

北京師範大學

硕士学位论文

论文题目：植被对气候变化响应的时滞性与全球格局

作者：武东海

导师：赵祥 副教授 周涛 教授

系别年级：地理学与遥感科学学院 2012 级

学号：201221490011

学科专业：地图学与地理信息系统

完成日期：2015 年 4 月

北京师范大学研究生院

北京师范大学学位论文原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

学位论文作者完全了解北京师范大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京师范大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。保密的学位论文在解密后适用于本授权书。

本人签名： _____ 日期： _____

导师签名： _____ 日期： _____

植被对气候变化响应的时滞性与全球格局

摘 要

全球气候变化显著影响陆地生态系统中植被的生长。受气候变化时空差异性与生态系统空间异质性的影响,植被对气候变化的响应存在非常大的差异,表现为空间响应的多样性与时间响应的滞后性。揭示植被对气候变化响应特征的时空格局是深入理解气候变化对植被影响的前提,也是定量评价未来气候变化影响的基础。之前对于大尺度植被气候交互效应的研究大多使用相同时刻的气象因子和植被指数建立模型,较少考虑植被对气候因子响应的时滞效应。这在一定程度上忽略了植被对气候响应的内在机制,进而增大了模型模拟结果的不确定性。

本研究基于 GIMMS3g (Global Inventory Monitoring and Modeling Systems) NDVI 数据与 CRU (Climate Research Unit) 温度、降水和辐射数据,定量分析了全球植被对于不同气候因子响应的空间差异与时间滞后。研究首要分析了全球植被对于不同气候因子的滞后效应,并建立了相应的多元线性回归模型和偏相关模型,统计分析了综合气候因子对于不同植被类型生长变化的解释度以及不同植被类型的主要气候驱动因子。最后通过对比分析揭示了 1982-2008 年间全球 NDVI 显著变化区域的主要气候驱动因子。

研究结果表明:(1)不同植被类型对于气候因子响应的滞后性表现出较大的差异,并且主要气候驱动因子随植被类型的改变而变化,其主要原因是受植被的属性以及周围气候环境影响;(2)考虑植被滞后效应后,综合气候因子能够解释全球植被生长 64% 的变异,比未考虑植被滞后效应的模型相对提高 11%;(3)1982-2008 全球 GIMMS3g NDVI 显著变化 ($p < 0.05$) 的区域占总统计区的 33%,对比分析结果显示其主要气候驱动因子是温度;具体到区域尺度,引起植被生长变化的原因各不相同,除了气候因子变化的驱动外,人类活动和自然扰动的影响也不能忽略。

本研究定量分析了植被对气候变化的滞后响应,并评价了其在全球变化研究中的重要性,结果准确刻画出全球植被生长的气候驱动格局,对于评价当前与预测未来气候变化背景下的植被动态变化具有重要的参考价值。

关键词: 滞后响应, 植被生长, 气候变化, GIMMS3g NDVI, 温度, 降水, 辐射

TIME-LAG EFFECTS OF GLOBAL VEGETATION RESPONSES TO CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

Climate conditions significantly affect vegetation growth in terrestrial ecosystems. Due to the spatial heterogeneity of ecosystems, the vegetation responses to climate vary considerably with the diverse spatial patterns and the time-lag effects, which are the most important mechanism of climate-vegetation interactive effects. Extensive studies focused on large-scale vegetation-climate interactions use the simultaneous meteorological and vegetation indicators to develop models; however, the time-lag effects are less considered, which tend to increase uncertainty.

In this study, we aim to quantitatively determine the time-lag effects of global vegetation responses to different climatic factors using the GIMMS3g NDVI time series and the CRU temperature, precipitation, and solar radiation datasets. First, this study analyzed the time-lag effects of global vegetation responses to different climatic factors. Then, a multiple linear regression model and partial correlation model were established to statistically analyze the roles of different climatic factors on vegetation responses, from which the primary climate driving factors for different vegetation types were determined.

The results showed that (1) both the time-lag effects of the vegetation responses and the major climate driving factors that significantly affect vegetation growth varied significantly at the global scale, which was related to the diverse vegetation and climate characteristics; (2) regarding the time-lag effects, the climatic factors explained 64% variation of the global vegetation growth, which was 11% relatively higher than the model ignoring the time-lag effects; (3) for the area with a significant change trend (for the period 1982 - 2008) in the global GIMMS3g NDVI ($p < 0.05$), the primary driving factor was temperature; and (4) at the regional scale, the variation in vegetation growth was also related to human activities and natural disturbances. Considering the time-lag effects is quite important for better predicting and evaluating the vegetation dynamics under the background of global climate change.

KEY WORDS: Time-lag effects, Vegetation growth, Climate change, GIMMS3g NDVI, Temperature, Precipitation, Solar radiation.

目 录

植被对气候变化响应的时滞性与全球格局	I
摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	3
图目录	5
表目录	7
第 1 章 前 言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 植被及气候的动态变化	1
1.2.2 植被和气候的交互效应	2
1.2.3 研究数据和方法的选择	3
1.3 研究目标、研究内容、拟解决的关键科学问题和技术路线	4
1.3.1 研究目标	4
1.3.2 研究内容	4
1.3.3 拟解决的关键科学问题	5
1.3.4 技术路线	5
第 2 章 研究数据和方法	7
2.1 研究数据	7
2.1.1 气象数据	7
2.1.2 植被数据	7
2.1.3 土地利用分类数据	8
2.2 研究方法	9
2.2.1 植被对气候因子的滞后响应分析	9
2.2.2 气候因子对植被变化的解释度分析	10
2.2.3 植被生长的主要气候驱动因子分析	10
2.2.4 1982-2008 全球植被变化的归因分析	11
第 3 章 植被对气候因子滞后响应的空间格局	12
3.1 引言	12
3.2 方法	12
3.3 结果	12

3.3.1 植被生长对温度的滞后响应	12
3.3.2 植被生长对降水的滞后响应	14
3.3.3 植被生长对辐射的滞后响应	16
3.4 讨论	18
3.5 小结	19
第 4 章 气候因子对植被生长贡献率的分布格局	20
4.1 引言	20
4.2 方法	20
4.3 结果	20
4.3.1 综合气候因子对植被生长的解释度	20
4.3.2 影响植被生长的主要气候驱动因子	24
4.4 讨论	29
4.4.1 综合气候因子对植被生长的解释度	29
4.4.2 影响植被生长的主要气候驱动因子	29
4.5 小结	29
第 5 章 1982-2008 全球植被显著性变化归因探究	30
5.1 引言	30
5.2 方法	30
5.3 结果	30
5.4 讨论	33
5.5 小结	35
第 6 章 结论和展望	36
6.1 主要结论	36
6.2 主要创新点	37
6.3 存在的不足和对未来的展望	37
参考文献	39
在读期间科研成果	46
致 谢	48

图目录

图 1-1 本研究的基本技术路线.....	6
图 2-1 2001-2008 年 MODIS IGBP 未变化植被类型图	8
图 3-1 植被和温度在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，白色区域未做统计分析。 图 A 表示相关系数的空间分布；图 B 表示对应相关系数的显著性检验	14
图 3-2 植被和温度在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局，白色区域未 做统计分析。图 A 表示滞后时间的空间分布；图 B 表示不同植被类型滞后时间的频 率分布图	14
图 3-3 植被和降水在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，白色区域未做统计分析。 图 A 表示相关系数的空间分布；图 B 表示对应相关系数的显著性检验	15
图 3-4 植被和降水在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局，白色区域未 做统计分析。图 A 表示滞后时间的空间分布；图 B 表示不同植被类型滞后时间的频 率分布图	16
图 3-5 植被和辐射在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，白色区域未做统计分析。 图 A 表示相关系数的空间分布；图 B 表示对应相关系数的显著性检验	18
图 3-6 植被和辐射在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局，白色区域未 做统计分析。图 A 表示滞后时间的空间分布；图 B 表示不同植被类型滞后时间的频 率分布图	18
图 4-1 综合气候因子对植被生长解释度的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型决定系数；图 B 表示考虑和不考虑植被 滞后效应情况下多元线性回归模型决定系数的差异	21
图 4-2 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数，白色区域未做统 计分析。图 A 表示多元线性回归模型的温度系数；图 B 表示多元线性回归模型温度 系数的显著性	22
图 4-3 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数，白色区域未做统 计分析。图 A 表示多元线性回归模型的降水系数；图 B 表示多元线性回归模型降水 系数的显著性	23
图 4-4 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数，白色区域未做统 计分析。图 A 表示多元线性回归模型的辐射系数；图 B 表示多元线性回归模型辐射 系数的显著性	24
图 4-5 考虑植被滞后效应情况下偏相关模型系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示偏 相关模型的温度系数；图 B 表示偏相关模型温度系数的显著性	27

图 4-6 考虑植被滞后效应情况下偏相关模型系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示偏相关模型的降水系数；图 B 表示偏相关模型降水系数的显著性.....	27
图 4-7 考虑植被滞后效应情况下偏相关模型系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示偏相关模型的辐射系数；图 B 表示偏相关模型辐射系数的显著性.....	28
图 4-8 影响植被生长的主要气候驱动因子的全球格局，白色区域未做统计分析.....	28
图 5-1 1982-2008 全球植被显著性变化 ($p < 0.05$) 的空间分布。图 A 表示 GIMMS3g NDVI 1982-2008 显著性变化的空间分布，白色区域未做统计分析，灰色区域表示不显著；图 B 表示全球植被显著性变化区域对应显著性变化的气候因子 ($p < 0.05$)，灰色表示该区域没有显著变化的气候因子	31
图 5-2 考虑植被滞后效应情况下温度变化的全球格局。图 A 表示 1982-2008 温度线性趋势的空间分布，白色区域未做统计分析；图 B 表示全球温度显著性变化的空间格局	32
图 5-3 考虑植被滞后效应情况下降水变化的全球格局。图 A 表示 1982-2008 降水线性趋势的空间分布，白色区域未做统计分析；图 B 表示全球降水显著性变化的空间格局	32
图 5-4 考虑植被滞后效应情况下辐射变化的全球格局。图 A 表示 1982-2008 辐射线性趋势的空间分布，白色区域未做统计分析；图 B 表示全球辐射显著性变化的空间格局	33

表目录

表 2-1 本研究选取的 MODIS IGBP 植被类型.....	9
表 3-1 基于样点的全球不同植被类型对温度滞后时间的均值和方差.....	13
表 3-2 基于样点的全球不同植被类型对降水滞后时间的均值和方差.....	16
表 3-3 基于样点的全球不同植被类型对辐射滞后时间的均值和方差.....	17
表 4-1 基于样点的温度、降水和辐射对全球不同植被类型解释度 (R^2) 的均值和方差..	22
表 4-2 基于样点的温度、降水和辐射对全球不同植被类型解释度 (R^2) 的差异.....	23
表 4-3 基于样点的全球不同植被类型偏相关模型和多元线性回归模型温度系数均值和方差	25
表 4-4 基于样点的全球不同植被类型偏相关模型和多元线性回归模型降水系数均值和方差	26
表 4-5 基于样点的全球不同植被类型偏相关模型和多元线性回归模型辐射系数均值和方差	26

第1章 前言

1.1 研究背景及意义

在过去的几十年里，全球气候变化显著影响陆地生态系统植被的生长 (Kelly & Goulden, 2008; Reichstein *et al.*, 2013; Walther *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2014)。受气候变化的时空差异性与生态系统的空间异质性影响，植被对气候变化的响应存在非常大的差异，表现为空间响应的多样性与时间响应的滞后性。揭示植被对气候变化响应特征的时空格局是深入理解气候变化对植被影响的前提，也是定量评价未来气候变化影响的基础。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 植被及气候的动态变化

近百年来的全球气候变化对人类生活和生态环境产生了重要的影响。而如今产生的一系列气候问题主要由人类自身造成，且已超过了自然的可承受范围 (Karl & Trenberth, 2003; Stocker *et al.*, 2014)。全球在过去 100 年间增温约 0.6 °C，主要经历了两个阶段：1910-1945，1976- (Walther *et al.*, 2002)。其中近 30 年来的全球增温速度是前一阶段的两倍，也是近 100 年来增温速率最快的时间段 (Houghton *et al.*, 2001)。IPCC 第五次评估报告指出，1880-2012 年间，全球平均温度上升 0.85 °C (Stocker *et al.*, 2014)。由于海洋气温变化幅度较慢，气温升高主要由陆地升温引起。在北半球区域，1983-2012 近 30 年的气温急剧升高 (<https://www2.ucar.edu/climate/faq/how-much-has-global-temperature-risen-last-100-years>)，这在过去 1400 年都实属罕见。2010 年是近 100 年来最热的一年，2012 年也被称为是第 10 个最热的年份 (Morice *et al.*, 2012)。目前来看，科学家普遍认为气候变暖这一事实的主要源头是工业化以来人类活动导致的大气中温室气体含量的急剧上升所致。研究指出，从 1965 年开始，大气中 CO₂ 浓度由 280ppmv 上升至 370ppmv，上升幅度约为 31% (Karl & Trenberth, 2003)。而在最新的 IPCC AR5 结果中显示，2011 年大气中温室气体 (CO₂、CH₄ 和 N₂O) 的浓度已达到 391ppmv (Stocker *et al.*, 2014)。

在全球增温的大背景下，陆表系统在近 30 年里遭受着重大的环境演变。厄尔尼诺、极端降雨、极端干旱以及北极海冰消融等事件随之而生 (Easterling *et al.*, 2000; Karl & Trenberth, 2003; Kumar, 2013; Zhang *et al.*, 2014)。其中发生在 2005 和 2010 年亚马逊的两次极端干旱对这个全球最大的热带雨林产生了巨大的影响，导致大面积树木死亡和 NPP 的降低 (Lewis *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2011; Zhao & Running, 2010)。发生在

2003 年的欧洲干旱造成了 NPP 的大面积下降 (Ciais *et al.*, 2005)。近几年发生在中国 2009-2010 年西南地区极端干旱, 严重影响了当地人的正常生活, 造成了地区极大的经济损失, 并且造成当地区域气候异常和生态系统的破坏 (Lu *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012)。全球变暖也造成了北极海冰厚度降低, 北极海冰面积减少 (Johannessen *et al.*, 1999; Screen & Simmonds, 2010)。另外, 气候变暖对于全球植被的生长同时也会起到积极的作用, 尤其对于受温度胁迫较强的北半球高纬度植被, 促进了植被的光合作用效率, 增强了植被的生长活性。研究表明近 30 年来受全球增温影响, 北半球中高纬度植被生长季起始点提前, 生长季终止点延后, 生长季总长度变长 (Jeong *et al.*, 2011)。对于全球植被碳循环的估算结果表明, 1982-1999 年间全球 NPP 增加 3.4 Pg C; 2000-2009 年间全球 NPP 下降 0.55 Pg C (Nemani *et al.*, 2003; Zhao & Running, 2010)。对于全球近 30 年的植被动态变化的研究结果表明, 1982-2011 年间全球年最大植被覆盖度显著性上升区域占全球陆地的 19.01%, 显著性下降区域比例为 2.7% (Wu *et al.*, 2014)。

1.2.2 植被和气候的交互效应

植被的生长变化主要受到外界气候要素的影响, 例如温度、降水和辐射等 (Beer *et al.*, 2010; Bonan, 2008; Craine *et al.*, 2012; Nemani *et al.*, 2003; Peteet, 2000; Walther *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2011)。气候要素的变化会在一定程度上影响植被的生长, 区域植被的变化同时也会给气候环境一定的反馈作用 (Brando *et al.*, 2010; Jiang & Liang, 2013)。研究表明, 全球不同区域植被受气象要素影响的主要驱动因子有显著差异, 其中热带雨林地区的主导因素为辐射, 干旱半干旱地区的主导因素为降水, 北半球中纬度地区的主导因素为温度和降水, 而北半球高纬度地区植被的主导因子为温度和辐射 (Nemani *et al.*, 2003)。最新的研究表明, 最高温和最低温对于北半球不同区域的植被又有不同的影响 (Peng *et al.*, 2013)。Jong *et al.* 在研究中建立了植被与气候因子的内在关系, 结果表明综合气候因子可以解释植被生长变化的 54% (Jong *et al.*, 2013)。然而, 前面大部分对于植被对气候的响应研究只分析了当前对应时间二者的相关性, 并未考虑植被对气候要素的滞后效应。

近年来, 越来越多的研究表明植被对气候存在一定时间的滞后性 (Chen *et al.*, 2014; Davis, 1989; Kuzyakov & Gavrichkova, 2010; Rammig *et al.*, 2014; Saatchi *et al.*, 2013; Vicente-Serrano *et al.*, 2012)。Braswell *et al.* 对于植被对气候年纪滞后的相关研究表明, 不同生态系统对温度的滞后响应存在显著差异 (Braswell *et al.*, 1997)。控制实验表明, 草地生态系统增温会导致当年和次年的 NEP (net ecosystem productivity) 显著降低, 存在两年的滞后期 (Arnone Iii *et al.*, 2008)。就区域尺度的相关研究而言, 往往选取遥感数据进行研究, 结果同样发现植被对气候要素存在一定的滞后时间。例如, Anderson *et al.* 研究表明, 亚马逊热带雨林对不同的气候要素 (辐射、降水和气溶胶光学厚度) 存在一定时间的滞后效应, 并且表现各异 (Anderson *et al.*, 2010)。利用遥感气象数据产品对澳大利亚植被的研究表明, 植

被对区域土壤水分存在一个月的滞后期 (Chen *et al.*, 2014)。以上所有的研究均表明植被对气候要素存在滞后效应, 即植被的生长并不一定受当前气候条件的驱动, 可能之前的气候条件对植被生长的影响更大。因此, 当我们分析植被与气候交互机制的时候, 应该更多考虑植被对气候的滞后响应。

总体来看, 植被对气候的滞后效应对于研究植被气候的交互机制具有很大价值, 然而目前基于大尺度的气候植被相关研究大多采用当前对应时间的植被气候因子建立关系 (Jong *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2013), 较少考虑植被的滞后效应, 这样就会给模型结果带来很大的不确定性。由于目前仍然缺乏对于植被滞后效应空间格局的相关研究, 在本研究中, 我们将通过定量化分析逐步探究植被和气候因子之间的关系, 并重点讨论不同类型植被对同一气候因子的响应格局, 以及同一类型植被对不同气候要素的响应差异。

1.2.3 研究数据和方法的选择

卫星遥感数据作为研究气候系统模拟以及生态系统变化的最重要手段之一, 通过对大气、陆表以及海洋系统过程定量化以及时空变化分析, 获取区域以及全球尺度的综合信息 (Yang *et al.*, 2013)。就目前来看, 遥感数据是能够提供完整的空间信息和时间信息的技术手段, 同时也是研究土地利用现状和长时间陆表变化的最有效方法 (Bontemps *et al.*, 2011; Gong *et al.*, 2013)。在多种基于遥感技术分析陆表植被动态变化的方法中, 植被指数分析法已经成为研究全球环境变化以及极端气候事件的主流方法 (de Jong *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2013; Saleska *et al.*, 2007; Samanta *et al.*, 2010)。其中最常用的表征植被生长变化的遥感数据有 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)、Enhanced Vegetation Index (EVI) 和 Leaf Area Index (LAI)。而由遥感红光波段和近红外波段反演而来的 NDVI 植被指数已成为最简单, 最有效的植被指数 (Tucker, 1979)。NDVI 本身的特点有助于去除整个遥感系统中由辐射、光谱、定标、噪声、几何位置以及大气环境变化引起的系统偏差 (Brown *et al.*, 2006)。

基于 NDVI 的应用研究主要集中在全球植被变化分析、全球干旱事件分析 (Anderson *et al.*, 2010; Mu *et al.*, 2013)、全球 NPP 时空变化分析 (Zhao *et al.*, 2005)、北半球物候的时空变化分析 (Cong *et al.*, 2013; Wu & Liu, 2013) 以及全球植被覆盖度 (Jing *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2000) 等研究。目前基于大尺度的遥感分析中, 较为常用的 NDVI 数据集有: The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)、The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)、The NASA Global Inventory, Monitoring, and Modeling Studies (GIMMS)、SPOT-vegetation、Landsat TM 和 Landsat ETM+。在所有已发布的 NDVI 数据集中, GIMMS3g NDVI 是覆盖时间最长 (1981-2011) 的数据集。GIMMS3g NDVI 第一版数据集在 2007 年发布, 覆盖范围为 1981-2006 (Tucker *et al.*, 2005), 近期发布了第三版 GIMMS3g 数据集, 覆盖范围为 1981-2011 (Fensholt & Proud, 2012)。目前该数据集已经被广泛用与检测全球植被健康状况和植被动态变化分析的研究 (Fensholt *et al.*, 2013;

Hashimoto *et al.*, 2013; van Leeuwen *et al.*, 2013; Vrieling *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013)。本研究也因此选用 GIMMS3g NDVI 数据集来表征植被的生长状况。

因为本研究重点分析植被对气候变化滞后响应的全球格局，所以我们选用与 GIMMS3g NDVI 能够在空间上对应的气候因子数据。其中 Climate Research Unit (CRU) 数据是目前精度和质量都相对较高的全球尺度数据集，并且已经被很多气候变化的最沿研究所使用，同时该数据也是 IPCC 报告的重要参考数据 (Jones *et al.*, 2012; Jong *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2013; Stocker *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2011)。由于植被的生长主要受到温度、辐射和降水三个因子的影响 (Nemani *et al.*, 2003)，因此本研究选用 CRU 数据的温度、降水和辐射的月尺度时间序列来表征气候变化的基本特征。

为了研究植被对不同气候因子的滞后效应，我们选用了一元线性回归模型，分析植被对气候因子的滞后时间，该模型简单易行，适用于全球尺度的植被气候交互响应分析。基于植被的滞后效应，我们又选取了多元线性回归模型和偏相关模型来分析综合气候因子对植被生长的解释度以及影响植被生长的主要气候驱动因子。以上这两种模型对建立植被与气候之间的关系具有很大的价值。最后为了讨论 1982-2008 年全球植被显著性变化区域的背景原因，我们采用时间序列趋势分析法研究植被和气候因子变化的空间格局，对照分析影响植被变化的主要驱动因子。在此过程中，本文对所有的统计分析均进行显著性检验，以表征研究结果的可靠性。

1.3 研究目标、研究内容、拟解决的关键科学问题和技术路线

1.3.1 研究目标

本文的研究目标是基于 GIMMS3g NDVI 数据以及 CRU 温度、降水和辐射数据统计分析植被对气候变化滞后响应的全球格局。具体包括：(1) 植被对不同气候因子滞后响应的时空规律；(2) 综合气候因子对植被生长解释度的空间格局；(3) 影响植被生长的主要气候驱动因子；(4) 1982-2008 全球植被显著性变化的驱动因子。以上 4 个方面是本研究的主要目标，即从多个角度揭示植被对气候因子的滞后效应，并探究植被与气候的内在关系。

1.3.2 研究内容

(1) 植被对气候因子滞后响应的时空规律

基于 GIMMS3g NDVI 时间序列和 CRU 温度、降水和辐射时间序列，通过一元线性回归模型，分别分析植被对 3 种气候因子滞后时间的全球格局以及不同植被类型的滞后时间。

(2) 气候因子对植被生长贡献率的分布格局

通过多元线性回归模型和偏相关模型，在植被滞后效应的基础上建立植被气候之间的

相关关系，分析综合气候因子对植被生长的解释度以及影响植被生长的主要气候驱动因子。

(3) 1982-2008 全球植被显著性变化归因探究

针对 GIMMS3g NDVI 数据和基于滞后效应的 CRU 温度、降水和辐射数据，采用最小二乘法对时间序列数据进行线性趋势拟合，并通过对比分析探究近 27 年来全球植被显著性变化区域的主要背景驱动因子。

1.3.3 拟解决的关键科学问题

植被的生长变化主要受到温度、降水和辐射的影响，并且植被生长对于气候胁迫有一定时间的滞后效应，这一过程在全球不同区域表现上又有显著差异。之前的研究一方面是在大的空间格局下分析植被对气候因子的响应；另一方面是在区域尺度上分析植被生长对气候因子的滞后作用。但是目前的研究缺乏对于植被滞后效应较为系统性的研究，即基于多气候因子综合分析植被生长对气候变化滞后响应的全球格局研究。我们在本研究中拟解决的关键科学问题有：

- (1) 植被生长对于温度、降水和辐射均存在滞后效应，那么全球植被对不同气候因子滞后效应的空间格局有何差异？不同植被类型对于气候要素的滞后效应有何特点？
- (2) 考虑植被滞后效应的情况下，3 种气候因子对植被变化的解释度是多少，和未考虑滞后效应有何差别？
- (3) 考虑植被滞后效应的情况下，影响全球植被生长的主要驱动因子格局是何分布？不同植被类型的气候驱动因子又有何差异？
- (4) 基于植被对气候要素的响应分析结果，如何解释 1982-2008 全球植被显著性变化的原因？是单纯的气候因子驱动，还是有其他要素的影响？

1.3.4 技术路线

本研究主要通过遥感时间序列数据和气候因子时间序列数据建立关系，通过一元线性回归分析、多元线性回归分析、偏相关分析以及时间序列趋势分析，在全球尺度上研究植被对气候变化的滞后响应、气候因子对植被生长的解释率、植被生长的气候驱动因子，并探讨近 27 年来全球及区域植被显著变化的背景原因。图 1-1 是本研究的基本技术路线图。

技术路线图主要分为三部分内容：(1) 基于植被和气候因子时间序列数据分析植被对气候因子的滞后效应；(2) 基于植被的滞后效应分析综合气候因子对植被生长的解释度 (R^2) 以及植被的主要气候驱动因子；(3) 通过时间序列趋势分析以及对比讨论分析，揭示 1982-2008 全球植被显著性变化的背景驱动因子。

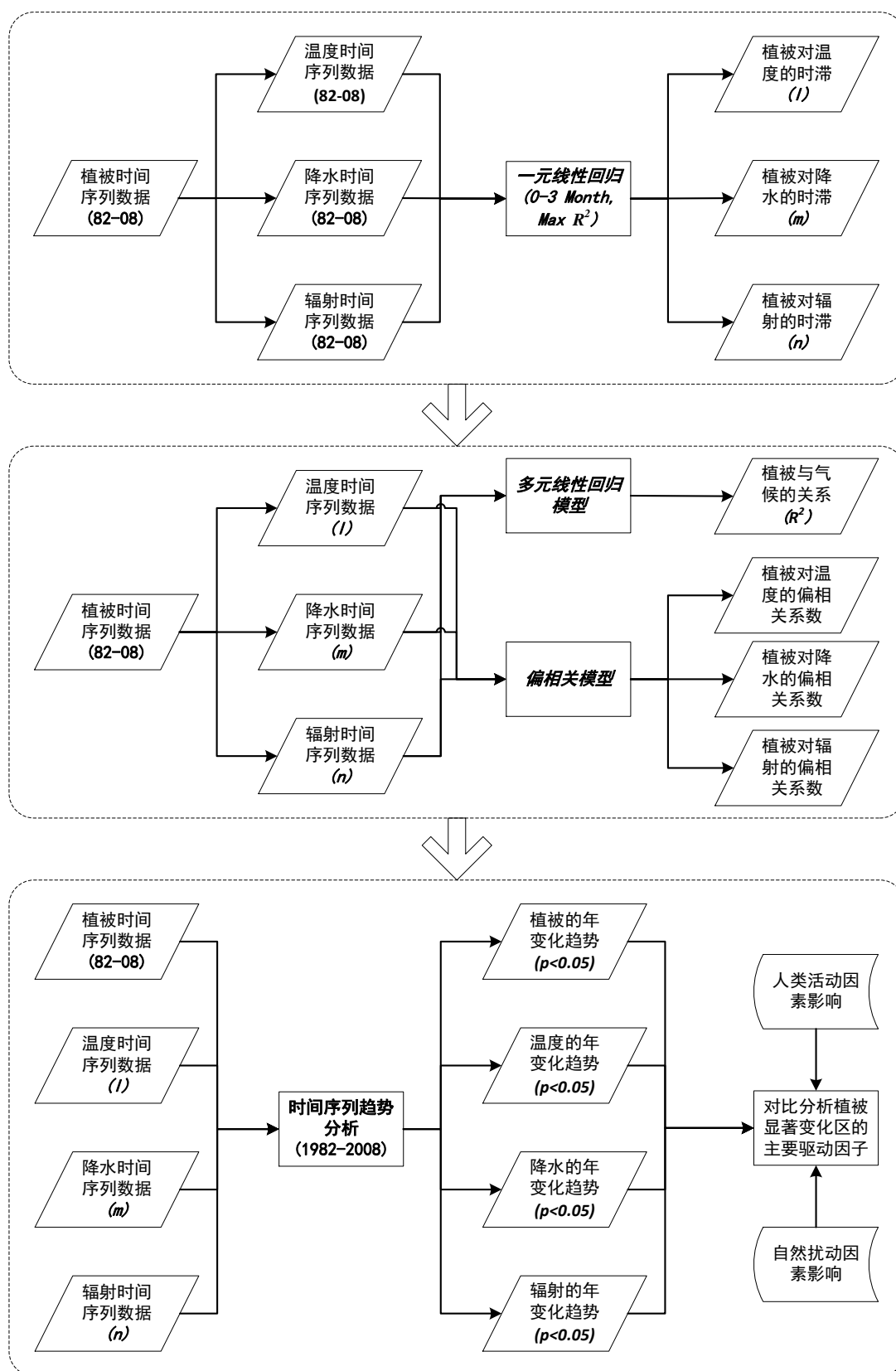


图 1-1 本研究的基本技术路线

Figure 1-1 The technical route in this study.

第2章 研究数据和方法

2.1 研究数据

本研究使用的数据包括 Climate Research Unit V3.21 温度和降水时间序列数据、CRU-NCEP V5.2 太阳下行辐射时间序列数据、GIMMS3g NDVI 植被指数时间序列数据和 MCD12C1 V5.1 土地利用分类数据。上述四种数据集均为覆盖全球的网格数据，下面将对每一种数据的基本特征做简要介绍。

2.1.1 气象数据

本文使用的温度和降水数据主要来自 Climate Research Unit (CRU), version TS3.21 (<http://www.cru.uea.ac.uk/>) (Harris *et al.*, 2014)。该数据为 1901-2012 年覆盖全球的月尺度数据，空间分辨率为 0.5°。CRU V3.21 数据集是由超过 4000 个全球分布的气象站点基于空间自相关函数插值而成 (Mitchell & Jones, 2005; New *et al.*, 2000)。太阳下行辐射数据来自 CRU-NCEP V5.2 数据集，该数据集和 CRU V3.21 气象数据具有相同的时间分辨率和空间分辨率。CRU-NCEP V5.2 数据集是由 CRU TS3.21 数据 (1901-2012) 和 NCEP 再分析数据 (1948-2009) 合成。

CRU 气象数据具有数据质量高，应用范围广等优点，已经成为研究气候变化科学的基础数据集 (Jones *et al.*, 2012; Jong *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2011)。

2.1.2 植被数据

本文使用的植被数据主要来自 GIMMS3g NDVI (Tucker *et al.*, 2005)。该数据集是由 the National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), the Advanced Very High-resolution Radiometer (AVHRR) 遥感数据合成 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/>)，覆盖范围为全球，空间分辨率为 0.083°，时间分辨率为 15-day，覆盖的时间范围为 1982-2011 (Fensholt & Proud, 2012)。该数据合成过程中选取了最大值合成法 (MVC)，有效的降低了大气干扰和传感器系统带来的误差 (Holben, 1986)。

GIMMS3g NDVI 数据是目前覆盖时间最长的遥感植被指数集，数据质量较高，具有很高的应用价值，是目前研究全球植被动态变化的重要参考依据 (de Jong *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2014)。本文基于月尺度研究植被对不同气候因子的滞后效应，所以我们采用最大值合成法 (MVC) 将 GIMMS3g NDVI 时间序列合称为月数据。同时为了在同一空间分辨率尺度上进行统计分析，我们将 GIMMS3g

NDVI 数据聚合为 0.5°。为了和前人的研究作对比 (Jong *et al.*, 2013), 突出本研究的具体价值, 我们同样选取了 1982-2008 的气象和遥感数据做统计分析。

2.1.3 土地利用分类数据

为了统计分析不同植被类型对气候因子的响应特点, 本文选用了 MODIS collection5.1 (MCD12C1) (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd12c1) 土地利用分类数据 (Friedl *et al.*, 2010; Friedman *et al.*, 2000)。该数据集包含五种分类体系, the International Geosphere and Biosphere Programme (IGBP) global vegetation classification scheme, the University of Maryland (UMD) scheme, the MODIS-derived LAI/fPAR scheme, MODIS-derived Net Primary Production (NPP) scheme, the Plant Functional Type (PFT) scheme。我们选取应用最广的 IGBP 分类体系进行统计分析, 该分类体系包含 11 种自然植被, 3 种非自然植被类型和 3 种非植被类型, 空间分辨率为 0.05°; 时间覆盖范围为 2001-2008 (Friedl *et al.*, 2002; Friedl *et al.*, 2010)。

为了提高分析精度, 消除土地利用变化所造成的干扰, 在本研究中我们统计了 2001-2008 年全球不变植被类型图 (图 2-1)。如图所示, 不同植被类型的分布规律基本一致, 一般分布在同一纬度带; 然而对于开放灌木, 主要分布于两个温度区 (亚热带和寒带地区)。由于这两个地区的气候条件差异较大, 在研究中我们将开放灌木分为两个区域进行分别研究。由于本研究基于空间分辨率 0.5° 进行统计分析, 我们在不变植被类型图 (图 2-1) 的基础上选取对应 0.5°×0.5° 像元内, 有超过 90% 的区域含有同种植被类型的像元作为统计样本。如果在全球尺度下一种植被类型的样本点超过 50, 那么这种植被类型就会被选作后续分析。表 2-1 中显示了本文所选取的植被类型和样本点个数。

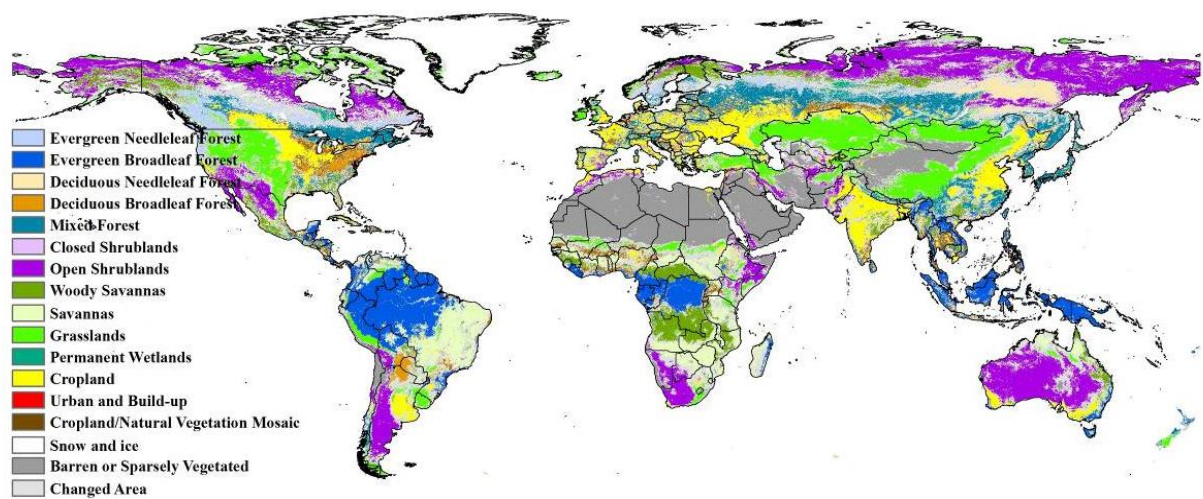


图 2-1 2001-2008 年 MODIS IGBP 未变化植被类型图

Figure 2-1 Unchanged IGBP vegetation map of MCD12C1 from 2001 to 2008.

表 2-1 本研究选取的 MODIS IGBP 植被类型

Table 2-1 MODIS IGBP vegetation types used in this study.

No.	IGBP Land Cover Type	IGBP Land Cover Type	Samples
01	Evergreen needleleaf forest	常绿针叶林	102
02	Evergreen broadleaf forest	常绿阔叶林	2471
03	Deciduous needleleaf forest	落叶针叶林	181
04	Deciduous broadleaf forest	落叶阔叶林	94
05	Mixed forest	混交林	628
N7	Open shrublands (North)	高纬度灌木	2515
S7	Open shrublands (South)	中低纬度灌木	1645
08	Woody savannas	多树草原	702
09	Savannas	稀树草原	828
10	Grasslands	草原	2636
12	Croplands	作物	1353
14	Cropland/natural vegetation mosaic	作物/自然植被	53

2.2 研究方法

在本研究中，植被对于温度、降水和辐射的综合响应分析主要从以下四个方面展开：（1）植被对气候因子的滞后响应分析；（2）气候因子对植被变化的解释度分析；（3）植被生长的主要气候驱动因子分析；（4）1982-2008 年全球植被变化的归因分析。下面就这 4 个过程所用到的统计方法做详细介绍。

2.2.1 植被对气候因子的滞后响应分析

分别以 CRU 温度、降水和太阳辐射数据为自变量，GIMMS3g NDVI 为因变量，计算二者在不同滞后时间尺度上的相关性。之前的研究表明植被对于气候因子响应的滞后时间在一个季度以内 (Anderson *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2014; Rundquist & Harrington Jr, 2000)，因此，本研究中我们限定植被对于气候的滞后时间范围为 0-3 个月。计算公式如（公式 2.1-2.3）所示：

$$NDVI = k_i * TMP + b \quad (\text{公式 2.1})$$

$$NDVI = k_i * PRE + b \quad (\text{公式 2.2})$$

$$NDVI = k_i * SWD + b \quad (\text{公式 2.3})$$

其中， k_i 代表滞后时间为 i 个月时对应方程的回归系数； i 的取值范围为 0-3； $NDVI$ 代表 GIMMS3g NDVI 时间序列月数据（1982-2008）； TMP 、 PRE 、 SWD 分别代表对应滞后时

间 i 的温度、降水和太阳辐射时间序列月数据； R^2 代表回归方程的决定系数。本研究所有的统计分析都基于植被的生长季，其定义为年内温度大于 0°C ，NDVI 大于 0.2 所对应的月份 (Piao *et al.*, 2006)。针对每一种气候因子，0-3 个月的滞后条件下最大 R^2 对应的月作为 GIMMS3g NDVI 对该气候因子的滞后时间。统计分析均基于像元尺度计算，统一在 $p = 0.05$ 上进行显著性检验。最后基于不变植被类型图，统计分析不同植被类型对气候因子的滞后效应。

2.2.2 气候因子对植被变化的解释度分析

CRU 温度、降水和太阳辐射作为自变量，GIMMS3g NDVI 作为因变量，建立多元线性回归模型。计算公式如（公式 2.4）所示：

$$NDVI = A * TMP_l + B * PRE_m + C * SWD_n + D + \varepsilon \quad (\text{公式 2.4})$$

其中， l, m, n 分别表示植被 NDVI 对于三种气候因子的滞后时间；NDVI 代表 GIMMS3g NDVI 时间序列数据（1982-2008）； TMP 、 PRE 、 SWD 分别代表对应滞后时间的温度、降水和太阳辐射时间序列数据； A 、 B 、 C 分别代表多元线性回归的回归系数； D 代表回归常数项； ε 表示随机误差； R^2 为多元线性回归方程的决定系数。统计分析均基于像元尺度计算；为提高模型结果的可靠性，统一在 $p = 0.05$ 上进行显著性检验。最后基于不变植被类型图，统计分析综合气候因子对不同类型植被生长变化的解释度。

2.2.3 植被生长的主要气候驱动因子分析

在考虑植被 NDVI 对不同气候因子滞后效应的基础上，统计控制其他两个气候因子变量后，GIMMS3g NDVI 与每一种气候因子的偏相关系数。计算公式如（公式 2.5）所示：

$$r_{12,3\sim p}^2 = \frac{R_{1(2,3,\dots,p)}^2 - R_{1(3,\dots,p)}^2}{1 - R_{1(3,\dots,p)}^2} \quad (\text{公式 2.5})$$

其中， $r_{12,3\sim p}$ 代表控制其他变量后，变量 1 和 2 的偏相关系数； $R_{1(2,3,\dots,p)}^2$ 表示变量 1 与变量（2~ p ）进行回归分析的决定系数； $R_{1(3,\dots,p)}^2$ 表示变量 1 与变量（3~ p ）进行回归分析的决定系数。例如，计算 NDVI 对温度的偏相关系数， $r_{12,3\sim p}$ 代表控制降水和辐射两个变量，NDVI 和温度的偏相关系数； $R_{1(2,3,\dots,p)}^2$ 表示 NDVI 与温度、降水和辐射回归的决定系数； $R_{1(3,\dots,p)}^2$ 表示 NDVI 与降水和辐射回归的决定系数。统计分析均基于像元尺度计算；为提高模型结果的可靠性，统一在 $p = 0.05$ 上进行显著性检验。最后基于多年不变植被类型

图，统计分析不同类型植被生长的气候驱动因子。

2.2.4 1982-2008 全球植被变化的归因分析

在明确植被对气候因子响应机制的基础上，进一步解释 1982-2008 年来全球植被变化的气候驱动因子。因此针对 GIMMS3g NDVI 数据和基于滞后效应的 CRU 温度、降水和辐射数据，求 1982-2008 年各因子生长季平均变化趋势。研究采用最小二乘法对植被气候时间序列数据进行线性趋势拟合，并统一在 $p = 0.05$ 上进行显著性检验。最后通过空间对比分析，统计植被 NDVI 显著性变化区域内对应气候因子的显著性变化。并根据植被对气候因子的响应特征，分析区域植被显著变化的原因以及主要的气候驱动因子。所有分析均基于像元尺度，并且在 $p = 0.05$ 上进行显著性检验。

第3章 植被对气候因子滞后响应的空间格局

3.1 引言

植被对于气候因子的响应过程往往存在一定时间的滞后性，即当气候条件改变的情况下，植被并不一定能够立即对周围的气候变化做出响应，往往会借助周围环境和自身调节来逐步“适应”气候变化造成的周围环境条件的改变。简而言之，又可以表达为植被的生长并不一定受当前的气候条件主导，往往之前气候条件的作用会更加影响当前植被的生长。然而，不同的植被类型由于其自身结构功能和所处环境的不同，表现出来的滞后响应特征也均会有一定差异。下面就根据本文的研究结果，具体分析不同植被类型对三种气候因子的滞后响应特征。

3.2 方法

以 CRU 温度、降水或太阳辐射数据为自变量，GIMMS3g NDVI 数据为因变量，分别计算二者在不同滞后时间尺度上的相关性。其中最大相关性所对应的月被认为是植被对气候因子的滞后时间。本文定义的滞后时间范围为 0-3 月，其中 0 代表植被对气候因子不存在滞后响应，1-3 代表植被对气候因子存在 1-3 月的滞后期。最后基于 MODIS IGBP 未变化植被类型图（图 2-1，表 2-1），统计不同植被类型对 3 种气候因子的滞后时间。详细方法描述请见研究数据和方法中的 2.2.1。

3.3 结果

植被对温度、降水和辐射三个气候指标的滞后时间由长时间序列 GIMMS3g NDVI 和 CRU 气象数据统计得出（图 3-1-图 3-6，表 3-1-表 3-3）。结果证实了该研究的假设，即不同植被类型对同一种气候因子的滞后效应存在较大的差异性，并且同种植被类型对不同气候因子的滞后效应均有显著差别，统计结果在全球尺度上一致通过 $p = 0.05$ 的显著性检验。

3.3.1 植被生长对温度的滞后响应

在植被生长对温度的滞后响应结果中，图 3-1 表示植被和温度在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，图 3-2 表示植被和温度在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局。图 3-1 中，植被和温度表现出较强的相关性，并且在全球尺度上一致通过

显著性检验 ($p < 0.05$), 且绝大多数区域通过 $p = 0.01$ 的显著性水平。植被和温度在全球大部分区域表现为正相关, 即温度升高会促进植被的生长; 然而在一些干旱和半干旱地区, 温度升高会抑制植被的生长。

在植被对于温度滞后响应的全球格局中(图 3-2), 南北半球中高纬度地区(30N-90N, 30S-90S) 植被对于当月温度的相关性最强, 并未表现出滞后效应。低纬度地区(30S-30N) 植被对于温度存在一定的滞后效应, 大多数区域的滞后时间超过 1 个月, 而在赤道附近地区, 植被对于温度的滞后效应表现也不明显。

不同植被类型对温度的滞后响应表现出较大差异(表 3-1)。其中大部分森林生态系统对于温度的响应不存在时间上的滞后, 其中常绿阔叶林、落叶针叶林和混交林未表现出滞后效应的样本点占总样本点的 62.97%、100%和 94.43%, 平均滞后时间为 0.82 (1.20SD)、0.00 (0.00SD) 和 0.08 (0.39SD)。常绿针叶林对温度的滞后时间较长, 表现为一个月温度滞后的样本点的比率为 61.76%, 平均滞后时间为 0.62 (0.49SD)。落叶阔叶林对于温度滞后时间更长, 表现为两个月滞后的样本点比率为 60.64%, 平均滞后时间为 1.35 (0.90SD)。不同纬度带灌木对温度的滞后有显著差别, 北半球高纬度灌木表现为当月相关最强, 平均滞后时间为 0.07(0.26SD); 中低纬度灌木内部差异性较大, 平均滞后时间为 1.10(1.13SD)。多树草原和稀树草原对温度的滞后时间较为一致, 二者生态系统内部的差异性也较大, 平均滞后时间分别为 1.70 (1.11SD) 和 1.91 (1.11SD)。草地生态系统当月响应的样本比为 54.55%, 平均滞后 0.92 (1.20SD)。农作物的温度当月响应样本比为 74.06%, 平均滞后时间为 0.39 (0.80SD)。

表 3-1 基于样点的全球不同植被类型对温度滞后时间的均值和方差

Table 3-1 Mean and standard deviation (SD) of the time-lag of the GIMMS3g NDVI response to the CRU3.21 temperature (TMP) among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	0.62	0.49
02	Evergreen broadleaf forest	2471	0.82	1.20
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.00	0.00
04	Deciduous broadleaf forest	94	1.35	0.90
05	Mixed forest	628	0.08	0.39
N7	Open shrublands (North)	2515	0.07	0.26
S7	Open shrublands (South)	1645	1.10	1.13
08	Woody savannas	702	1.70	1.11
09	Savannas	828	1.91	1.11
10	Grasslands	2636	0.92	1.20
12	Croplands	1353	0.39	0.80
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	0.96	1.37

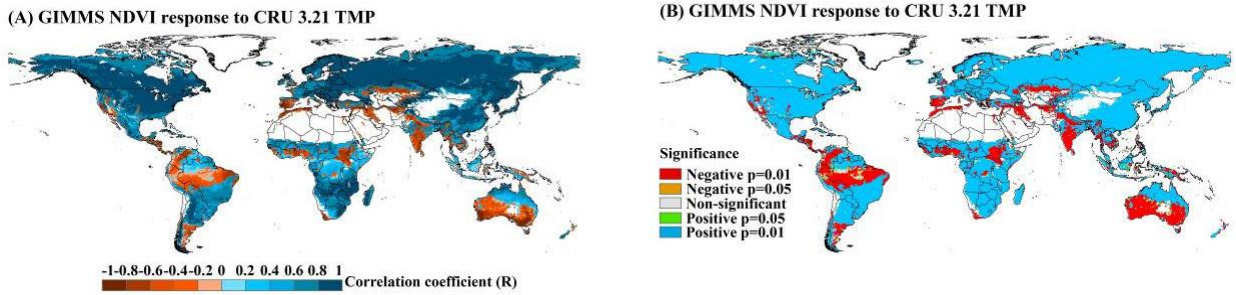


图 3-1 植被和温度在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示相关系数的空间分布；图 B 表示对应相关系数的显著性检验

Figure 3-1 Correlation coefficient (R) and its significance at which the maximum correlation between climatic factors and the GIMMS3g NDVI is found. Areas with no statistics are depicted in white. (A) Correlation coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 temperature (TMP); (B) Significance of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 temperature (TMP).

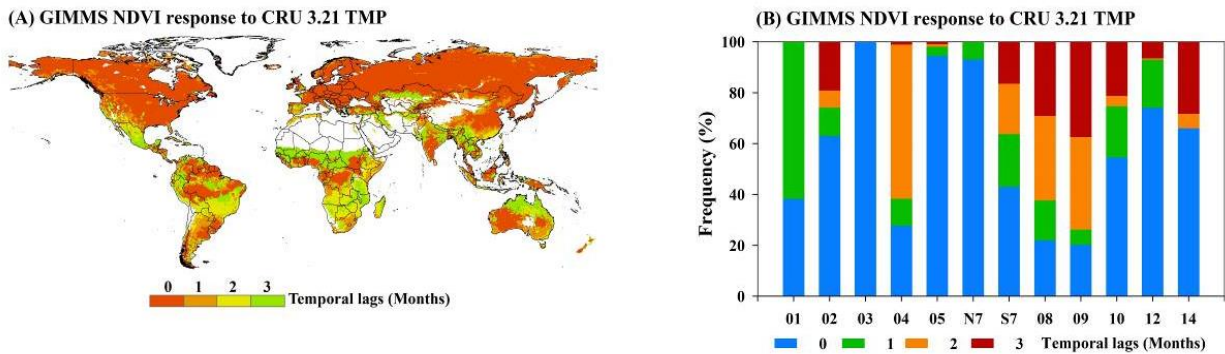


图 3-2 植被和温度在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示滞后时间的空间分布；图 B 表示不同植被类型滞后时间的频率分布图

Figure 3-2 Climatic factors' time lag at which the maximum correlation between climatic factors and the GIMMS3g NDVI is found. Areas with no statistics are depicted in white. (A) Time lag of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 temperature (TMP); (D) Frequency map of Figure 3-2(A) among vegetation types.

3.3.2 植被生长对降水的滞后响应

在植被生长对于降水滞后效应的结果中，图 3-3 表示植被和降水在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，图 3-4 表示植被和降水在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局。图 3-3 中，植被和降水表现出较强的相关性，并且在全球尺度上一致通

过显著性检验 ($p < 0.05$), 且绝大多数区域通过 $p = 0.01$ 的显著性水平。植被和降水在全球大部分区域表现为正相关, 尤其在干旱半干旱地区, 即降水升高会促进植被的生长; 然而赤道附近的热带雨林地区和北半球高纬度地区, 降水的升高会抑制植被生长。

在植被对于降水滞后响应的全球格局中 (图 3-4), 北半球高纬度植被大部分为当月响应最强, 未表现出滞后效应。干旱半干旱地区的滞后时间大约为 1 个月, 表明区域对水分的需求较高, 并且前一个月的降水对当前植被生长的影响最大。这一现象同样被之前的研究所验证 (Rundquist & Harrington Jr, 2000), 研究发现在美国堪萨斯州, 草地生态系统对降水因子的滞后时间也为一个月; 并且考虑植被滞后效应的情况下, 区域 NDVI 与降水的相关系数会提高 0.3-0.4。此外在热带雨林地区 (亚马逊热带雨林和刚果热带雨林), 植被对降水未表现出滞后响应; 而在中高纬度湿润地区, 植被对降水的滞后期较长, 为 2-3 个月。

不同植被类型对降水的滞后响应表现出较大差异 (表 3-2)。其中对于森林生态系统, 滞后响应的时间大多在 1 个月以内, 常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林和混交林的平均滞后时间为 0.97 (0.97SD)、1.09 (1.33SD)、0.51 (0.67SD)、1.19 (0.45SD) 和 0.80 (1.13SD)。其中落叶阔叶林的内部差异性最小, 一个月滞后样本点的比率为 79.79%。不同纬度带灌木对降水的滞后响应有显著差别, 北半球高纬度灌木表现为当月滞后的样本点比率为 51.49%, 平均滞后时间为 1.14 (1.31SD); 中低纬度灌木内部差异性较大, 响应时间较长, 平均滞后时间为 1.78 (0.90SD)。多树草原、稀树草原和草原生态系统对降水的滞后效应表现相似, 滞后一个月的样本点比率分别为 51.14%、67.15% 和 60.51%; 平均滞后时间为 0.87 (0.80SD)、1.34 (0.59SD) 和 1.04 (0.78SD)。农田生态系统对降水因子一个月滞后的样本点比率为 49.05%, 平均滞后时间为 1.15 (0.90SD)。

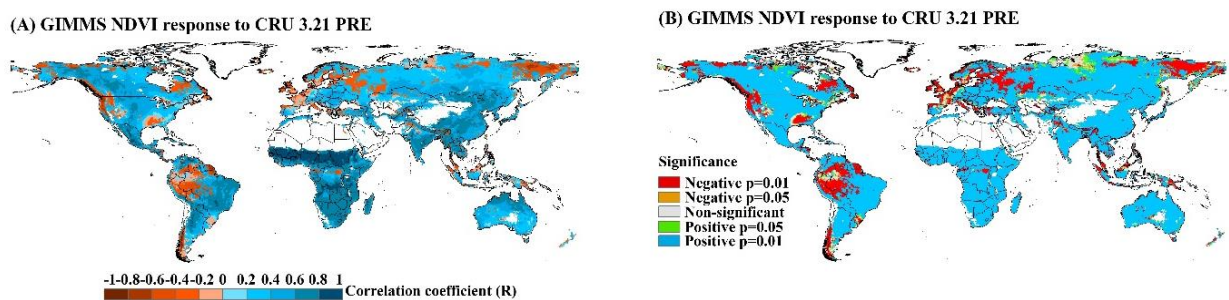


图 3-3 植被和降水在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局, 白色区域未做统计分析。图 A 表示相关系数的空间分布; 图 B 表示对应相关系数的显著性检验

Figure 3-3 Correlation coefficient (R) and its significance at which the maximum correlation between climatic factors and the GIMMS3g NDVI is found. Areas with no statistics are depicted in white. (A) Correlation coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 precipitation (PRE); (B) Significance of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 precipitation (PRE).

表 3-2 基于样点的全球不同植被类型对降水滞后时间的均值和方差

Table 3-2 Mean and standard deviation (SD) of the time-lag of the GIMMS3g NDVI response to the CRU3.21 precipitation (PRE) among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	0.97	0.97
02	Evergreen broadleaf forest	2471	1.09	1.33
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.51	0.67
04	Deciduous broadleaf forest	94	1.19	0.45
05	Mixed forest	628	0.80	1.13
N7	Open shrublands (North)	2515	1.14	1.31
S7	Open shrublands (South)	1645	1.78	0.90
08	Woody savannas	702	0.87	0.80
09	Savannas	828	1.34	0.59
10	Grasslands	2636	1.04	0.78
12	Croplands	1353	1.15	0.90
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	1.06	0.79

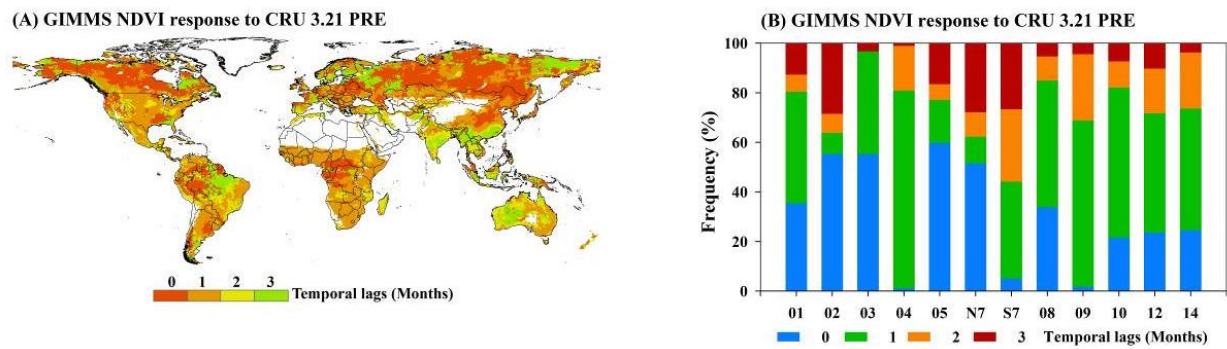


图 3-4 植被和降水在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示滞后时间的空间分布；图 B 表示不同植被类型滞后时间的频率分布图

Figure 3-4 Climatic factors' time lag at which the maximum correlation between climatic factors and the GIMMS3g NDVI is found. Areas with no statistics are depicted in white. (A) Time lag of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 precipitation (PRE); (D) Frequency map of Figure 3-4(A) among vegetation types.

3.3.3 植被生长对辐射的滞后响应

在植被生长对于辐射滞后效应的结果中，图 3-5 表示植被和辐射在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，图 3-6 表示植被和辐射在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局。图 3-5 中，植被和辐射表现出较强的相关性，并且在全球尺度上一致通

过显著性检验 ($p < 0.05$), 且绝大多数区域通过 $p = 0.01$ 的显著性水平。植被和辐射在全球大部分区域表现为正相关, 尤其在北半球中高纬度地区, 即辐射升高会促进植被的生长; 然而在赤道附近的低纬度地区, 辐射的升高会抑制植被生长。

在植被对于辐射滞后响应的全球格局中 (图 3-6), 北半球高纬度植被均有 1 个月的滞后期, 说明前一个月的辐射强度对当月的植被生长具有重要的指示意义。全球其他地区对辐射滞后时间的差异性较大, 但大部分滞后时间都超过 1 个月。

不同植被类型对辐射的滞后响应均表现出较大差异 (表 3-2)。其中对于森林生态系统, 常绿针叶林、常绿阔叶林和落叶阔叶林的系统内部差异性较大, 平均滞后时间为 1.05 (0.61SD)、1.29 (1.04SD) 和 2.01 (0.75SD); 落叶针叶林和混交林均表现为一个月的滞后, 样本点比率分别为 100% 和 91.24%, 平均滞后时间为 1.00 (0.00SD) 和 1.09 (0.31SD)。不同纬度带灌木对辐射的滞后响应有显著差别, 北半球高纬度灌木表现为一个月滞后的样本点比率为 81.47%, 平均滞后时间为 1.19 (0.39SD); 中低纬度灌木内部差异性较大, 响应时间较长, 平均滞后时间为 1.57 (1.05SD)。多树草原、稀树草原和草原生态系统对辐射的滞后效应内部差异性均较大, 平均滞后时间为 1.30 (1.35SD)、1.95 (1.34SD) 和 1.19 (1.13SD)。农田生态系统滞后一个月的样本比率为 56.02%, 平均滞后时间为 0.87 (0.71SD)。

表 3-3 基于样点的全球不同植被类型对辐射滞后时间的均值和方差

Table 3-3 Mean and standard deviation (SD) of the time-lag of the GIMMS3g NDVI response to the CRU3.21 solar radiation (SWD) among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	1.50	0.61
02	Evergreen broadleaf forest	2471	1.29	1.04
03	Deciduous needleleaf forest	181	1.00	0.00
04	Deciduous broadleaf forest	94	2.01	0.75
05	Mixed forest	628	1.09	0.31
N7	Open shrublands (North)	2515	1.19	0.39
S7	Open shrublands (South)	1645	1.57	1.05
08	Woody savannas	702	1.30	1.35
09	Savannas	828	1.95	1.34
10	Grasslands	2636	1.19	1.13
12	Croplands	1353	0.87	0.71
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	1.19	1.04

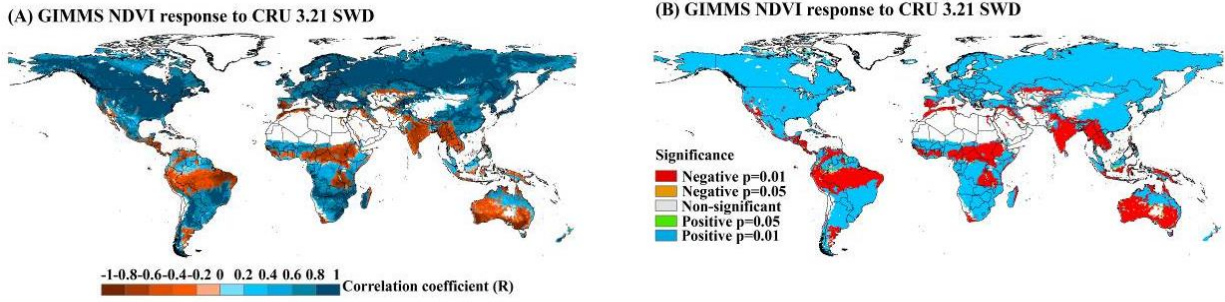


图 3-5 植被和辐射在 0-3 个月滞后期内最大相关性的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示相关系数的空间分布；图 B 表示对应相关系数的显著性检验

Figure 3-5 Correlation coefficient (R) and its significance at which the maximum correlation between climatic factors and the GIMMS3g NDVI is found. Areas with no statistics are depicted in white. (A) Correlation coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 solar radiation (SWD); (B) Significance of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 solar radiation (SWD).

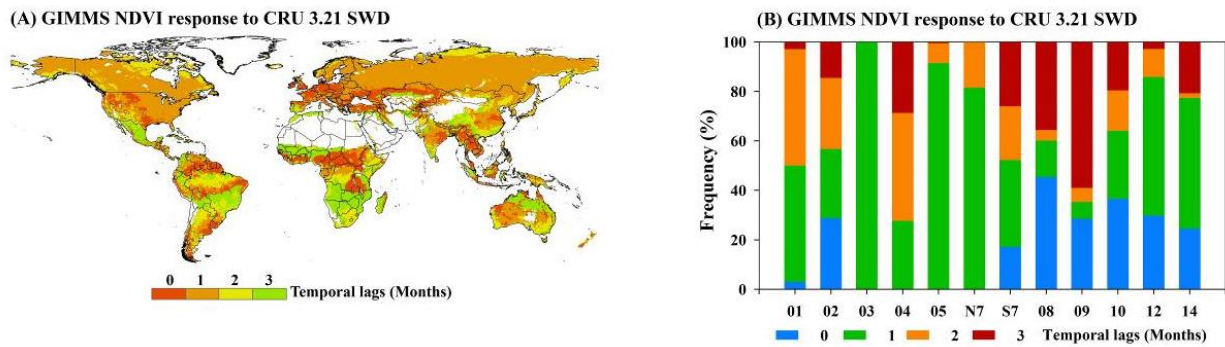


图 3-6 植被和辐射在 0-3 个月滞后期内最大相关性对应滞后时间的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示滞后时间的空间分布；图 B 表示不同植被类型滞后时间的频率分布图

Figure 3-6 Climatic factors' time lag at which the maximum correlation between climatic factors and the GIMMS3g NDVI is found. Areas with no statistics are depicted in white. (A) Time lag of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 solar radiation (SWD); (D) Frequency map of Figure 3-6(A) among vegetation types.

3.4 讨论

植被对气候因子滞后响应的研究结果揭示了全球不同植被类型对于 3 种气候因子的滞后响应特性。其中就植被对于温度的滞后效应而言，植被生长季节平均温度从赤道向两极逐渐降低，植被生长对于温度条件的需求随纬度的升高而增加。因此在北半球中高纬度地

区以及海拔较高的青藏高原等地区，大部分植被对于温度并不表现出滞后效应，植被生长受当月温度影响最大。而对于生长季平均温度较高的区域，植被生长受温度的驱动存在一定时间尺度的滞后效应。而在干旱半干旱地区（澳大利亚南部和南美洲南部），植被对于温度同样也不存在滞后效应，并且植被和温度呈负相关。这一现象是由于温度升高会促使土壤水分散失加速，从而导致区域干旱，抑制植被生长。全球尺度下植被生长对于降水的滞后效应在北半球中高纬度地区表现不明显，而在干旱半干旱地区，大约滞后一个月。现象说明了区域植被对于水分的需求，同时也表明在干旱和半干旱地区，并非当月降水决定植被生长，而是前一个月的降水影响最强。中高纬度带植被对于辐射的滞后约为一个月，原因可能是该区域相对于全球其他区域植被生长季平均辐射较小，植被生长需要更多的太阳辐射来进行光合作用。前一个月的辐射会通过光合作用固定有机物，为次月植被生长变化提供必要条件。综上观点，植被对于气候因子的滞后响应具有深入的物理机制，同时植被滞后效应对于准确理解植被生长变化的气象驱动力有重要的科学意义。

3.5 小结

对植被的滞后效应研究证明了本文的前提假设，即不同植被类型对同一种气候因子的响应均有特点；同一种植被类型对不同气候因子的响应也有差异。导致这一现象的原因主要是植被自身属性特征以及周围环境因素的限制。揭示植被气候的交互响应具有重要的科学价值，并且为后续研究气候因子对植被生长的贡献率奠定基础。

第4章 气候因子对植被生长贡献率的分布格局

4.1 引言

气候因子在植被的生长过程中起着重要的作用，温度、水分和辐射为植被提供了必需的生长条件。只有这些因子达到了植物生长的基本条件，植物才会逐渐进入一个生长周期。由于植被对气候因子存在一定时间的滞后效应，那么在考虑植被滞后效应的前提下，探究综合气候因子对植被生长的解释度以及影响植被生长的主要气候驱动因子就显得尤为必要。下面就根据本文的研究结果，具体分析气候因子对植被生长的贡献率。

4.2 方法

在植被对气候因子滞后响应的基础上，以 CRU 温度、降水和太阳辐射作为自变量，GIMMS3g NDVI 作为因变量，建立多元线性回归模型和偏相关模型，分别统计分析综合气候因子对植被生长的解释率以及影响植被生长的主要气候驱动因子。最后基于 MODIS IGBP 未变化植被类型图（图 2-1，表 2-1），统计不同植被类型与气候因子之间的关系。详细方法描述请见研究数据和方法中的 2.2.2 和 2.2.3。

4.3 结果

气候因子对植被生长贡献率的分布格局由长时间序列 GIMMS3g NDVI 数据和 CRU 气象数据统计得出，主要包括两部分结果。（1）综合气候因子对植被生长的解释度（图 4-1-图 4-4，表 4-1-表 4-2），是由 GIMMS3g NDVI 数据和 CRU 温度、降水和辐射数据建立的多元线性回归模型分析得出；（2）影响植被生长的主要气候驱动因子（图 4-5-图 4-8，表 4-3-表 4-5），是由 GIMMS3g NDVI 数据和 CRU 温度、降水和辐射数据建立的偏相关模型分析得出。结果统计分析了不同植被类型与气候因子之间的关系。

4.3.1 综合气候因子对植被生长的解释度

在综合气候因子对植被生长解释度的分析结果中，图 4-1 表示综合气候因子对植被生长解释度的全球格局；图 4-2-图 4-4 表示考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数及其显著性。

考虑植被滞后效应的基础上，基于多元线性回归模型统计得出在全球尺度上温度、降水和辐射对于植被生长的解释率。图 4-1A 显示了考虑植被滞后效应情况下，多元线性回

归模型决定系数的全球格局；图 4-1B 表示考虑植被滞后效应和未考虑植被滞后效应模型对于植被生长解释率的差异。结果表明，综合气候因子对于植被生长的全球平均解释率为 64.04%；而未考虑植被滞后效应的情况下，全球平均解释率为 57.57%（图 4-1）。因此，在全球尺度下，考虑植被滞后效应相对于未考虑植被滞后效应的模型提高了 6.47%（相对提高 11.24%）的解释率。考虑植被滞后效应情况下，全球大部分植被类型的生长解释率在 64% - 79%之间，模型总体表现较好。然而，对于常绿阔叶林和中低纬开放灌木，模型对于植被生长变化的解释率较低，分别为 27%和 37%。对于滞后效应表现明显的常绿阔叶林、落叶阔叶林、中低纬开放灌木、多树草原、稀树草原和农田地区，改进模型结果相对于不考虑滞后效应的模型结果有很大的提高，相对提高 21.56%、47.44%、54.34%、14.22%、46.46%和 11.85%（表 4-2）。因此，考虑植被滞后效应的情况下，可以显著提高模型的解释率，并且可以更加深入的理解植被和气候因子之间的内在联系。

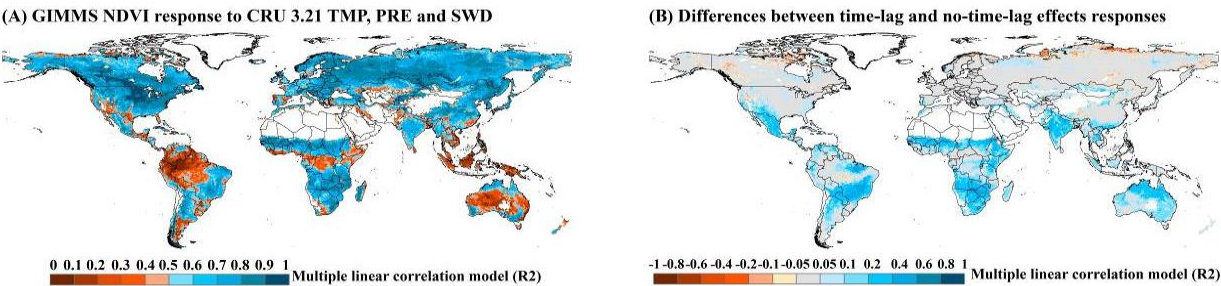


图 4-1 综合气候因子对植被生长解释度的全球格局，白色区域未做统计分析。图 A 表示考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型决定系数；图 B 表示考虑和不考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型决定系数的差异

Figure 4-1 Spatial patterns of the association observed between climatic factors and vegetation activity. (A) Spatial distribution of the determination coefficient (R^2) of the multiple linear regression model between the GIMMS3g NDVI and climatic factors for the period 1982 - 2008 with considering time-lag effects; (B) Response differences of vegetation to climatic factors between the determination coefficient (R^2) considering time-lag effects or not.

在多元线性回归模型温度系数的统计结果中（图 4-2），北半球中高纬度地区受温度的控制较强，温度增加会促进植被的生长；而对于澳大利亚西南部等干旱半干旱地区，温度增加会抑制植被的生长。不同植被类型受温度控制的差异性也较大（表 4-3），其中落叶针叶林、混交林和北半球高纬度灌木受温度的控制较大，这一现象和植被类型的自身属性特征和所处气候条件有着紧密的联系。在多元线性回归模型降水系数的统计结果中（图 4-3），干旱和半干旱地区受降水的控制较强，水分的增加会促进植被的生长。不同植被类型受降水控制的差异性也较大（表 4-4），其中中低纬度开放灌木、多树草原、稀树草原、草地和农田生态系统受降水的控制较强，这一现象和植被类型的自身属性特征和所处气候条件有

着紧密的联系。在多元线性回归模型辐射系数的统计结果中（图 4-4），北半球中高纬度地区受辐射的控制较强，辐射的增加会促进植被的生长。然而不同植被类型受辐射控制的差异性也较大（表 4-5），其中落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林和北半球高纬度灌木受辐射的影响较大，这一现象和植被类型的自身属性特征和所处气候条件有着紧密的联系。

表 4-1 基于样点的温度、降水和辐射对全球不同植被类型解释度（R²）的均值和方差

Table 4-1 Mean and standard deviation (SD) of the R² of the GIMMS3g NDVI response to the CRU3.21 temperature (TMP), precipitation (PRE) and solar radiation (SWD) among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	0.70	0.16
02	Evergreen broadleaf forest	2471	0.27	0.15
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.79	0.03
04	Deciduous broadleaf forest	94	0.75	0.08
05	Mixed forest	628	0.79	0.11
N7	Open shrublands (North)	2515	0.67	0.11
S7	Open shrublands (South)	1645	0.37	0.18
08	Woody savannas	702	0.73	0.10
09	Savannas	828	0.74	0.09
10	Grasslands	2636	0.64	0.17
12	Croplands	1353	0.71	0.16
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	0.77	0.16

注：R² 表示考虑植被滞后情况下，多元线性回归模型的决定系数

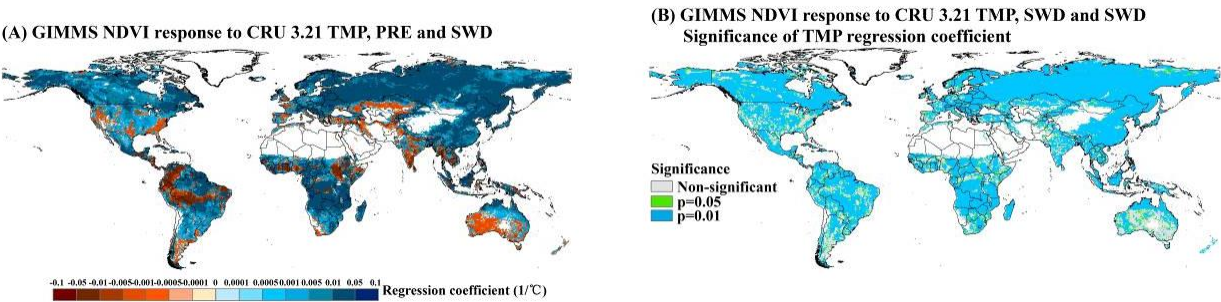


图 4-2 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示多元线性回归模型的温度系数；图 B 表示多元线性回归模型温度系数的显著性

Figure 4-2 Spatial patterns of the multiple linear regression coefficient and its significance between climatic factors and the GIMMS3g NDVI with considering time-lag effects. (A) Multiple linear regression coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 temperature (TMP); (B) Significance of the multiple linear regression coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 temperature (TMP).

表 4-2 基于样点的温度、降水和辐射对全球不同植被类型解释度 (R^2) 的差异

Table 4-2 Discrepancy and relatively change of the R^2 with and without considering the time-lag effects.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Difference	Relatively change (%)
01	Evergreen needleleaf forest	102	0.02	2.37
02	Evergreen broadleaf forest	2471	0.05	21.56
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.01	1.69
04	Deciduous broadleaf forest	94	0.24	47.44
05	Mixed forest	628	0.01	1.18
N7	Open shrublands (North)	2515	-0.01	-1.71
S7	Open shrublands (South)	1645	0.13	54.34
08	Woody savannas	702	0.09	14.22
09	Savannas	828	0.24	46.46
10	Grasslands	2636	0.04	5.77
12	Croplands	1353	0.08	11.85
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	0.12	18.58

注: R^2 表示考虑植被滞后情况下, 多元线性回归模型的决定系数; Difference 表示考虑植被滞后效应 R^2 与不考虑植被滞后效应 R^2 的差值; Relatively change (%) 表示考虑植被滞后效应的情况下, R^2 相对提高的百分比。

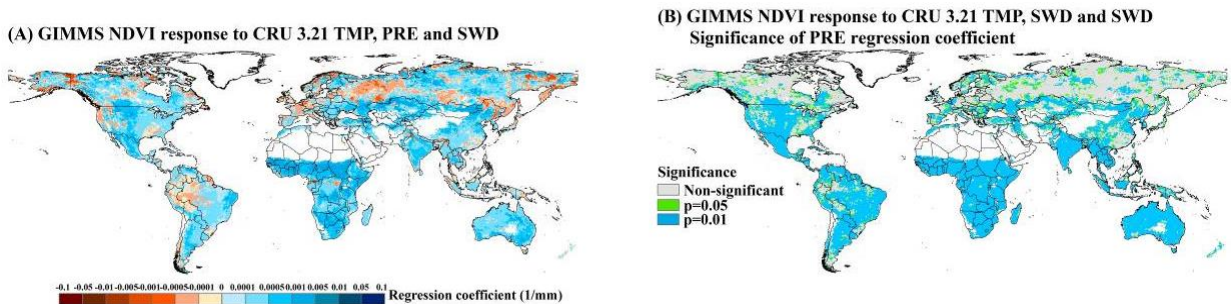


图 4-3 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数, 白色区域未做统计分析。图 A 表示多元线性回归模型的降水系数; 图 B 表示多元线性回归模型降水系数的显著性

Figure 4-3 Spatial patterns of the multiple linear regression coefficient and its significance between the GIMMS3g NDVI and the climatic factors with considering time-lag effects. (A) Multiple linear regression coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 precipitation (PRE); (B) Significance of the multiple linear regression coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 precipitation (PRE).

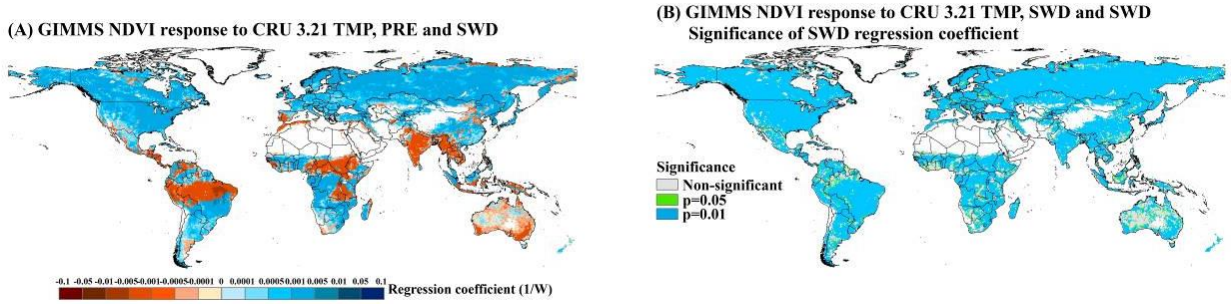


图 4-4 考虑植被滞后效应情况下多元线性回归模型气候因子的回归系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示多元线性回归模型的辐射系数；图 B 表示多元线性回归模型辐射系数的显著性

Figure 4-4 Spatial patterns of the multiple linear regression coefficient and its significance between climatic factors and the GIMMS3g NDVI with considering time-lag effects. (A) Multiple linear regression coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 solar radiation (SWD); (B) Significance of the multiple linear regression coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 solar radiation (SWD).

4.3.2 影响植被生长的主要气候驱动因子

在考虑植被滞后效应的前提下，基于偏相关模型统计得出在全球尺度上植被生长对温度、降水和辐射的偏相关系数。这种统计方法将三种气候指标对于植被生长的贡献隔离开，并且去除了 3 种气候要素之间对于植被生长共同影响的部分。图 4-5-图 4-7 分别表示温度、降水和太阳辐射对于 GIMMS3g NDVI 的偏相关系数以及偏相关系数的显著性。对偏相关系数取绝对值 (0-1)，并线性拉伸至 0-255，对拉伸后的温度、降水和太阳辐射系数做 RGB 合成，以表示植被生长的主要驱动因子 (图 4-8)。

在偏相关模型气候因子系数的全球格局中 (图 4-5-图 4-7)，温度和辐射系数在全球尺度上基本通过 $p=0.05$ 的显著性检验；降水系数仅在北半球高纬度地区未通过显著性检验，也从侧面说明降水并不是北半球高纬度地区植被生长的主要气候驱动因子。

图 4-8 反映了影响全球植被生长的主要驱动因子。其中北半球高纬度地区，植被生长主要受温度和辐射影响；美国东部地区植被生长主要受辐射影响；在低纬度干旱半干旱地区，植被生长主要受降水影响，其中中国东部主要受温度主导；在热带雨林地区，影响植被生长的因子并没有明显的规律性。气候因子对于植被生长不仅表现为促进作用，而且在一定的区域会抑制植被生长。在亚马逊热带雨林地区，降水就会抑制植被的生长，原因是降水的增加会降低太阳辐射和温度，影响植被的光合作用；在干旱半干旱的澳大利亚西部地区，温度和辐射均会抑制区域植被的生长。

统计结果表明，不同植被类型的气候主导因子均有显著差别 (表 4-3-表 4-5)。其中常绿针叶林、落叶针叶林和混交林均受辐射和温度主导，辐射和温度平均偏相关系数分别为

0.29 (0.21SD) 和 0.20 (0.15SD)、0.28 (0.08SD) 和 0.47 (0.11SD)、0.29 (0.15SD) 和 0.41 (0.13SD)。常绿阔叶林的气候主导因子在模型结果中表现不明确。落叶阔叶林主要受降水和辐射主导，平均偏相关系数为 0.21 (0.10SD) 和 0.40 (0.09SD)。北半球高纬度灌丛的气候主导因子为辐射和温度 0.30 (0.24SD) 和 0.43 (0.20SD)，中低纬度灌丛的气候主导因子为降水，平均偏相关系数为 0.36 (0.15SD)。多树草原的主要驱动因子为降水和温度，0.49 (0.23SD) 和 0.39 (0.21SD)；稀树草原的主要驱动因子为降雨，平均偏相关系数分别为 0.47(0.21SD)；草地受太阳辐射和降水共同驱动，平均偏相关系数分别为 0.31(0.27SD)、0.30 (0.18SD)。农田生态系统受 3 种因子共同驱动，降水、辐射和温度的平均偏相关系数分别为 0.26 (0.21SD)、0.16 (0.39SD)、0.17 (0.26SD)。

表 4-3 基于样点的全球不同植被类型偏相关模型和多元线性回归模型温度系数均值和方差

Table 4-3 Mean and standard deviation (SD) of the temperature coefficient of the partial correlation model and the multiple linear regression model between the GIMMS3g NDVI and climatic factors among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Partial correlation coefficient		Regression coefficient (1/10000)	
			Mean	SD	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	0.20	0.15	57.05	42.08
02	Evergreen broadleaf forest	2471	0.08	0.18	83.98	173.05
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.47	0.11	147.66	30.62
04	Deciduous broadleaf forest	94	0.12	0.10	42.51	37.79
05	Mixed forest	628	0.41	0.13	143.16	48.4
N7	Open shrublands (North)	2515	0.43	0.20	137.41	73.85
S7	Open shrublands (South)	1645	-0.02	0.15	-2.03	29.54
08	Woody savannas	702	0.39	0.21	222.25	129.09
09	Savannas	828	0.19	0.24	75.33	141.36
10	Grasslands	2636	0.15	0.32	52.32	81.14
12	Croplands	1353	0.17	0.26	59.3	90.94
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	0.13	0.24	40.45	103.53

注：Regression coefficient 表示多元线性回归模型的回归系数，显示数值在原始数值基础上乘以 10000。

表 4-4 基于样点的全球不同植被类型偏相关模型和多元线性回归模型降水系数均值和方差

Table 4-4 Mean and standard deviation (SD) of the precipitation coefficient of the partial correlation model and the multiple linear regression model between the GIMMS3g NDVI and climatic factors among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Partial correlation coefficient		Regression coefficient (1/10000)	
			Mean	SD	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	-0.05	0.21	-0.25	3.23
02	Evergreen broadleaf forest	2471	0.02	0.25	0.3	2.06
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.10	0.07	2.37	1.8
04	Deciduous broadleaf forest	94	0.21	0.10	3.53	2.14
05	Mixed forest	628	-0.02	0.13	-0.51	2.57
N7	Open shrublands (North)	2515	0.07	0.15	2.49	7.39
S7	Open shrublands (South)	1645	0.36	0.15	5.01	2.96
08	Woody savannas	702	0.49	0.23	5.88	3.83
09	Savannas	828	0.47	0.21	5.72	4.33
10	Grasslands	2636	0.30	0.18	6.65	4.87
12	Croplands	1353	0.26	0.21	4.8	4.25
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	0.39	0.31	5.01	4.07

表 4-5 基于样点的全球不同植被类型偏相关模型和多元线性回归模型辐射系数均值和方差

Table 4-5 Mean and standard deviation (SD) of the solar radiation coefficient of the partial correlation model and the multiple linear regression model between the GIMMS3g NDVI and climatic factors among the different vegetation types.

No.	IGBP Land Cover Type	Samples	Partial correlation coefficient		Regression coefficient (1/10000)	
			Mean	SD	Mean	SD
01	Evergreen needleleaf forest	102	0.29	0.21	8.07	6.31
02	Evergreen broadleaf forest	2471	-0.03	0.25	-1.69	16.58
03	Deciduous needleleaf forest	181	0.28	0.08	13.67	5.02
04	Deciduous broadleaf forest	94	0.40	0.09	16.37	7.28
05	Mixed forest	628	0.29	0.15	12.11	6.27
N7	Open shrublands (North)	2515	0.30	0.24	10.01	8.14
S7	Open shrublands (South)	1645	-0.02	0.17	-0.21	3.12
08	Woody savannas	702	0.02	0.29	1.36	18.19
09	Savannas	828	0.02	0.41	-2.27	32.39
10	Grasslands	2636	0.31	0.27	7.57	8.9
12	Croplands	1353	0.16	0.39	5.32	16.56
14	Cropland/natural vegetation mosaic	53	0.20	0.33	9.01	15.82

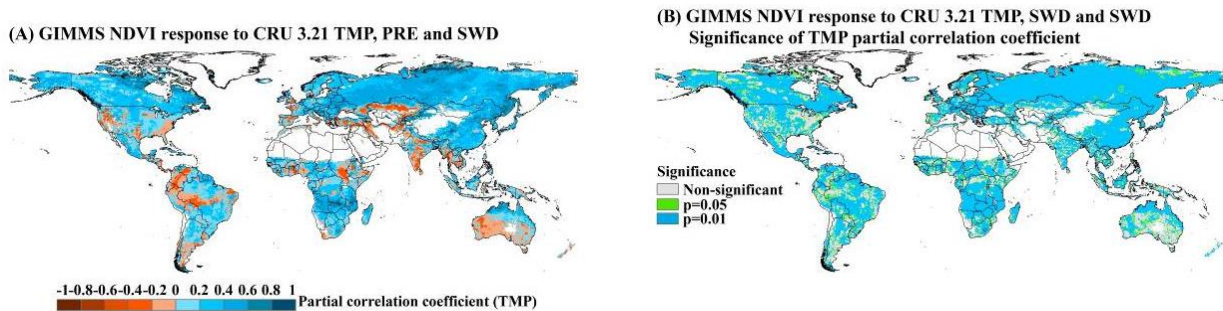


图 4-5 考虑植被滞后效应情况下偏相关模型系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示偏相关模型的温度系数；图 B 表示偏相关模型温度系数的显著性

Figure 4-5 Spatial patterns of the partial correlation coefficient and its significance between the GIMMS3g NDVI and the climatic factors with considering time-lag effects. (A) Spatial distribution of the partial correlation coefficient between NDVI and temperature (TMP) after controlling for precipitation (PRE) and solar radiation (SWD); (B) Significance of the partial correlation coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 temperature (TMP).

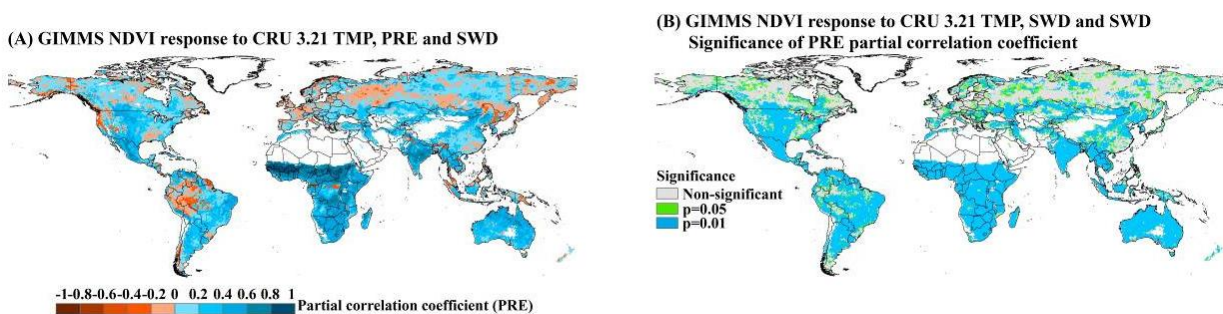


图 4-6 考虑植被滞后效应情况下偏相关模型系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示偏相关模型的降水系数；图 B 表示偏相关模型降水系数的显著性

Figure 4-6 Spatial patterns of the partial correlation coefficient and its significance between the GIMMS3g NDVI and the climatic factors with considering time-lag effects. (A) Spatial distribution of the partial correlation coefficient between NDVI and precipitation (PRE) after controlling for temperature (TMP) and solar radiation (SWD); (B) Significance of the partial correlation coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 precipitation (PRE).

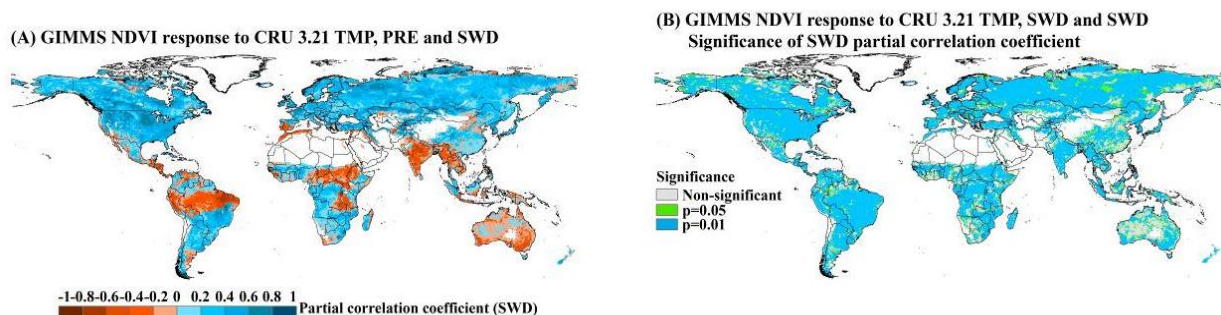


图 4-7 考虑植被滞后效应情况下偏相关模型系数，白色区域未做统计分析。图 A 表示偏相关模型的辐射系数；图 B 表示偏相关模型辐射系数的显著性

Figure 4-7 Spatial patterns of the partial correlation coefficient and its significance between the GIMMS3g NDVI and the climatic factors with considering time-lag effects. (A) Spatial distribution of the partial correlation coefficient between NDVI and solar radiation (SWD) after controlling for temperature (TMP) and precipitation (PRE); (B) Significance of the partial correlation coefficient of the GIMMS3g NDVI response to the CRU 3.21 solar radiation (SWD).

GIMMS NDVI response to CRU 3.21 TMP, PRE and SWD

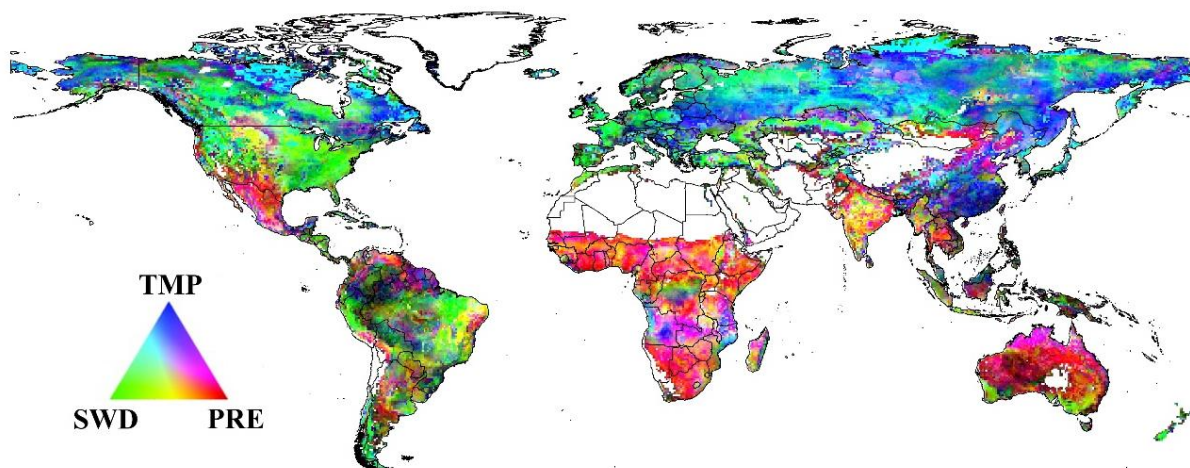


图 4-8 影响植被生长的主要气候驱动因子的全球格局，白色区域未做统计分析

Figure 4-8 Spatial distribution of the main climate-driven factors to the vegetation growth derived from long-term statistics based on the partial correlation model.

4.4 讨论

4.4.1 综合气候因子对植被生长的解释度

之前对于探究植被和综合气候因子（温度、降水、太阳辐射和潜在蒸散）关系的研究表明，全球尺度下气候因子能够解释植被变化的 54.0% (Jong *et al.*, 2013)。这一结果与本文中未考虑植被滞后效应的结果相一致（57.6%），然而当考虑植被滞后效应的情况下，本研究结果显示综合气候因子对全球植被的解释度提高 6.47%（相对提高 11.24%）。在不同植被类型的统计分析中，干旱半干旱区的中低纬度开放灌木解释度提高最多，相对提高 54.34%。因此考虑植被对于气候因子的滞后效应在一定程度上提高了植被生长变化的解释率，同时也更准确的刻画出了影响不同类型植被生长变化的具体气候条件。结果对于根据气候模式结果预测未来全球植被空间分布格局有重要的指示意义。

4.3.2 影响植被生长的主要气候驱动因子

植被生长的主要驱动因子与树木的特性以及周围的气候环境密切相关 (Jones *et al.*, 2012)。其中常绿针叶林和落叶针叶林主要分布在北半球中高纬度地区（图 2-1），由于温度辐射季节性变化较大，并且该类型树木对水分的需求较弱，所以温度和辐射是影响其生长的决定性因子。落叶阔叶林主要分布在中纬度地区，由于自身对于光合作用的需求较强，水分蒸腾也较针叶林更强，所以该种林地主要受辐射和降水主导。常绿阔叶林主要分布于热带雨林地区，区域气候条件相对适宜，植被生长受 3 种因子的限制在模型中表现并不明显。对于干旱半干旱地区的开放灌木，区域温度辐射都相对充足，水分相对较少，因此植被生长主要受降水的影响。草原生态系统主要分布于中纬度内陆地区，降水相对偏少，由于草地在辐射和降水都充足的条件下，生长力就会更旺盛，因此这两个因子共同决定草地生态系统的生长变化。本文的研究结果较为准确的刻画出全球植被生长变化气候驱动因子的空间格局，对于后面理解和揭示植被生长变化的原因有重要的参考价值。

4.5 小结

综合气候因子对植被生长的解释度表明，考虑植被的滞后效应会在一定程度上提高气候因子对植被生长的解释度。这一结论同样证实了本文的研究价值，即植被的滞后效应对于研究气候植被交互响应的重要意义。我们的研究同样发现，不同植被类型的主要气候驱动因子有着显著的差别，导致这一现象的原因主要是植被自身属性特征和周围环境条件的差异性。深入揭示植被气候的交互响应具有重要的研究价值，并且为后续研究 1982-2008 全球植被显著性变化的归因探究奠定基础。

第5章 1982-2008 全球植被显著性变化归因探究

5.1 引言

近 30 年来由于气候条件的改变、自然扰动的增加以及人类活动的干扰,全球植被在很多区域均发生了显著的变化。之前对于 1982-2011 全球植被覆盖度变化的研究表明 (Wu *et al.*, 2014), 过去 30 年全球植被呈变绿的趋势, 即植被的长势大部分在增加。那么, 这些区域植被变化的原因是什么, 背后的主要驱动因子又是什么? 下面就基于前两章的研究结果, 植被气候的交互响应特征, 进一步分析 1982-2008 近 27 年全球植被 NDVI 显著性变化的背景驱动因子。

5.2 方法

在植被对气候因子滞后响应的基础上, 分析 GIMMS3g NDVI 和 3 种气候因子 1982-2008 的变化趋势。本文选用最小二乘法对生长季平均的年尺度时间序列数据进行趋势拟合, 并统一在 $p = 0.05$ 上进行显著性检验。最后通过对比分析, 讨论植被显著性变化区的主要气候驱动因子, 并结合人类活动和自然扰动等因素分析近 27 年来全球典型区域植被显著性变化的原因。详细方法描述请见研究数据和方法中的 2.2.4。

5.3 结果

为了表征全球植被 1982-2008 年的变化, 并且分析植被变化背后的气候驱动因子。研究首先采用最小二乘回归模型分析了全球 1982-2008 年植被的变化趋势以及对应时间气候因子的变化趋势, 并对趋势分析结果做了显著性检验。其中图 5-1 表示全球植被在过去 27 年中显著性变化 ($p < 0.05$) 的空间分布以及全球植被显著性变化区域对应显著性变化气候因子 ($p < 0.05$) 的空间格局。其中图 5-1B 显示了全球 GIMMS3g NDVI 显著性变化的区域对应温度、降水或辐射是否有显著性变化。例如 GIMMS3g NDVI 显著性变化的区域可能只对应一种显著性变化气候因子, 也有可能对应两种或者三种气候因子的显著性变化。图 5-2-图 5-4 分别表示考虑植被滞后效应情况下温度、降水和辐射变化的全球格局。

对于近 27 年来全球植被的变化趋势 (图 5-1A), 显著性变化 ($p < 0.05$) 的区域占全部统计区域的 32.65%, 其中显著性上升区域占 28.85%, 显著性下降区域占 3.80%。在区域尺度上, 北半球高纬度地区植被呈变绿趋势, 中国东部地区、印度、非洲中部以及南美洲北部地区同样呈变绿趋势; 而加拿大东北部、南美洲中部、非洲中南部以及澳大利亚东部

等少部分区域植被绿色度呈下降趋势。

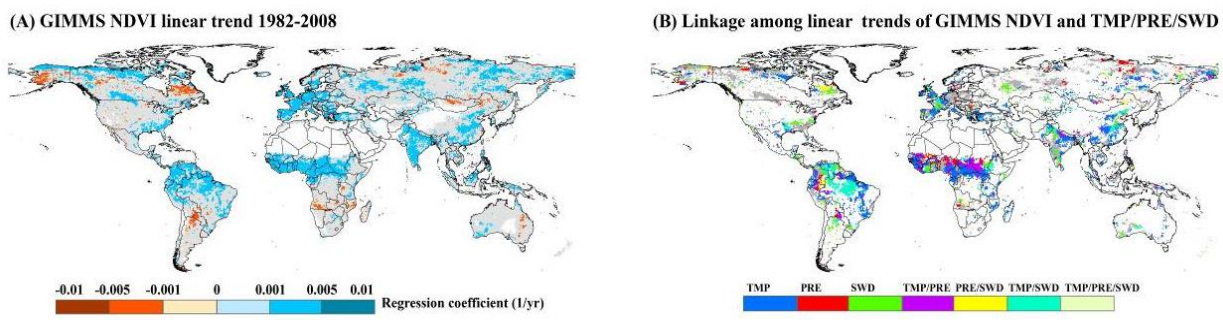


图 5-1 1982-2008 全球植被显著性变化 ($p < 0.05$) 的空间分布。图 A 表示 GIMMS3g NDVI 1982-2008 显著性变化的空间分布，白色区域未做统计分析，灰色区域表示不显著；图 B 表示全球植被显著性变化区域对应显著性变化的气候因子 ($p < 0.05$)，灰色表示该区域没有显著变化的气候因子

Figure 5-1 Spatial patterns of the global vegetation trend from 1982 to 2008. (A) The GIMMS3g NDVI linear trend for the $p = 0.05$ significance level (1982-2008); (B) Comparison between climatic factors and vegetation in the areas with significant variation ($p < 0.05$).

对于近 27 年来全球温度的变化趋势（图 5-2），显著性增温区分布在亚洲东部、非洲中部、南美洲中东部、北美洲西南部和欧洲部分地区；显著性降温区域分布较少。对于近 27 年来全球降水的变化趋势（图 5-3），显著性降水增加区主要分布在非洲中部地区；显著性降水减少区主要分布在蒙古境内。对于近 27 年来全球辐射的变化趋势（图 5-4），辐射显著增加区域主要分布于南美洲北部、南美洲南部地区和澳大利亚中部地区；显著性辐射减少区主要分布在中国东北地区、欧洲中部地区以及北美洲中部地区。

将 GIMMS3g NDVI 显著性变化区域与 3 种气候因子的显著性变化做对比分析（图 5-1B），结果显示 NDVI 显著性变化区域对应温度显著性变化的像元占总体 NDVI 显著性变化像元的 45.09%。降水显著性变化对应 NDVI 显著性变化的像元占总体 NDVI 显著性变化像元的 15.72%，辐射的显著性对应像元比例为 20.72%。全球 3 种气候因子显著性变化对应 NDVI 显著性变化的像元占总体的 60.66%。在所有至少有一种气候因子显著性变化对应 NDVI 显著性变化的区域中，温度的对应比率最高，占 74.33%；降水和辐射较低，分别为 25.92% 和 34.16%。综合可以从侧面说明温度对于植被变化的解释率较高，温度变化也是近 27 年来植被变化决定性的气候因子。

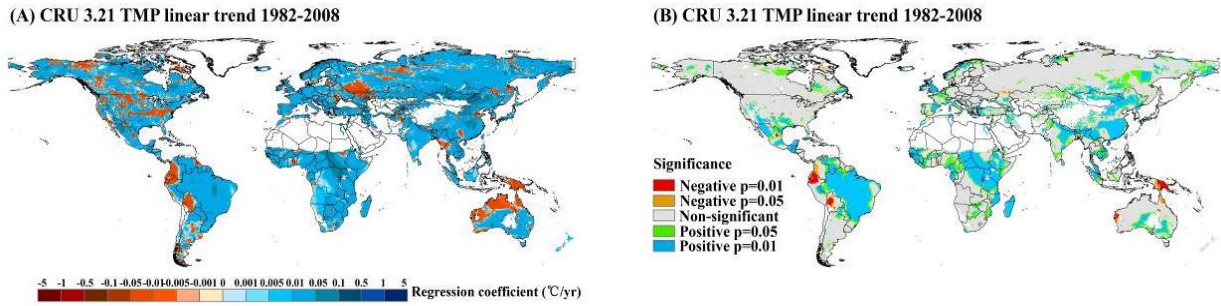


图 5-2 考虑植被滞后效应情况下温度变化的全球格局。图 A 表示 1982-2008 温度线性趋势的空间分布，白色区域未做统计分析；图 B 表示全球温度显著性变化的空间格局

Figure 5-2 Linear trends of the climatic factors during the period 1982-2008 considering time-lag effects. (A) Regression coefficient of the CRU 3.21 temperature (TMP) linear trend from 1982 to 2008; (B) Significance of the CRU 3.21 temperature (TMP) linear trend from 1982 to 2008.

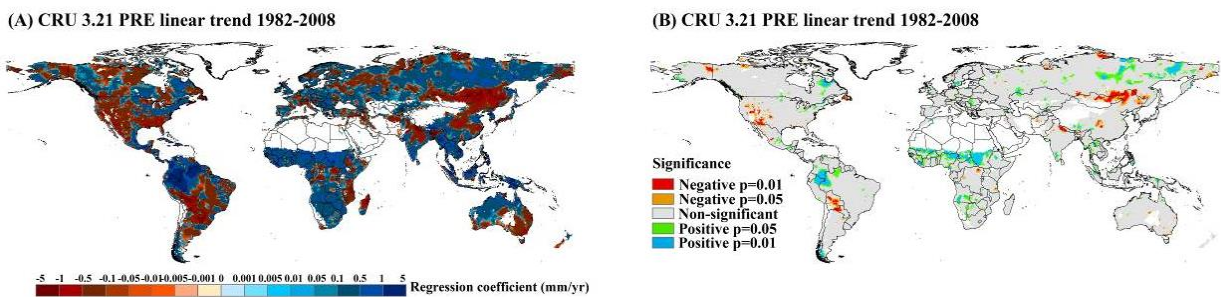


图 5-3 考虑植被滞后效应情况下降水变化的全球格局。图 A 表示 1982-2008 降水线性趋势的空间分布，白色区域未做统计分析；图 B 表示全球降水显著性变化的空间格局

Figure 5-3 Linear trends of the climatic factors during the period 1982-2008 considering time-lag effects. (A) Regression coefficient of the CRU 3.21 precipitation (PRE) linear trend from 1982 to 2008; (B) Significance of the CRU 3.21 precipitation (PRE) linear trend from 1982 to 2008.

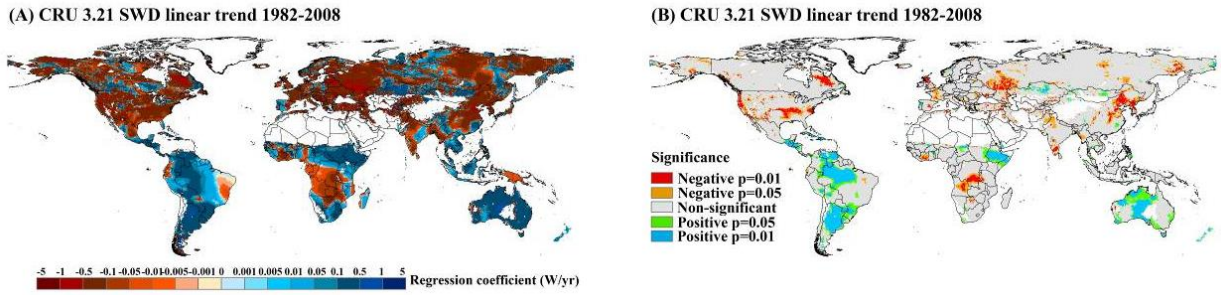


图 5-4 考虑植被滞后效应情况下辐射变化的全球格局。图 A 表示 1982-2008 辐射线性趋势的空间分布，白色区域未做统计分析；图 B 表示全球辐射显著性变化的空间格局

Figure 5-4 Linear trends of the climatic factors during the period 1982-2008 considering time-lag effects. (A) Regression coefficient of the CRU 3.21 solar radiation (SWD) linear trend from 1982 to 2008; (B) Significance of the CRU 3.21 solar radiation (SWD) linear trend from 1982 to 2008.

5.4 讨论

影响植被生长变化的因子主要分为两大类，首先是气候因子驱动 (Nemani *et al.*, 2003; Pearson *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2013; Peteet, 2000)，不同的气候因子为植被提供必需的生长条件；其次影响植被生长变化的因素是人类活动和自然扰动，例如农业灌溉、土地利用变化、森林管理、病虫害、火灾以及干旱等 (Bala *et al.*, 2007; Brando *et al.*, 2014; Choat *et al.*, 2012; Malhi *et al.*, 2008; Sterling *et al.*, 2013; Zhang & Liang, 2014)，这些外力作用较大的区域扰动会对植被的生长变化产生重要的影响。由于我们本文的研究主要侧重于植被生长在正常状况下对不同气候因子的响应，所以并未量化分析人类活动和自然扰动对植被生长的影响，在文章中仅作定性的讨论。

全球植被在 1982-2008 发生了较为显著的变化，其中生长季平均 NDVI 显著上升 ($p < 0.05$) 区域占总体统计区域的 28.85%，显著下降 ($p < 0.05$) 区域占总体统计区域的 3.80%。我们的研究表明北半球高纬度地区植被绿度在过去 27 年中呈逐步上升趋势 (图 5-1)，并且该区域植被生长主要受温度和辐射的影响 (图 4-8)。因此北半球高纬度温度增加是区域植被绿度升高的重要原因 (图 5-2)。同样，在 Jeong *et al.* 的研究结果中表明增温会导致北半球高纬度植被生长季提前，植被生长周期延长，生长季植被绿度增加 (Jeong *et al.*, 2011)。

在非洲中部地区，植被生长的主要气候驱动因子为降水和温度 (图 4-8)，并且 Willis *et al.* 的研究表明，温度和湿度的增加导致了该地区植被绿度升高 (Willis *et al.*, 2013)。我们的研究结果同样表明在 1982-2008 年间温度升高和降水增加导致了区域 NDVI 显著上升 (图 5-2 和图 5-3)，印证了气候条件变化对该区域植被绿度增加起到了重要的作用。

在中国中东部地区, NDVI 在过去 27 年中呈显著上升趋势, 并且结果 (图 4-8) 显示该区域的主要气象主导因子为温度, 统计结果表明过去 27 年中该区域温度显著上升 (图 5-2), 因此区域 NDVI 升高主要是由温度的增加引起。这一现象与 Peng *et al.* 和 Piao *et al.* 的研究结果相一致, 即温度上升会导致中国北方生长季延长, 植被生长力增强, 生长季植被绿度升高 (Peng *et al.*, 2011; Piao *et al.*, 2006)。

Nemani *et al.* 在研究中指出亚马逊热带雨林 NPP 增加的主要原因是云量的减少和太阳辐射的增加 (Nemani *et al.*, 2003)。我们的研究结果同样表明该区域 1982-2008 温度和太阳辐射均显著增加 (图 5-2 和图 5-4), 因此这一气候条件变化可能是区域植被 NDVI 增加的主要原因之一。由于本研究主要分析植被对于气候因子的响应, 并未量化人类活动和自然扰动对区域植被生长造成的影响。因此在亚马逊地区, 虽然结果可以揭示出 NDVI 变化和气候因子之间的关系, 但是植被气候模型的解释率仍然比其他受人类活动或自然扰动小的地区相对要低。

在本研究中, 我们发现人类活动和自然扰动对于植被变化同样扮演着重要的角色。本文的研究发现, 印度大陆植被主要受水分条件限制 (图 4-8), 那么改善区域的水分条件植被绿度就会增加。Nayak *et al.* 的研究指出 1981-2006 引起该区域 NPP 升高的主导因子是农业生产力的提高 (Nayak *et al.*, 2013), 我们的研究同样表明 1982-2008 印度植被绿度呈显著上升趋势 (图 5-1)。因此, 由于该区域提高了农业灌溉水平, 改善了区域水分条件, 所以该区域植被绿度呈显著增加。

在美国东南部地区, 植被绿度在过去 27 年显著升高 (图 5-1), 然而对应区域的气候因子并未发生显著变化 (图 5-2-图 5-4)。造成这一现象的原因主要是是近年来积极的森林管理 (包括较低龄树木的生长以及植树造林的增加) (Hicke *et al.*, 2002)。在加拿大东部地区, 植被绿度下降的一部分原因是降水增加和辐射降低的共同作用 (图 5-1-图 5-4), 另一方面原因可能是该地区受到病虫害影响导致植被绿度降低 (Hicke *et al.*, 2002)。

本文中主要选用 NDVI 植被指数来代表植被的生长状态, 并结合气候因子数据统计分析植被对气候因子的滞后效应。NDVI 主要反映植被的绿度特征, 与植被的季节性变化以及植被的光合作用关系密切 (Nemani *et al.*, 2003; Pearson *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2013; Peteet, 2000), 并且对气候因子有相对快速的响应过程 (Anderson *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2014; Rundquist & Harrington Jr, 2000)。除了表征植被生长变化的植被指数数据集, 树木年轮数据也可以反映的植被生长变化, 常常被用来做年际间的植被气候交互效应 (Orwig & Abrams, 1997)。与植被指数区别的是, 树木年轮多反映的是植被的碳收支能力 (光合作用和呼吸作用), 其大小不仅仅依赖于所处的气候条件变化还包括相应的扰动因素 (Abrams & Nowacki, 2015a; Abrams & Nowacki, 2015b; Nowacki & Abrams, 2015), 通常对气候表现出较长的滞后期。研究表明, 树木年轮对于干旱的响应通常有 2 - 3 年 (Orwig & Abrams, 1997)。Huang *et al.* 的研究同样表明树木年轮与干旱指数 (SPEI) 有很强的相关性, 并且表现出 11 个月的滞

后期 (Huang *et al.*, 2015)。因此，基于树木年轮对气候因子的响应研究中，植被滞后时间较长，作用过程可能比植被指数更加复杂。然而，基于不同指标，不同过程的植被气候交互效应研究均有其响应的研究价值，我们应该关注不同的植被气候的作用过程，揭示过程的内在规律，并建立不同过程模型的联系。

5.5 小结

在本章的讨论中，我们将之前建立的植被与气候的相关关系以及影响植被生长的主要气候驱动因子应用于近 27 年来植被显著性变化的原因分析。结果表明，植被的生长变化主要受其主导因子的影响，主要气候驱动的变化会在一定程度上影响植被的生长；然而并非所有的植被绿度变化均受到气候因子的主导，往往人类活动和自然扰动同样会改变植被的生长状态。因此，我们在以后分析植被变化的原因方面，不仅仅要关注植被的气候驱动因子，还要考虑区域是否存在相关的扰动因素。同时，我们不仅仅要关注植被绿度对气候因子的月尺度滞后响应，还要考虑其他表征植被生长的因子（例如树木年轮）对气候要素的较长时间尺度的滞后响应。不同的植被对气候响应的过程模型都应该进行深入研究，分析并建立他们之间的联系，应用于全球环境变化的研究中。

第6章 结论和展望

6.1 主要结论

本文基于 GIMMS3g NDVI 数据以及 CRU 温度、降水和辐射数据综合分析了植被对于气候因子的空间响应特征。本研究重点分析了植被对于不同气候因子的滞后响应，并基于植被的滞后效应建立多元线性回归模型和偏相关模型，分析统计综合气候因子对于不同植被类型生长变化的解释度以及不同植被类型的主要驱动因子。最后通过对比分析揭示了 1982-2008 年间植被 NDVI 显著性变化区域的主要气候驱动因子。结果表明：

(1) 植被对不同的气候因子均存在一定时间的滞后响应，并且滞后响应时间在全球格局上分布各异。就植被种类分析而言，同种植被对于不同气候因子的滞后效应表现存在差异；不同植被类型对于同一气候因子的响应也各有特点。分析表明，导致这一现象的原因主要是植被自身属性特征以及周围环境因素的限制；

(2) 考虑植被的滞后效应可以较准确的揭示气候因子对植被生长的影响。对于植被生长的气候解释度，综合气候因子（温度、降水和辐射）对于植被生长的全球平均解释率为 64.04%，相较于未考虑植被滞后效应的模型全球平均提高 6.74%（相对提高 11.24%）。其中干旱半干旱区的中低纬度开放灌木提高最多，平均相对提高 54.34%。因此，考虑植被对于气候因子的滞后效应在较大程度上提高了植被生长变化的解释率，同时也更准确的刻画出了影响不同类型植被生长变化的具体气候条件；

(3) 植被生长的主要驱动因子与植被的特性以及周围的环境密切相关。研究表明，全球植被的气候驱动因子在空间上均表现出显著的差异，在北半球高纬度地区主要受到温度的影响，在干旱半干旱地区主要受到降水的影响，在美国东部等地区主要受到辐射的影响。全球植被气候驱动因子的空间格局对于分析影响植被生长变化的气候要素有重要的科学意义。

(4) 1982-2008 全球 GIMMS3g NDVI 显著性变化对应温度显著性变化 ($p < 0.05$) 的像元占总体 NDVI 显著性变化像元的 45.09%，降水辐射分别为 15.72% 和 20.72%。结果从侧面说明了温度是影响全球植被显著性变化的主要气候驱动因子。

(5) 区域尺度的分析结果表明，影响植被变化的因子除了气候条件的改变，还包括人类活动和自然扰动的影响。由于本研究重点关注植被对气候因子的滞后响应，所以并未定量分析非气候要素对植被变化的影响。在后续的研究中我们应该定量化分析气候和扰动对区域植被的影响，更加清楚的认识植被生长变化的背景驱动因子。

综合来看，该研究采用定量化的研究方法，从不同的角度分析了植被对气候因子的响

应过程及响应特点。结果对于揭示全球植被对于气候响应的空间特征及时间滞后提供了理论依据，并对于未来气候背景下植被变化的预测有重要的参考价值。

6.2 主要创新点

陆地生态系统对气候变化的响应研究是目前围绕全球变化的科学前沿问题。之前大多数基于全球尺度的研究多集中于分析当前对应时间的植被和气候因子的交互效应，并未考虑植被对气候的滞后响应。少数对于植被滞后效应的分析也大多集中于小区域的研究，并未基于全球尺度展开分析。本文首次在全球尺度上系统性分析植被对于不同气候因子的滞后效应，并且基于植被的滞后效应建立植被与气候因子的内在联系。结果证实了植被对不同气候因子滞后响应的差异性，并且考虑植被的滞后效应在一定程度上提高了气候对植被生长的解释率。

6.3 存在的不足和对未来的展望

本研究借助 GIMMS3g NDVI 时间序列遥感植被指数产品和 CRU 温度、降水和辐射时间序列产品，在月尺度上分析并讨论了植被对气候变化滞后响应的全球格局。文章从多个角度揭示了植被的滞后效应特征，并且强调了植被滞后效应对于研究气候植被交互作用的重要性。然而，由于研究所突出的重点，研究数据，研究方法等的限制，本文还存在一定不足之处，需要在未来的研究中进一步深入拓展。

(1) 本研究主要选用遥感植被指数时间序列数据来表示植被的生长状态，更多强调植被冠层的绿度，和植被的光合作用有很大关系。滞后响应的时间较短，往往在 3 个月以内。然而，对于森林生态系统，我们并未分析另外一个表征植被生长活性的指标，即树木的径向生长（树木年轮学）。树木的径向生长主要体现在树木年轮宽度的变化，强调树木的碳收支水平，和植被的光合作用和呼吸作用都有很大关系。基于树木年轮学研究树种对气候的响应，滞后的时间尺度一般以年为单位。这种长时间的滞后响应包含有更复杂的植被生理特性及与外界作用的过程，对于揭示树木与气候之间的关系有十分重要的意义。

(2) 在 1982-2008 全球植被显著性变化的归因分析中，结果表明，影响植被生长变化的要素除了气候驱动因子外，还包括人类活动和自然扰动的外力作用。由于本文的研究重点是气候要素对植被的影响，所以并未定量化非气候要素的影响，只在讨论中做了定性的讨论。然而，如何科学的评价气候要素、自然扰动和人类活动对植被的变化的影响，将会是我们后续研究的重点。深入探究影响植被变化的驱动要素，并将其纳入到一个评价体系中，对于在全球气候变化加剧、极端事件频发以及人类活动增加的背景下评估、分析和预测植被的生长状况有着十分重要的意义。

(3) 本文的研究重点强调在全球格局下植被对气候要素的响应分析,介绍了植被气候交互效应的格局分布。而在区域尺度上,并未进行深入的定量化分析和讨论。由于人类活动大多在一定规模的区域环境中,区域植被环境的变化均在一定程度上受到人的影响。所以基于区域尺度的研究应该更加侧重于人类活动影响、自然扰动分布和气候条件改变的综合分析。在后续的研究中,我们应该在全球选取几个植被变化显著的典型区域,定量化综合分析影响植被生长的驱动因子,并比较区域化尺度下结果的差异性。

参考文献

- Abrams MD, Nowacki GJ (2015a) Exploring the Early Anthropocene Burning Hypothesis and Climate-Fire Anomalies for the Eastern U.S. *Journal of Sustainable Forestry*, **34**, 30-48.
- Abrams MD, Nowacki GJ (2015b) Large-scale catastrophic disturbance regimes can mask climate change impacts on vegetation-a reply to Pederson et al. (2014). *Global Change Biology*, 10.1111/gcb.12828.
- Anderson LO, Malhi Y, Arag ̃o LEOC, Ladle R, Arai E, Barbier N, Phillips O (2010) Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. *New Phytologist*, **187**, 733-750.
- Arnone Iii JA, Verburg PSJ, Johnson DW *et al.* (2008) Prolonged suppression of ecosystem carbon dioxide uptake after an anomalously warm year. *nature*, **455**, 383-386.
- Bala G, Caldeira K, Wickett M, Phillips TJ, Lobell DB, Delire C, Mirin A (2007) Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 6550-6555.
- Beer C, Reichstein M, Tomelleri E *et al.* (2010) Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, **329**, 834-838.
- Bonan GB (2008) Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, **320**, 1444-1449.
- Bontemps S, Herold M, Kooistra L *et al.* (2011) Revisiting land cover observations to address the needs of the climate modelling community. *Biogeosciences Discussions*, **8**, 7713-7740.
- Brando PM, Balch JK, Nepstad DC *et al.* (2014) Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**, 6347-6352.
- Brando PM, Goetz SJ, Baccini A, Nepstad DC, Beck PS, Christman MC (2010) Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, 14685-14690.
- Braswell B, Schimel D, Linder E, Moore B (1997) The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science*, **278**, 870-873.
- Brown ME, Pinzon JE, Didan K, Morisette JT, Tucker CJ (2006) Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE*

Transactions on, **44**, 1787-1793.

- Chen T, De Jeu RaM, Liu YY, Van Der Werf GR, Dolman AJ (2014) Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, **140**, 330-338.
- Choat B, Jansen S, Brodribb TJ *et al.* (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *nature*, **491**, 752-755.
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N *et al.* (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *nature*, **437**, 529-533.
- Cong N, Wang T, Nan H, Ma Y, Wang X, Myneni RB, Piao S (2013) Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multimethod analysis. *Global Change Biology*, **19**, 881-891.
- Craine JM, Nippert JB, Elmore AJ, Skibbe AM, Hutchinson SL, Brunsell NA (2012) Timing of climate variability and grassland productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 3401-3405.
- Davis M (1989) Lags in vegetation response to greenhouse warming. *Climatic change*, **15**, 75-82.
- De Jong R, Verbesselt J, Zeileis A, Schaepman M (2013) Shifts in Global Vegetation Activity Trends. *Remote Sensing*, **5**, 1117-1133.
- Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR, Mearns LO (2000) Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, **289**, 2068-2074.
- Fensholt R, Proud SR (2012) Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends-Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, **119**, 131-147.
- Fensholt R, Rasmussen K, Kaspersen P, Huber S, Horion S, Swinnen E (2013) Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships. *Remote Sensing*, **5**, 664-686.
- Friedl MA, Mciver DK, Hodges JCF *et al.* (2002) Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 287-302.
- Friedl MA, Sulla-Menashe D, Tan B, Schneider A, Ramankutty N, Sibley A, Huang X (2010) MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 168-182.
- Friedman J, Hastie T, Tibshirani R (2000) Additive logistic regression: a statistical view of boosting (With discussion and a rejoinder by the authors). *The annals of statistics*, **28**, 337-407.

- Gong P, Wang J, Yu L *et al.* (2013) Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, **34**, 2607-2654.
- Harris I, Jones P, Osborn T, Lister D (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, **34**, 623-642.
- Hashimoto H, Wang W, Milesi C, Xiong J, Ganguly S, Zhu Z, Nemani R (2013) Structural Uncertainty in Model-Simulated Trends of Global Gross Primary Production. *Remote Sensing*, **5**, 1258-1273.
- Hicke JA, Asner GP, Randerson JT *et al.* (2002) Trends in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982–1998. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**, 2-1-2-14.
- Holben BN (1986) Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1417-1434.
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ *et al.* (2001) *Climate change 2001: the scientific basis*, Cambridge University Press Cambridge.
- Huang K, Yi C, Wu D *et al.* (2015) Tipping point of a conifer forest ecosystem under severe drought. *Environmental Research Letters*, **10**.
- Jeong S-J, Ho C-H, Gim H-J, Brown ME (2011) Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Global Change Biology*, **17**, 2385-2399.
- Jiang B, Liang S (2013) Improved vegetation greenness increases summer atmospheric water vapor over Northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 8129-8139.
- Jing X, Yao W-Q, Wang J-H, Song X-Y (2011) A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing's mountainous areas during the last 20 years. *Mathematical and Computer Modelling*, **54**, 1079-1085.
- Johannessen OM, Shalina EV, Miles MW (1999) Satellite Evidence for an Arctic Sea Ice Cover in Transformation. *Science*, **286**, 1937-1939.
- Jones P, Lister D, Osborn T, Harpham C, Salmon M, Morice C (2012) Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, **117**.
- Jong R, Schaepman ME, Furrer R, Bruin S, Verburg PH (2013) Spatial relationship between climatologies and changes in global vegetation activity. *Global Change Biology*, **19**,

1953-1964.

Karl TR, Trenberth KE (2003) Modern global climate change. *Science*, **302**, 1719-1723.

Kelly AE, Goulden ML (2008) Rapid shifts in plant distribution with recent climate change.

Proceedings of the National Academy of Sciences, **105**, 11823-11826.

Kumar P (2013) Hydrology: Seasonal rain changes. *Nature climate change*, **3**, 783-784.

Kuzyakov Y, Gavrichkova O (2010) REVIEW: Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls. *Global Change Biology*, **16**, 3386-3406.

Lewis SL, Brando PM, Phillips OL, Van Der Heijden GMF, Nepstad D (2011) The 2010 Amazon Drought. *Science*, **331**, 554.

Lu E, Luo Y, Zhang R, Wu Q, Liu L (2011) Regional atmospheric anomalies responsible for the 2009–2010 severe drought in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**, D21114.

Malhi Y, Roberts JT, Betts RA, Killeen TJ, Li W, Nobre CA (2008) Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, **319**, 169-172.

Mao J, Shi X, Thornton P, Hoffman F, Zhu Z, Myneni R (2013) Global Latitudinal-Asymmetric Vegetation Growth Trends and Their Driving Mechanisms: 1982–2009. *Remote Sensing*, **5**, 1484-1497.

Marengo JA, Nobre CA, Tomasella J *et al.* (2008) The Drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, **21**, 495-516.

Mitchell TD, Jones PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, **25**, 693-712.

Morice CP, Kennedy JJ, Rayner NA, Jones PD (2012) Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), **117**.

Mu Q, Zhao M, Kimball JS, McDowell NG, Running SW (2013) A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**, 83-98.

Nayak RK, Patel NR, Dadhwal VK (2013) Inter-annual variability and climate control of terrestrial net primary productivity over India. *International Journal of Climatology*, **33**, 132-142.

Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H *et al.* (2003) Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, **300**, 1560-1563.

- New M, Hulme M, Jones P (2000) Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part II: Development of 1901–96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. *Journal of Climate*, **13**, 2217–2238.
- Nowacki GJ, Abrams MD (2015) Is climate an important driver of post-European vegetation change in the Eastern United States? *Global Change Biology*, **21**, 314–334.
- Orwig DA, Abrams MD (1997) Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. *Trees*, **11**, 474–484.
- Pearson RG, Phillips SJ, Lorant MM, Beck PSA, Damoulas T, Knight SJ, Goetz SJ (2013) Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature climate change*, **3**, 673–677.
- Peng S, Chen A, Xu L *et al.* (2011) Recent change of vegetation growth trend in China. *Environmental Research Letters*, **6**.
- Peng S, Piao S, Ciais P *et al.* (2013) Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *nature*, **501**, 88–92.
- Peteet D (2000) Sensitivity and rapidity of vegetational response to abrupt climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **97**, 1359–1361.
- Piao S, Fang J, Zhou L, Ciais P, Zhu B (2006) Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, **12**, 672–685.
- Rammig A, Wiedermann M, Donges J *et al.* (2014) Tree-ring responses to extreme climate events as benchmarks for terrestrial dynamic vegetation models. *Biogeosciences Discussions*, **11**, 2537–2568.
- Reichstein M, Bahn M, Ciais P *et al.* (2013) Climate extremes and the carbon cycle. *nature*, **500**, 287–295.
- Rundquist BC, Harrington Jr JA (2000) The effects of climatic factors on vegetation dynamics of tallgrass and shortgrass cover. *GeoCarto International*, **15**, 33–38.
- Saatchi S, Asefi-Najafabady S, Malhi Y, Aragão LEOC, Anderson LO, Myneni RB, Nemani R (2013) Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 565–570.
- Saleska SR, Didan K, Huete AR, Da Rocha HR (2007) Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought. *Science*, **318**, 612.
- Samanta A, Ganguly S, Hashimoto H *et al.* (2010) Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. *Geophysical Research Letters*, **37**, L05401.
- Screen JA, Simmonds I (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *nature*, **464**, 1334–1337.

- Sterling SM, Ducharne A, Polcher J (2013) The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature climate change*, **3**, 385-390.
- Stocker T, Qin D, Plattner G-K *et al.* (2014) *Climate change 2013: The physical science basis*, Cambridge University Press Cambridge, UK, and New York.
- Tucker CJ (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**, 127-150.
- Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME *et al.* (2005) An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 4485-4498.
- Van Leeuwen W, Hartfield K, Miranda M, Meza F (2013) Trends and ENSO/AAO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sensing*, **5**, 1177-1203.
- Vicente-Serrano SM, Gouveia C, Camarero JJ *et al.* (2012) Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 52-57.
- Vrieling A, De Leeuw J, Said M (2013) Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sensing*, **5**, 982-1000.
- Walther G-R, Post E, Convey P *et al.* (2002) Ecological responses to recent climate change. *nature*, **416**, 389-395.
- Wang X, Piao S, Ciais P, Li J, Friedlingstein P, Koven C, Chen A (2011) Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 1240-1245.
- Willis KJ, Bennett KD, Burrough SL, Macias-Fauria M, Tovar C (2013) Determining the response of African biota to climate change: using the past to model the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **368**.
- Wu D, Wu H, Zhao X, Zhou T, Tang B, Zhao W, Jia K (2014) Evaluation of Spatiotemporal Variations of Global Fractional Vegetation Cover Based on GIMMS NDVI Data from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, **6**, 4217-4239.
- Wu X, Liu H (2013) Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982–2006. *Global Change Biology*, **19**, 870-880.
- Xu L, Samanta A, Costa MH, Ganguly S, Nemani RR, Myneni RB (2011) Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, **38**.
- Yang J, Gong D, Wang W, Hu M, Mao R (2011) Extreme drought event of 2009/2010 over

- southwestern China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **115**, 173-184.
- Yang J, Gong P, Fu R *et al.* (2013) The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Clim. Change*, **3**, 875-883.
- Zeng X, Dickinson RE, Walker A, Shaikh M, Defries RS, Qi J (2000) Derivation and evaluation of global 1-km fractional vegetation cover data for land modeling. *Journal of Applied Meteorology*, **39**, 826-839.
- Zhang L, Xiao J, Li J, Wang K, Lei L, Guo H (2012) The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. *Environmental Research Letters*, **7**, 045706.
- Zhang X, Susan Moran M, Zhao X, Liu S, Zhou T, Ponce-Campos GE, Liu F (2014) Impact of prolonged drought on rainfall use efficiency using MODIS data across China in the early 21st century. *Remote Sensing of Environment*, **150**, 188-197.
- Zhang Y, Liang S (2014) Changes in forest biomass and linkage to climate and forest disturbances over Northeastern China. *Global Change Biology*, **20**, 2596-2606.
- Zhao M, Heinsch FA, Nemani RR, Running SW (2005) Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, **95**, 164-176.
- Zhao M, Running SW (2010) Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science*, **329**, 940-943.
- Zhou L, Tian Y, Myneni RB *et al.* (2014) Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *nature*, **509**, 86-90.
- Zhu Z, Bi J, Pan Y *et al.* (2013) Global Data Sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the Period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, **5**, 927-948.

在读期间科研成果

在读期间参加项目：

2012.09-2014.09 参与北京师范大学国家级 863 重点项目“全球陆表特征参量产品生成与应用研究”以及“全球生态系统与表面能量平衡特征参量生成与应用”，负责 GLASS ABD 和 GPP 产品的生产，检查，整理等相关工作。

在读期间发表论文情况：

1. **Donghai Wu**, Xiang Zhao, Shunlin Liang, Tao Zhou, Kaicheng Huang, Bijian Tang, Wenqian Zhao. Time-lag Effects of Global Vegetation Responses to Climate Change. *Global Change Biology*, 2015, doi: 10.1111/gcb.12945. (*Published, Top SCI, IF=8.224*).
2. **Donghai Wu**, Hao Wu, Xiang Zhao, Tao Zhou, Bijian Tang, Wenqian Zhao, Kun Jia. Evaluation of Spatiotemporal Variations of Global Fractional Vegetation Cover Based on GIMMS NDVI Data from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, 2014, 6(5), 4217-4239. (*Published, SCI, IF=2.623*).
3. **Donghai Wu**, Xiang Zhao, Wenqian Zhao, Bijian Tang, Wenfang Xu. Response of Vegetation to Temperature, Precipitation and Solar radiation Time-scales: A Case Study over Mainland Australia. *IGARSS 2014*, 2014, 855-858. (*Published, EI, Conference Article*).
4. Kaicheng Huang, Chuixiang Yi, **Donghai Wu**, Tao Zhou, Xiang Zhao, William J Blanford, Suhua Wei, Hao Wu, Du Ling, Zheng Li. Tipping point of a conifer forest ecosystem under severe drought. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2). (*Published, SCI, IF=4.090*).
5. **Donghai Wu**, Xiang Zhao. The state of Vegetative Coverage and its Correlation with Drought Stress in China over the Last Decade. *Remote Sensing*. (*Under Review*).
6. Xiang Zhao, **Donghai Wu**, Shunlin Liang, Tao Zhou, Bin He, Bijian Tang, Hong Wei. Responses of vegetation to different stages of extreme drought during 2009-2010 in southwest China. *Environmental Research Letters*. (*Under Review*).
7. Xin Zhang, Xiang Zhao, Guodong Liu, Qian Kang, **Donghai Wu**. Radioactive Quality Evaluation and Cross Validation of Data from the HJ-1A/B Satellites' CCD Sensors. *Sensors*, 2013, 13, 8564-8576. (*Published, SCI, IF=2.048*).
8. Xiang Zhao, Peipei Xu, Tao Zhou, Qing Li, **Donghai Wu**. Distribution and Variation of Forests in China from 2001 to 2011: A Study Based on Remotely Sensed Data. *Forests*, 2013, 4, 632-649. (*Published, SCI, IF=1.139*).

9. Peipei Xu, Hua Yang, Tao Gao, Xiang Zhao, **Donghai Wu**. Crop Information Extraction in China Based on NDVI Characteristic Curve. *IGARSS 2013*, 2013, 2798-2801. (*Published, EI, Conference Article*).
10. Ling Du, Tao Zhou, Xiang Zhao, Hao Wu, **Donghai Wu**. The Spatial Distribution of Forest Biomass in China using Remote Sensing and National Forest Inventory. *IGARSS 2014*, 2014, 737-740. (*Published, EI, Conference Article*).
11. Zhaolu Zhang, **Donghai Wu**, Xiangyong Yu. Analysis for features spectral reflective ratio simulated images on different spatial information sources. *Science of surveying and mapping*, 2013, 38(3), 190-191. (*Published, Chinese core journal*).

致 谢

这是我做毕业论文的第7天，距离交稿还有3天时间，今天是2015年4月12日。

在这过程中，我突然意识到，硕士生涯就将画下一个句号。不时的回过头来好好想想我这三年，是过得很快，但很充实。

当初选择北京师范大学有几点原因：第一，在首都，也离我家很近；第二，我想做一些遥感方面的工作，这里这个专业很好；第三，我比较喜欢呆在氛围相对好的高校。当然，我很幸运的考到北师大全球院来，轻松并忙碌地度过了我的硕士生涯。

赵祥老师是我在北师大的硕士生导师，也是我生命中的贵人。我在这个学校的所学所想所做都受到老师的认真教导。赵老师对于我的是一种半圈养半放养的指导模式，也一直培养我做一名各方面均有所表现的学生。刚开始的研究生角色转变过程我其实并不适应，是老师一直以来对我的信任和鼓励建立起来了我的自信心。我在一步一步向前走的过程中，老师慢慢教会我做科学研究最重要的素质，独立思考能力和团队合作精神。独立思考是自我的探索 and 发现，团队合作即多人的融合和提升，而解决具体问题就是科学研究的本质。同时老师也鼓励我参加学生团体，通过组织和参与课外活动来提升个人能力。这三年以来我在全球院做了大量的学生工作，贡献了我所能贡献的，现在想想，我认为是值得的。很感谢赵老师对我全面的指导，给我那么多机会，谢谢您！

是赵老师的关系让我认识了周涛老师，周老师可以说是我研究生生涯的另一位导师。周老师是一名学术造诣深厚、科学态度严谨、观点独到新颖、为人热情友善的优秀教师。周老师对我的指导主要在科学研究方面，并且我研究生阶段的大部分工作均得到老师的亲手指导。我现在对于一个问题的构思和分析过程以及对于一篇论文的架构和写作过程，也都受到了周老师影响和熏陶。我很开心很庆幸能遇到周老师，帮助我打开思路，理清头绪。很感谢周老师对我研究生学业上的帮助，谢谢您！

在这里我还要特别感谢梁顺林教授对我的提拔，对我论文的指导，谢谢您对我们这些年轻学生的培养！感谢王开存教授对我博士申请期间的支持和帮助！感谢朴世龙教授对我的赏识，给我做博士的机会！

我很幸运，研究生遇到了一个很有爱的班集体，每一位同学都很友善，很可爱，当然也很优秀。我和你们一起的日子，真的很珍惜，我想学生生涯过去，这会是宝贵的财富也是美丽的回忆。谢谢你们，一直以来对我的支持和帮助，对彼此的关照，愿我们曲终人不散，友谊永存！

我还有一个更给力的宿舍（1027，老魏、修哥、磊哥和海哥），里面有很多故事也有很多回忆，我很开心。谢谢你们，和这一段段小故事的陪伴。祝我们都有美好的前程！

我们的小组也很温馨，师弟师妹都很开朗，很优秀，我很开心和你们一起度过的每一

天，师兄祝你们前程似锦！我这三年都在 209 继续着我的研究生生涯，这个办公室里面来来去去很多人，发生过很多事，有些记得有些不记得，但都在我的心里。鑫哥、小碧、文倩、魏红、小唐、帅哥、崔娇、海成，感谢每一位身边的朋友！

感谢芳姐，谢谢你对我的理解和照顾。我们在研究生期间相遇，相识，相知，相守，虽然经历了些许的坎坷，但终走在一起。谢谢你的陪伴，谢谢你的支持，谢谢你对我的帮助，祝福我们！

感谢我的家人，感谢爷爷奶奶，感谢爸妈对我的鼓励，感谢您们 25 年来对我的幸苦培养，我爱你们，祝你们天天开心，身体健康！我最亲爱的姥姥姥爷在我研究生期间离开了，我很难过，没能好好陪伴您们，我很自责，我也很想您们，愿一切安好。

求学整整 18 年，一个漫长而曲折的过程，最重要的不是学了多少知识，而是你变成了什么样的人，愿你用乐观的生活态度来追求自己的目标理想！

研究生三年，我过的很开心、很充实、很有收获。感谢期间所有帮助过我的人，我的老师、朋友、同学和我认识的可爱的人们，感谢和我一起做过事的研究生会的同学，感谢篮球队的伙伴，感谢我的球友邵思雅同学，感谢我的好朋友黄凯程师姐，谢谢你们，祝福你们！

生命犹如奔流的大河，汹涌澎湃，勇往直前！我将会带着这份情感继续前行，实现我的理想，追求我的梦！

武东海

2015 年 4 月 12 日