水量变化特征

2.1 气温变化特征

1960—2015 年长江流域年平均气温为 14.4 °C,

表 1 长江流域气温变化的显著性

Table 1 Significance of temperature variation in the YRB

	均值(°C)	Z 统计量	变化趋势
年	14.3	4.98	显著上升
春	14.3	3.36	显著上升
夏	23.7	1.26	上升
秋	15.1	3.58	显著上升
冬	4.2	3.12	显著上升

且呈显著的上升趋势,上升速率为 0.02 °C/a ($p < 0.01$)(表 1, 图 2a).流域年均气温最高值(15.3 °C)出现在 2015 年,最低值(13.5 °C)出现在 1976 年(图 2a).图 2a 显示,20 世纪 90 年代之后,气温上升幅度显著增加.1960—2015 年流域四季平均气温分别为 14.3 °C、23.7 °C、15.1 °C 和 4.2 °C,同时四季气温均表现为上升趋势,其中春季、秋季和冬季上升趋势显著,上升速率分别为 0.019 °C/a ($p < 0.05$)、0.018 °C/a ($p < 0.05$) 和 0.021 °C/a ($p < 0.01$)(图 2b~2e, 表 1).

1960—2015 年长江流域年平均气温呈显著 ($p < 0.05$) 上升趋势的站点数为 189, 占总站点数 88.3%. 然而,流域内升温速率具有很大的空间差异,整体上气温升温速率基本随着纬度和高程的升高而增加.增速最快的区域位于长江西部源头流域和长三角地区(图 3a).高海拔地区对气候变暖有一定的加强作用,如我国的青藏高原,欧洲的阿尔卑斯山以及美国的落基山脉(Wang *et al.*, 2014).长三角地区地势平坦,人类活动密集,工业化和城市化快速发展,是导致该区域气温大幅上升的重要原因.

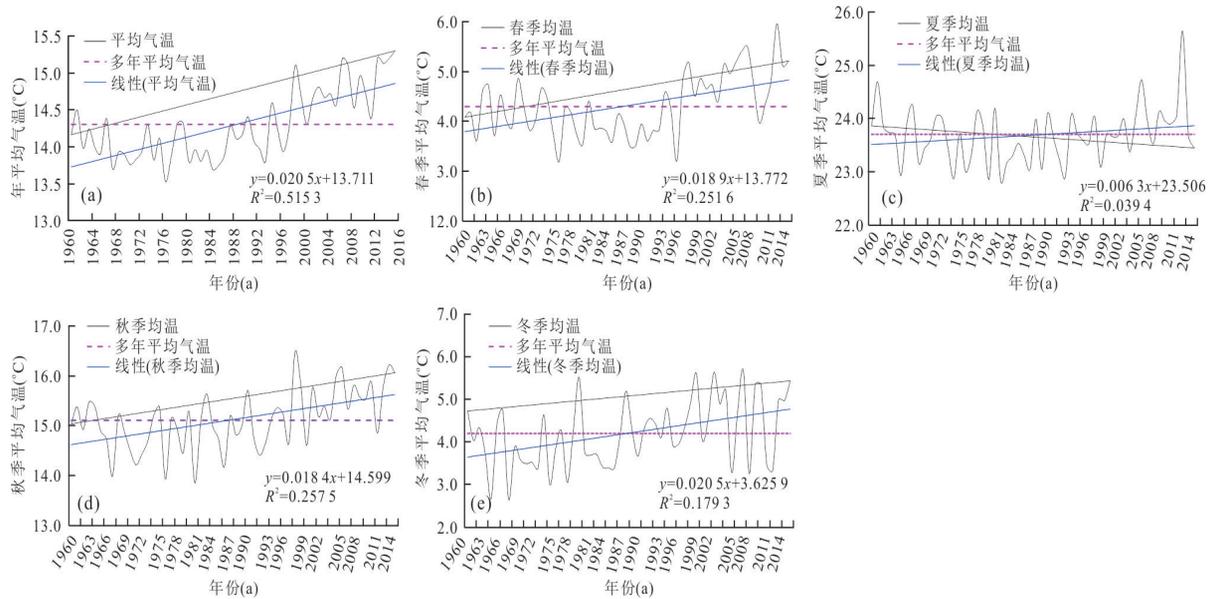


图2 1960—2015年长江流域年、季平均气温的变化

Fig.2 The annual and seasonal temperature variation in the YRB during 1960—2015

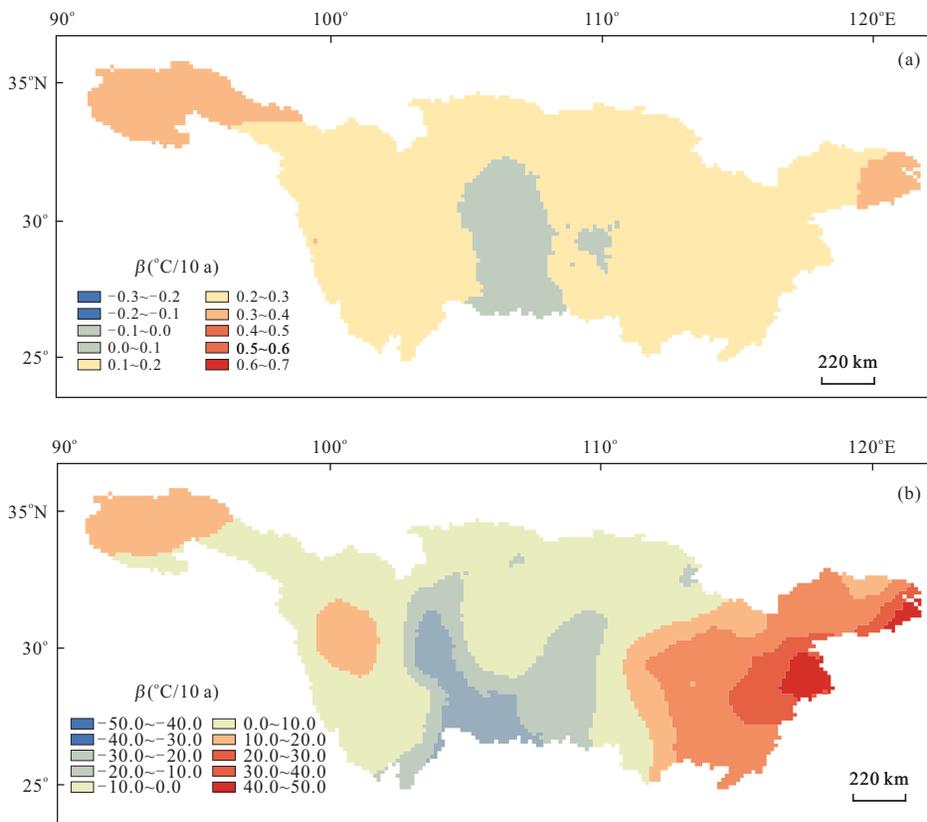


图3 1960—2015年长江流域年平均气温(a)和年降水量(b)变化趋势的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual mean temperature (a) and precipitation (b) trend during 1960—2015 in the YRB

2.2 降水量变化特征

1960—2015年长江流域年平均降水量为1 081.8 mm, 整体呈下降趋势, 但趋势不显著($p >$

0.1) (表2, 图4a). 图4a显示降水量最大值(1 247.9 mm)出现在1998年, 最小值(905.0 mm)出现在1976年. 1960—2015年长江流域四季平均降

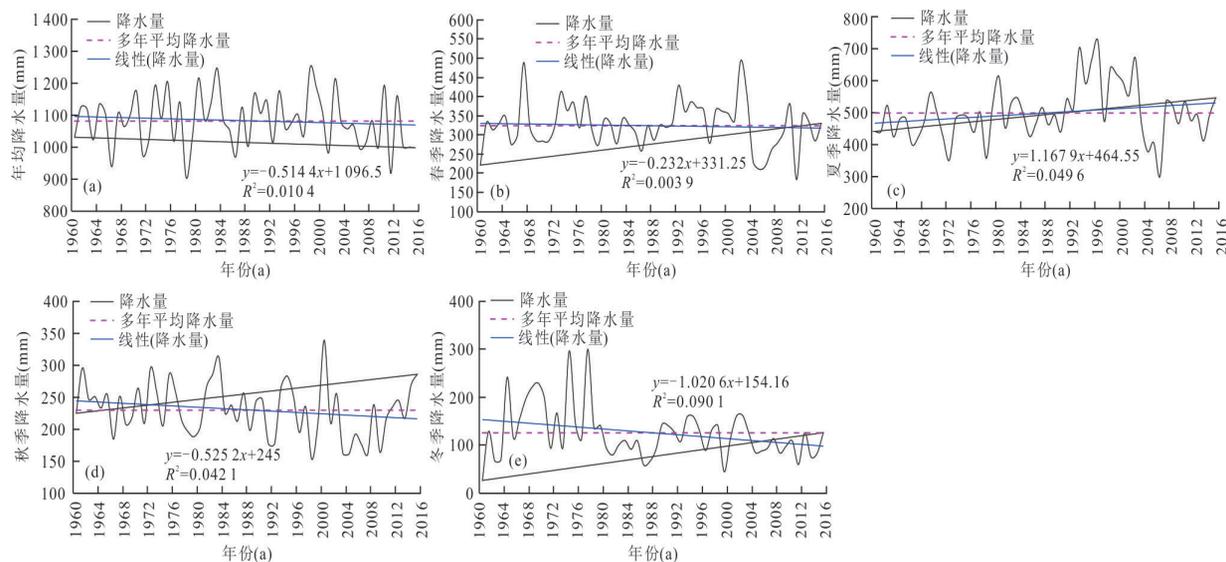


图 4 1960—2015 年长江流域年、季平均降水量的变化

Fig.4 The annual and seasonal precipitation variation in the YRB during 1960—2015

表 2 长江流域降水量变化的显著性

Table 2 Significance of precipitation variation in the YRB

	均值(mm)	Z 统计量	变化趋势
年	1081.8	-0.98	下降
春	324.6	-0.11	下降
夏	497.8	1.90	增加
秋	230.0	-1.53	下降
冬	125.1	-1.46	下降

表 3 长江流域 NDVI 变化的显著性

Table 3 Significance of NDVI variation in the YRB

	均值	Z 统计量	变化趋势
年	0.54	3.17	显著增加
春	0.50	4.12	显著增加
夏	0.67	0.47	增加
秋	0.56	2.70	显著增加
冬	0.44	1.25	增加

水量分别为 324.6 mm、497.8 mm、230.0 mm 和 125.1 mm,其中春、秋两季降水量呈现弱的下降趋势,冬季下降幅度较明显,而夏季呈上升趋势,各季降水量的变化均没有通过显著性检验($p > 0.1$)(图 4b~4e,表 2)。

研究区内年降水量的变化趋势存在显著的空间差异.1960—2015 年降水量减少区域主要位于流域南部,达到显著性水平($p < 0.05$)的站点仅 11 个,其余大部分地区呈增加趋势,达到显著性水平($p < 0.05$)的站点数为 29(图 3b)。

3 NDVI 变化特征

3.1 NDVI 时间变化

1982—2015 年长江流域年平均 NDVI 为 0.54,且以 0.001/a 的速率显著增加($p < 0.05$),最大值(0.56)和最低值(0.49)分别出现在 2015 年和 1984 年(表 3,图 5a).1982—2015 年流域四季平均 NDVI 分别为 0.50、0.67、0.56 和 0.44,且四季平均 NDVI 均

呈上升趋势,其中春季和秋季上升趋势显著,上升速率分别为 0.002 2/a($p < 0.01$)和 0.001 7/a($p < 0.01$)(图 5b~5e,表 3)。

3.2 NDVI 空间变化

图 6 显示长江流域年平均 NDVI 变化具有一定的空间异质性.1982—2015 年研究区年平均 NDVI 呈增加趋势的面积比例为 78.2%,其中 31.0% 区域的变化通过了显著性检验($p < 0.05$),主要分布于长江流域北部、东部和西部部分地区,最大增速为 0.04/10 a;流域年平均 NDVI 呈下降趋势的面积比例为 21.8%,其中仅 5.0% 的区域 NDVI 变化通过了显著性检验($p < 0.05$),如长三角地区和中西部部分地区,最大降速为 0.02/10 a(图 6)。

四季平均 NDVI 的变化也具有一定的空间异质性.图 7 显示长江流域东部部分地区 NDVI 在四季呈现连续而显著的增加趋势,增加速率为 0~0.03/10 a,尤其是春季 NDVI 增加非常明显.然而,长三角地区 NDVI 在四季呈现连续而显著的减少趋势,减少速率为 0~0.03/10 a,特别是夏季 NDVI 减少

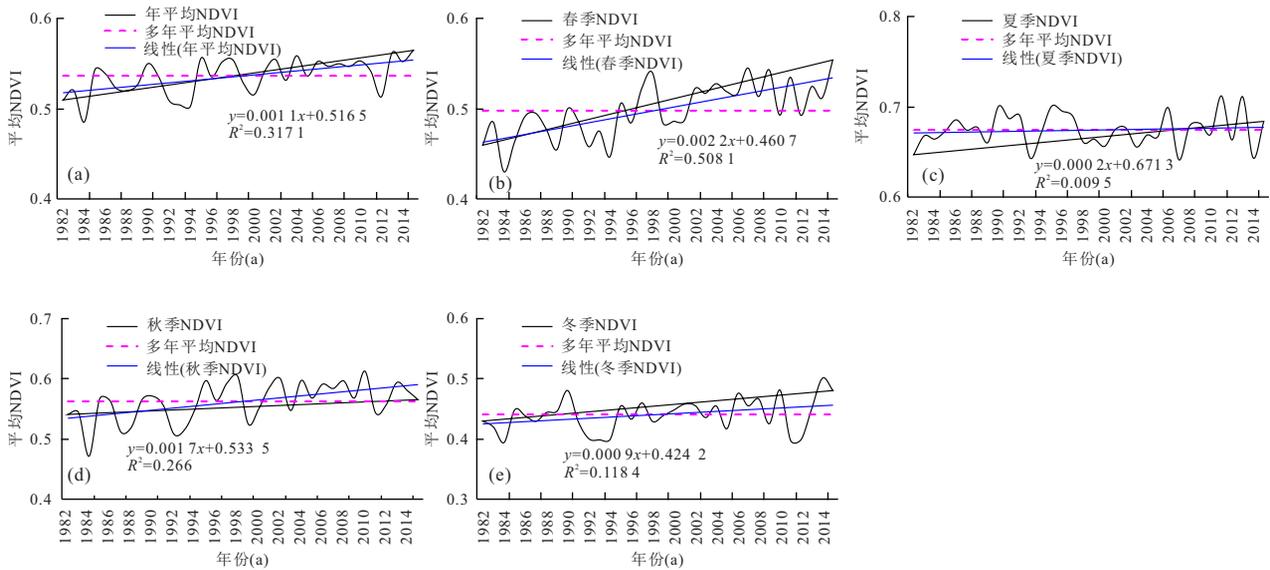


图 5 1960—2015 年长江流域年、季平均 NDVI 的变化

Fig.5 The annual and seasonal NDVI variation in the YRB during 1960—2015

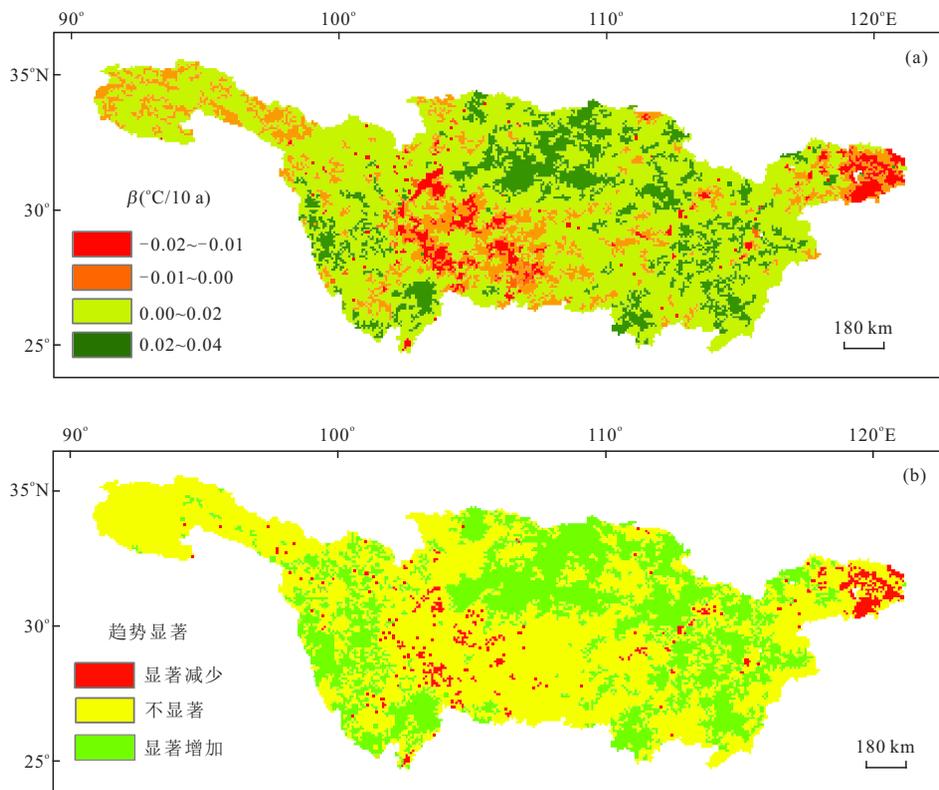


图 6 1982—2015 年长江流域年平均 NDVI 变化趋势(a)及其显著性(b)的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual mean NDVI variation (a) and its significant test (b) in the YRB during 1982—2015

非常明显。

此外,同一区域的 NDVI 在不同季节的变化也存在差异.流域中南部的 NDVI 在春季以 0~0.05/10 a 速率呈增加趋势,但在冬季以 0~0.03/

10 a 呈减少趋势(图 7a,7g).流域西北部 NDVI 在夏季呈增加趋势,然而在秋季呈减少趋势(图 7c,7e).

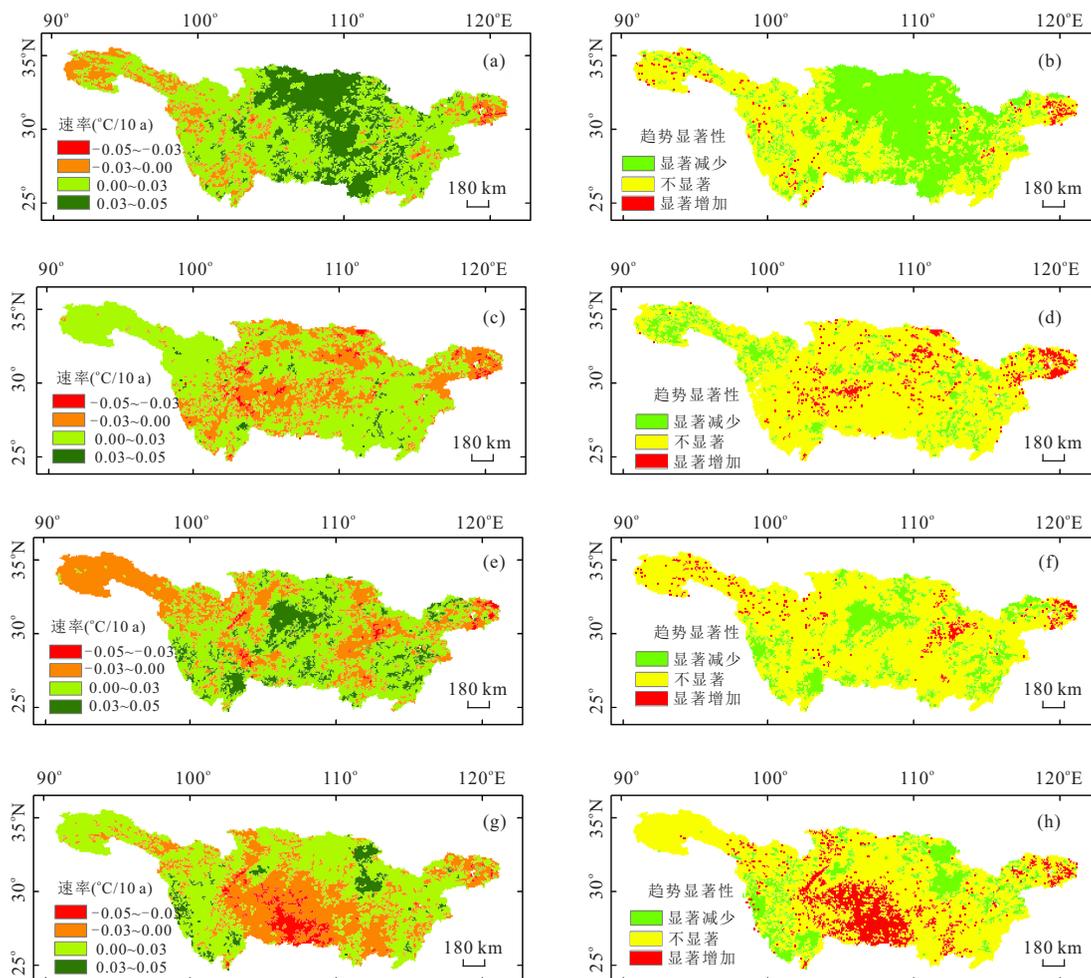


图 7 1982—2015 年长江流域春季、夏季、秋季和冬季平均 NDVI 变化趋势(a, c, e, g)及其显著性(b, d, f, h)的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of NDVI variation trend in spring, summer autumn and winter (a, c, e, g) and its significant test (b, d, f, h) in the YRB during 1982—2015

4 气温、降水量对 NDVI 的影响

4.1 气温对 NDVI 的影响

采用 Pearson 相关分析法分析了长江流域 NDVI 与气温和降水的相关性,确定气温和降水对植被变化的影响.1982—2015 年流域年平均 NDVI 与气温存在显著 ($p < 0.01$) 的正相关性,相关系数为 0.49(表 4).表 4 显示四季平均 NDVI 与气温均呈显著的正相关关系,相关系数分别为 0.65 ($p < 0.01$)、0.43 ($p < 0.01$)、0.38 ($p < 0.05$) 和 0.50 ($p < 0.01$),即春季气温对植被变化的影响最大.年均 NDVI 与气温相关系数的空间分布如图 8 所示.1982—2015 年长江流域大部分区域年均 NDVI 与气温呈显著的正相关关系 ($p < 0.05$),相关系数为 0.29 ~ 0.50,显著的负相关关系 ($p < 0.05$) 仅存在长三角地区和长江源区的部分区域,相关系数

表 4 1982—2015 年长江流域年平均 NDVI 与气温、降水的相关系数

Table 4 The correlation coefficient between annual mean NDVI and temperature (precipitation) in the YRB during 1982—2015

	时间	NDVI
气温	年	0.49***
	春	0.65***
	夏	0.43***
	秋	0.38**
	冬	0.50***
降水量	年	-0.23
	春	-0.26
	夏	-0.13
	秋	-0.15
	冬	-0.11

注: *、**和***分别表示 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平.

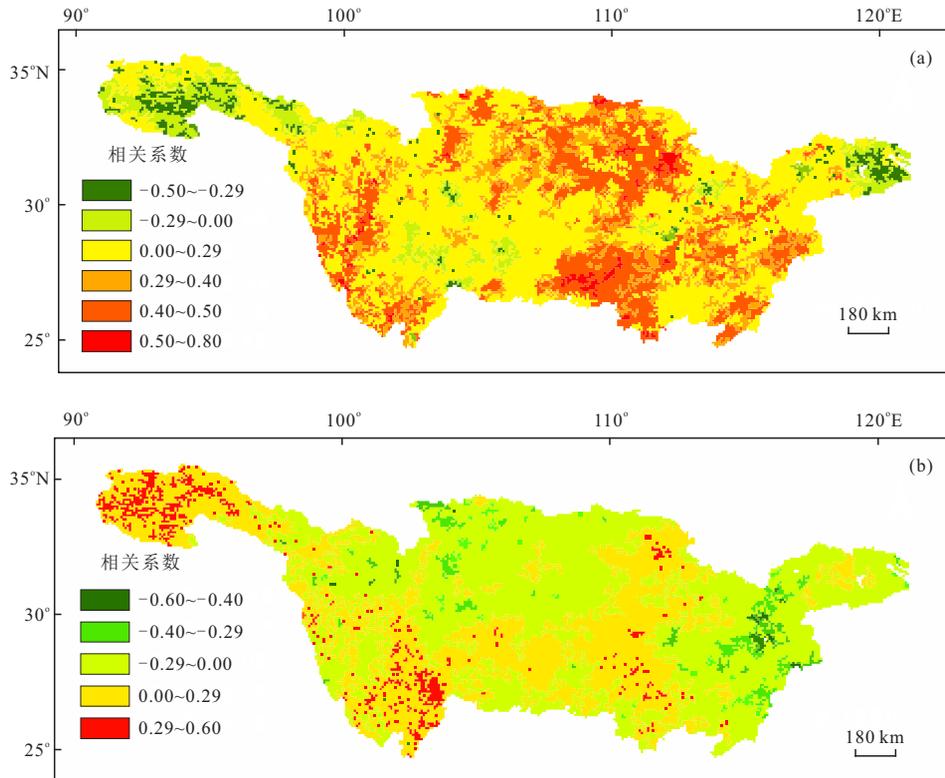


图 8 1982—2015 年长江流域年平均 NDVI 与气温(a)、降水量(b)相关系数的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of correlation coefficients between annual mean NDVI and temperature (a) and precipitation (b) during 1982—2015

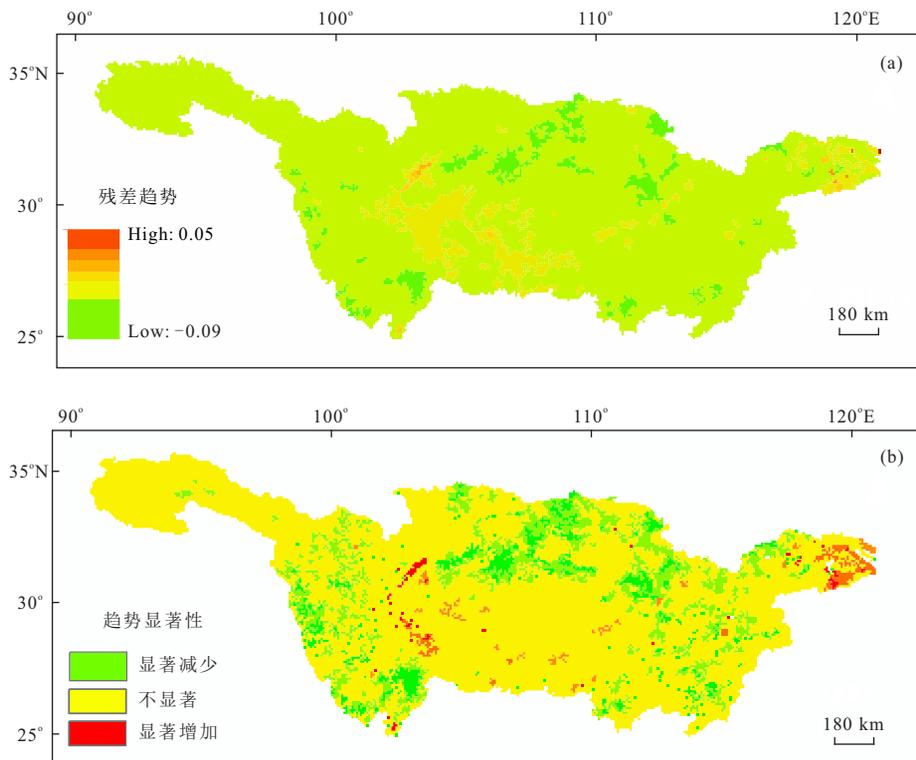


图 9 NDVI 残差变化趋势(a)及其显著性(b)的空间分布

Fig.9 The spatial pattern of trends (a) and significance (b) in the NDVI residuals

为 $-0.29 \sim -0.50$ (图8a)。

4.2 降水量对NDVI的影响

表4表明1982—2015年流域NDVI与降水量呈负相关关系,且相关性较弱并没有通过显著性检验($p > 0.1$)。空间上,长江流域大部分地区年平均NDVI与降水量呈负相关关系,但通过显著性检验($p < 0.05$)的区域较少,主要位于流域东部部分地区,相关系数为 $-0.29 \sim -0.40$;呈显著正相关关系($p < 0.05$)的区域主要位于流域西南和长江源区,相关系数为 $0.29 \sim 0.60$ (图8b)。

5 人类活动对NDVI的影响

残差变化趋势反映人类活动对植被动态的影响。NDVI残差呈上升趋势的区域占整个流域67.86%,主要分布于长江流域东部、西部和北部,而32.14%的区域呈下降趋势,主要位于流域的南部和长三角地区(图9a)。图9b显示NDVI残差显著($p < 0.05$)增加的区域主要位于长江流域北部、东南和西南部分地区,表明这些区域植被NDVI的增加主要受人类活动的影响,如生态工程的实施,而NDVI残差显著($p < 0.05$)减少的区域主要位于长江流域中西部少部分地区和长三角地区,表明人类活动的负面作用导致这些区域植被退化。

6 讨论

1982—2015年长江流域年平均NDVI与气温存在显著的正相关性。区域气温的上升导致生长季延长和光合作用加强,从而促进植被生长(Potter *et al.*, 2012; Piao *et al.*, 2015),尤其是降水丰富的地区(Zhou *et al.*, 2015)。Hou *et al.* (2015) 研究表明我国西南地区生长季NDVI与气温呈正相关。Wen *et al.* (2017) 研究表明20世纪90年代之前气温上升是导

致三峡库区NDVI增加的主要因素。然而,当不断加速上升的气温超过植被生长所需的最优值,由于蒸发的加快,严重阻碍植被的生长(Piao *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015)。同时,流域春季气温对NDVI的影响最大。这一结论与Richardson *et al.* (2010)的研究结果一致,即生长季早期气候的显著增暖对植被生长有一定的积极影响。1982—2015年流域NDVI与降水量呈较弱的负相关关系,表明降水对流域NDVI的影响不显著。Wang *et al.* (2015) 研究表明在湿润地区,由于丰富的降水,因此与气温相比,降水量并不是植被生长的主要限制因子。反之,在干旱地区,由于降水量稀少,蒸发量大,植被生长对降水量极为敏感,与气温植被NDVI与降水量的相关性更高(Bao *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2015b; Zhao *et al.*, 2020)。例如在黄土高原的半湿润地区,气温对季节性NDVI的变化有积极影响,而在干旱地区,气温对NDVI并没有显著影响(Xie *et al.*, 2016)。向菲菲等(2018)研究证实三峡库区气温对植被指数的影响大于降水,即气候变暖对小区域生态环境具有一定程度的影响。

除气候因素外,人类活动(如人口密度、人工生态恢复工程和城市化)也是影响植被覆盖变化的重要驱动因素。Evans and Geerken (2004)提出了利用残差法将气候变化和人类活动对植被覆盖的影响部分通过构建回归方程的方式进行分离,进而定量地分析人类活动对草地退化的影响程度。残差方法的提出为研究人类活动对植被覆盖变化的影响提供了一条较为可行的新途径,因此在以后的大量研究工作中有不少研究者使用了该方法。易浪等(2014)通过残差法研究了人类活动对黄土高原植被NDVI同时具有正向和负向作用,退耕还林还草工程极大地促进了该地区的植被NDVI的增加,而城市扩张、乱砍乱伐以及过度放牧则导致植被ND-

表5 2001—2013年长江流域主要土地利用类型的相互转换(10^3 km^2)

Table 5 The conversion of land use during 2001—2013

土地利用类型	草地	城镇用地	灌丛	林地	农田
草地	3 137.42	5.97	271.02	352.44	307.65
城镇用地	15.18	76.37	122.14	107.72	187.74
灌丛	313.43	12.58	1 593.83	2 263.58	777.31
林地	89.91	1.18	242.21	3 638.01	103.78
农田	52.72	29.84	515.31	268.67	2 184.93
变化量	-465.84	-383.21	-2 216.22	2 555.33	509.94

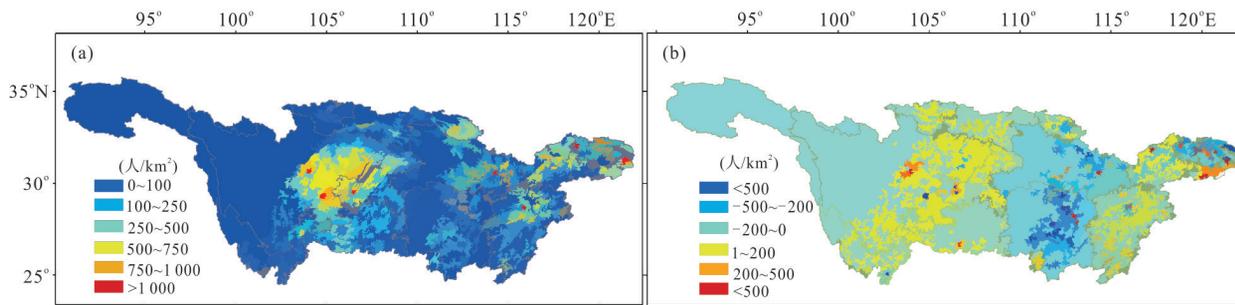


图 10 1995—2010年长江流域人口密度(a)及其变化(b)

Fig.10 Spatial distribution of the average population density (a) and the changes (b) of population density in YRB from 1995 to 2010

VI的减少.Zhang *et al.* (2016) 利用残差法研究表明,近30年人类活动在一定程度上加快了气候变化对三江源区植被生长的影响,尤其是进入21世纪以来人类活动对植被恢复起着重要作用,即生态保护与建设行动取得初步成效,但生态措施的实施效果存在空间差异.Jiang *et al.* (2017) 利用残差分析法量化分离气候变化和人类活动对植被NDVI的影响,探究了1984—2013年中亚地区石油、天然气的开采、水资源的过度开发以及农田和牧场的废弃等对植被NDVI的影响.人类活动引起的土地利用/覆被变化是影响植被NDVI的主要因子(Jiang *et al.*, 2017).长江流域的森林主要分布在流域西南、东南和北部;灌丛主要分布在流域的中南地区;农田主要集中在四川盆地和长江中下游平原地区;草地主要分布于流域西部即青藏高原东缘的高海拔地区.2001—2013年各植被类型在空间上发生了显著变化(表5).森林面积净增加了 $2.56 \times 10^5 \text{ km}^2$,占整个流域面积14.20%,主要来自灌丛的贡献, $2.26 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的灌丛转换为林地,占净增加面积的88.58%,其次来自草地和农田的贡献,转换面积分别为 $3.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $2.69 \times 10^4 \text{ km}^2$,分别占总增加面积的13.79%和10.51%.林地面积增加的区域主要集中在流域北部、东南和西南部,从而导致该区域植被NDVI增加.这可能与大范围天然林资源保护工程、自然保护区建设工程和长江防护林建设工程以及退耕还林工程的实施直接相关(Zhang *et al.*, 2017).随着城市化的快速发展,大量农田转换为城镇用地,如长三角地区,导致该区域植被NDVI下降(Liu *et al.*, 2010).农田面积净增加了 $5.10 \times 10^4 \text{ km}^2$,

占整个研究区面积2.83%,主要来自灌丛的贡献,其次是草地.灌丛面积净减少 $2.22 \times 10^5 \text{ km}^2$,占整个流域面积12.31%,主要转换为林地,其次是农田和草地.草地面积净减少了 $4.66 \times 10^4 \text{ km}^2$,占整个研究区面积2.59%,主要转换为林地,其次是灌丛和农田.人口迁移也是影响植被NDVI的主要要素之一.根据中国人口普查数据,1995—2010年长江流域总人口由 5.36×10^8 增加至 5.88×10^8 .由于自然条件和社会经济发展的影响,人口分布具有明显的空间差异,人口主要集中于四川盆地.流域东部部分地区以及长三角地区(图10a),而且随着城市化进程的不断加快,如上海,大规模人口的不断迁入导致该地区人口迅速增加,而人口迁出地区人口不断减少(图10b).人口迁移不仅影响原有的人口规模和结构,而且对区域土地利用/覆被也有一定影响(Olsson *et al.*, 2005; Gesest *et al.*, 2010).对于人口迁入地区,人口的迅速增加大大加快了土地开发的力度和速度,城市建设用地面积不断增加,而大规模劳动年龄人口的迁出导致该地区大面积耕地闲置或者退化为草地(邵景安等, 2015),这些因素都将会导致区域植被NDVI减少.

7 结论与展望

(1) 1960—2015年,长江流域年平均气温显著上升,升温速率为 $0.20 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$.流域升温速率还表现出显著的季节性差异:夏季升温速率最小,冬季最大.1960年以来,长江流域年降水量呈增加趋势,但是变化趋势都不显著.流域降水量的变化也具有显著的季节性差异:春季和秋季降水量呈减少趋势,而夏季和冬季降水量呈增加

趋势。

(2) 1982—2015年长江流域年平均NDVI以0.01/10 a的速率显著增加。长江流域年平均NDVI变化具有显著的空间差异性:流域大部分地区NDVI呈增加趋势,主要分布于长江流域北部、东部和西部部分地区,NDVI下降的区域主要位于长三角地区和中西部部分地区。

(3) 1982—2015年长江流域年平均NDVI与年平均气温显著相关,相关系数为0.49,然而与降水量呈负相关,且相关性并不显著。四季平均NDVI与气温也呈显著的正相关关系,且春季的相关性最高,秋季最低,同样与降水的相关性并不显著。表明1982—2015年整个流域的植被NDVI主要受气温的影响,受降水的影响较小,同时春季气温的显著增加对植被生长有很大的促进作用。

(4) 人类活动,如生态工程的实施,使长江流域植被NDVI呈增加趋势的区域主要分布于流域北部、东南和西南部分地区,而由于人口的迁移和土地利用变化导致植被NDVI呈下降趋势的区域主要位于流域中西部少部分地区和长三角地区。

(5) 本研究只利用偏相关和残差初步分析气候变化和人类活动对长江流域植被NDVI的影响,仅说明数理统计层面上的相互关系,对各要素之间的影响机制及不同时期的影响程度仍有待进一步说明。因此,仍需要在未来的研究中考虑更多因素的影响:气候因子(如日照时数、辐射、相对湿度等)、人类活动资料(如城市化和LUCC等)和植被变化(如NPP和EVI等)并利用更有效的方法来探讨气候变化和人类活动对植被变化的影响。

致谢:感谢姚瑞博士、牛自耕博士和向菲菲博士对数据的收集及整理。

References

- Bao, G., Qin, Z., Bao, Y., et al., 2014. NDVI-Based Long-Term Vegetation Dynamics and Its Response to Climatic Change in the Mongolian Plateau. *Remote Sensing*, 6(9): 8337—8358.
- Chen, C., Park, T., Wang, X.H., et al., 2019. China and India Lead in Greening of the World through Land-Use Management. *Nature Sustainability*, 2: 122—129.
- Eastman, J.R., Sangermano, F., Machado, E.A., et al., 2013.

- Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982—2011. *Remote Sensing*, 5(10): 4799—4818. <https://doi.org/10.3390/rs5104799>
- Evans, J., Geerken, R., 2004. Discrimination between Climate and Human-Induced Dryland Degradation. *Journal of Arid Environments*, 57(4): 535—554. [https://doi.org/10.1016/s0140-1963\(03\)00121-6](https://doi.org/10.1016/s0140-1963(03)00121-6)
- Forkel, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., et al., 2016. Enhanced Seasonal CO₂ Exchange Caused by Amplified Plant Productivity in Northern Ecosystems. *Science*, 6274: 696—699.
- Gesest, K.V.D., Vrieling, A., Dietz, T., 2010. Migration and Environment in Ghana: A Cross-District Analysis of Human Mobility and Vegetation Dynamics. *Environment & Urbanization*, 22(1):107—124.
- Gillespie, T.W., Ostermann-Kelm, S., Dong, C.Y., et al., 2018. Monitoring Changes of NDVI in Protected Areas of Southern California. *Ecological Indicators*, 88: 485—494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.031>
- Hou, W.J., Gao, J.B., Wu, S.H., et al., 2015. Interannual Variations in Growing-Season NDVI and Its Correlation with Climate Variables in the Southwestern Karst Region of China. *Remote Sensing*, 7(9): 11105—11124. <https://doi.org/10.3390/rs70911105>
- Ichii, K., Kawabata, A., Yamaguchi, Y., 2002. Global Correlation Analysis for NDVI and Climatic Variables and NDVI Trends: 1982—1990. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18): 3873—3878.
- Jiang, L.L., Jiapaer, G., Bao, A.M., et al., 2017. Vegetation Dynamics and Responses to Climate Change and Human Activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 599—600: 967—980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.012>
- Li, H.X., Liu, G.H., Fu, B.J., 2011. Response of Vegetation to Climate Change and Human Activity Based on NDVI in the Three-River Headwaters Region. *Acta Ecologica Sinica*, 31(19): 5495—5504 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.S., Yang, S.N., Liu, X.F., et al., 2015a. NDVI-Based Analysis on the Influence of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China. *Remote Sensing*, 7(9): 11163—11182. <https://doi.org/10.3390/rs70911163>
- Li, Z., Chen, Y.N., Li, W.H., et al., 2015b. Potential Impacts of Climate Change on Vegetation Dynamics in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24): 2045—2057.
- Liu, J.Y., Zhang, Z.X., Xu, X.L., et al., 2010. Spatial Patterns

- and Driving Forces of Land Use Change in China during the Early 21st Century. *Journal of Geographical Sciences*, 20(4): 483–494. <https://doi.org/10.1007/s11442-010-0483-4>
- Mao, J.F., Ribes, A., Yan, B.Y., et al., 2016. Human-Induced Greening of the Northern Extratropical Land Surface. *Nature Climate Change*, 6(10): 959–963. <https://doi.org/10.1038/nclimate3056>
- Mu, S.J., Li, J.L., Chen, Y.Z., et al., 2012. Spatial Differences of Variations of Vegetation Coverage in Inner Mongolia during 2001–2010. *Acta Geographica Sinica*, 67(9): 1255–1268(in Chinese with English abstract).
- Olsson, L., Eklundh, L., Ardoe, J., 2005. A Recent Greening of the Sahel: Trends, Patterns and Potential Causes. *Journal of Arid Environments*, 63(3): 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.008>
- Piao, S.L., Fang, J.Y., 2001. Dynamic Vegetation Cover Change over the Last 18 Years in China. *Quaternary Sciences*, 21(4): 294–302 (in Chinese with English abstract).
- Piao, S.L., Mohammat, A., Fang, J.Y., et al., 2006. NDVI-Based Increase in Growth of Temperate Grasslands and Its Responses to Climate Changes in China. *Global Environmental Change*, 16(4): 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.002>
- Piao, S.L., Yin, G.D., Tan, J.G., et al., 2015. Detection and Attribution of Vegetation Greening Trend in China over the Last 30 Years. *Global Change Biology*, 21(4): 1601–1609. <https://doi.org/10.1111/gcb.12795>
- Potter, C., Klooster, S., Genovese, V., 2012. Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems from 2000 to 2009. *Climatic Change*, 115(2): 365–378. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0460-2>
- Qian, L.L., He, Z.H., Liang, H., et al., 2019. Spatial-Temporal Evolution Characteristics of Agricultural Drought Based on Precipitation Z Index in Guizhou. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 37(1): 10–14(in Chinese with English abstract).
- Qin, D.H., 2014. Climate Change Science and Sustainable Development. *Progress in Geography*, 33(7): 874–883(in Chinese with English abstract).
- Qu, S., Wang, L.C., Lin, A.W., et al., 2018. What Drives the Vegetation Restoration in Yangtze River Basin, China: Climate Change or Anthropogenic Factors? *Ecological Indicator*, 90:438–450.
- Richardson, A.D., Black, T.A., Ciais, P., et al., 2010. Influence of Spring and Autumn Phenological Transitions on Forest Ecosystem Productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365: 3227–3246. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0102>
- Shao, J.A., Zhang, S.C., Li, X.B., 2015. The Role of Rural Farmland Transfer in Preventing Farmland Abandonment in the Mountainous Areas. *Acta Geographica Sinica*, 70(4):636–649 (in Chinese with English abstract).
- Song, X.P., Hansen, M.C., Stehman, S.V., et al., 2018. Global Land Change from 1982 to 2016. *Nature*, 560: 639–643.
- Tian, F., Brandt, M., Liu, Y.Y., et al., 2016. Remote Sensing of Vegetation Dynamics in Drylands: Evaluating Vegetation Optical Depth (VOD) Using AVHRR NDVI and in Situ Green Biomass Data over West African Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 177: 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.056>
- Tian, Q., 2016. Impacts of Climate Change and Human Activity on the Water and Sediment Flux of the Yellow, Yangtze and Pearl River Basins over the Past 60 Years(Dissertation). East China Normal University, Shanghai (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Wang, K.L., Zhang, M.Y., et al., 2015. Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Cover in Hilly Southern China. *Ecological Engineering*, 81: 451–461. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2015.04.022>
- Wang, P.H., Zhang, T., Yu, X.L., 2019. Change Characteristics and Periodic Evolution of Rainfall Erosion of Guilin in Recent 65 Years. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 37(2): 23–28(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhang, M.J., Wang, S.J., et al., 2014. Changes in Temperature Extremes in the Yangtze River Basin, 1962–2011. *Journal of Geographical Sciences*, 24(1): 59–75. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1073-7>
- Wen, Z.F., Wu, S.J., Chen, J.L., et al., 2017. NDVI Indicated Long-Term Interannual Changes in Vegetation Activities and Their Responses to Climatic and Anthropogenic Factors in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Science of the Total Environment*, 574: 947–959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.049>
- Xiang, F.F., Wang, L.C., Yao, R., 2018. The Characteristics of Climate Change and Response of Vegetation in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 43(Suppl.1): 42–52(in Chinese with English abstract).
- Xie, B.N., Jia, X.X., Qin, Z.F., et al., 2016. Vegetation Dynamics and Climate Change on the Loess Plateau, China: 1982–2011. *Regional Environmental Change*, 16(6): 1583–1594. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0881-3>
- Yi, L., Ren, Z.Y., Zhang, C., 2014. Vegetation Cover, Climate

- and Human Activities on the Loess Plateau. *Resources Science*, 36(1): 166–174(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qi, T. Y., Li, J. F., et al., 2015. Spatiotemporal Variations of Pan Evaporation in China during 1960–2005: Changing Patterns and Causes. *International Journal of Climatology*, 35(6): 903–912. <https://doi.org/10.1002/joc.4025>
- Zhang, Y., Zhang, C. B., Wang, Z. Q., et al., 2016. Vegetation Dynamics and Its Driving Forces from Climate Change and Human Activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. *The Science of the Total Environment*, 563–564: 210–220.
- Zhang, Y. L., Song, C. H., Band, L. E., et al., 2017. Reanalysis of Global Terrestrial Vegetation Trends from MODIS Products: Browning or Greening? *Remote Sensing of Environment*, 191: 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.018>
- Zhao, S., Chang, F. M., Li, T. G., 2018. Seasonal and Inter-Annual Anomalies Sea Surface Temperature Offshore Northeastern Taiwan Its Implication Climate Reconstructions. *Earth Science*, 43(3): 851–861(in Chinese with English abstract).
- Zhao, W., Hu, Z. M., Guo, Q., et al., 2020. Contributions of Climatic Factors to Interannual Variability of the Vegetation Index in Northern China Grasslands. *Journal of Climate*, 33(1):175–183.
- Zheng, F. F., Chen, Y. F., Wang, Y. L., et al., 2018. Influence of Seasonal Temperature Variation and pH Disparity on bGDGTs Thermometers in Soils. *Earth Science*, 43(Suppl.1):71–83(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Zhang, L., Fensholt, R., et al., 2015. Climate Contributions to Vegetation Variations in Central Asian Drylands: Pre- and Post-USSR Collapse. *Remote Sensing*, 7(3):2449–2470. <https://doi.org/10.3390/rs70302449>
- ### 附中文参考文献
- 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰, 2011. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 31(19):5495–5504.
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等, 2012. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 67(9):1255–1268.
- 朴世龙, 方精云, 2001. 最近18年中国植被覆盖的动态变化. *第四纪研究*, 21(4):294–302.
- 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等, 2019. 基于降水Z指数的贵州省农业干旱时空演化特征. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 37(1):10–14.
- 秦大河, 2014. 气候变化科学与人类可持续发展. *地理科学进展*, 33(7):874–883.
- 邵景安, 张仕超, 李秀彬, 2015. 山区土地流转对缓解耕地撂荒的作用. *地理学报*, 70(4):636–649.
- 田清, 2016. 近60年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究(博士论文). 上海: 华东师范大学.
- 王朋辉, 张陶, 于小磊, 2019. 近65年桂林市降雨侵蚀力变化特征与周期演化. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 37(2):23–28.
- 向菲菲, 王伦澈, 姚瑞, 等, 2018. 三峡库区气候变化特征及其植被响应. *地球科学*, 43(增刊1):42–52.
- 易浪, 任志远, 张翀, 2014. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. *资源科学*, 36(1):166–174.
- 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等, 2018. 台湾东北部海域海表温度季节与年际异常及其对历史气候重建的启示. *地球科学*, 43(3):851–861.
- 郑峰峰, 陈雨霏, 王永莉, 等, 2018. 季节温度变化及土壤pH差异对土壤bGDGTs温度指标的影响. *地球科学*, 43(增刊1):71–83.