

气候变化与 植被的响应研究 ——以黄河源区为例

史丹丹 胡金明 罗宏/著

CLIMATE CHANGE AND
VEGETATION RESPONSE:
A CASE STUDY OF THE YELLOW RIVER SOURCE REGION



中国环境出版集团

气候变化与植被的响应研究

——以黄河源区为例

史丹丹 胡金明 罗宏 著

中国环境出版集团·北京

图书在版编目（CIP）数据

气候变化与植被的响应研究：以黄河源区为例/史丹丹，
胡金明，罗宏著. —北京：中国环境出版集团，2018.7
ISBN 978-7-5111-3682-4

I. ①气… II. ①史…②胡…③罗… III. ①气候变
化—影响—植被—研究—黄河流域 IV. ①Q948.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 110168 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 陈雪云 刘 焱
责任校对 任 丽
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (第一分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京建宏印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2018 年 7 月第 1 版
印 次 2018 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 7.25
字 数 134 千字
定 价 39.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

前言

在全球变暖背景下,青藏高原作为全球生态环境最为敏感和脆弱的地区之一,其植被-气候关系备受学术界关注,尤其是生长季及生长季开始期植被对气候变化的响应。以往研究多采用区域、不同植被类型或局地尺度(以气象站点为中心)来确定生长季的开始、结束期以及生长季的长度,进而对生长季植被与气候因子进行关联分析,但结论争议颇多。初步分析认为,研究尺度及研究方法的差异是导致这些认识不同的原因所在。

为了解分歧存在的具体原因,多角度、深层次剖析黄河源区植被-气候关系,更加深入地理解黄河源区植被对气候因子的响应过程。本研究选取青藏高原东北部季风边缘区的黄河源流域(龙羊峡以上)作为植被-气候关系的研究区,基于地理信息系统和数理统计等软件,利用2000—2013年Terra/MODIS NDVI数据产品和黄河源区及周边39个气象站点气温、降水资料,通过一元线性回归分析、克里金插值、相关分析等方法,分别在两个空间尺度(区域和局地)以及两个时间尺度(生长季和16天)上,基于NDVI对黄河源区生长季植被与气候因子的关联特征进行探讨。主要结论如下:

(1)黄河源区区域多年平均(2000—2013)生长季开始期为5月下旬(DOY145),结束期为10月中旬(DOY273);局地生长季开始期和结束期都存在明显的时空异质性,总体上表现为东北角站点长达6个月,西北部站点短至3个月,其他地区站点在4~5个月不等,而且同一站点的生长季开始、结束期存在一定的年际变化。

(2)黄河源区多年平均(2000—2013)生长季NDVI具有显著的区域差异,整体表现为由东南向西北递减。总体来看,2000—2013年,黄河源区NDVI呈增加趋势。其中,生长季NDVI无显著变化的区域占源区植被覆盖区面积的2/3以上,且分布范围较广;极显著和显著增加区域,占源区面积近1/3,集中在黄河源东北部和西北部扎陵湖、鄂陵湖周围;极显著和显著减少区域所占比例不足2%,主要以小斑块状分布在扎陵湖、鄂陵湖以上源头区。

(3)2000—2013年,黄河源区生长季NDVI与气候因子多表现为显著正相关或无显著相关关系,显著负相关区域面积积极小,呈零星斑点状分布。NDVI与气温极显著、显著正

相关区域位于源区冷湿的西北部和暖湿的东南部；与气温显著、极显著负相关的区域主要位于源区北部一些点状斑块。NDVI 与降水极显著、显著正相关区域除西北部和东南部外，干热的东北角也是重要分布地区，与降水显著、极显著负相关的区域主要分布在西北部，且面积极小，呈斑点状分布。

(4) 在 2000—2013 年，年内来看，黄河源区多数年份生长季 NDVI 与气温呈显著或极显著正相关，与降水相关性相对较弱；年际来看，生长季 NDVI 与生长季或季前 1 个月内的气候因子显著相关。按照 MODIS NDVI 数据 16 天的时间分辨率，生长季 NDVI 对气候因子的响应均存在 16 天的滞后期。

(5) 大多数情况下，以气象站点为中心 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的空间范围是提取 NDVI 与气候因子进行相关分析的“最佳空间尺度”，这一尺度随站点和生长季界定方法的不同而不同。

(6) 黄河源各站点生长季 NDVI 对气温、降水均表现为正相关响应。其对生长季及季前气温变化比较敏感，滞后期为 16 天；对降水的滞后期多为 32~48 天，较干旱区，NDVI 对降水响应较快，滞后期较短，较湿润区，NDVI 对降水响应较慢，滞后期较长。

(7) 黄河源区各站点植被生长季开始期 NDVI 与气温和降水均为正相关关系。物候生长季开始期所有站点植被-气温关联特征均较一致，气候生长季开始期仅在 5 个同一冷暖程度地区关联特征保持一致；物候生长季开始期 NDVI 对降水的响应表现为同一干湿程度地区大致相同，气候生长季开始期植被与降水的关联特征相对较复杂。

本书是在我的硕士论文的基础上修改完善，在前期调研与写作过程中，得到中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司科技项目“水电开发对湿地水文生态关键要素的影响及健康评价研究”(GW-KJ-2012-09)资助和国家重点研发计划项目(No. 2017YFC0505200)支持。从框架的构建到文稿写作的细节，都经过我的导师——云南大学国际河流与生态安全研究院胡金明教授的悉心点拨，研究院其他老师们也对本书的完成起到很大的指导作用，樊辉老师、李运刚老师和季漩老师在遥感和 GIS 方面的指导，罗贤老师在气候数据获取方面的帮助等都让我感激不尽；同时，杨飞龄师兄、李杰师兄、钟荣华师兄、李宁云师兄、贾海峰师兄、罗怀秀师姐和洪欢在文稿撰写过程中也给予一定的帮助和建议；在中国环境科学研究院工作期间，经过罗宏研究员的指导和帮助，对文稿不断完善，至最终完成。在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在许多纰漏和不足，敬请专家学者和广大读者批评指正。

作 者

2018 年 6 月

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义 / 1	
1.1.1 研究背景 / 1	
1.1.2 研究意义 / 2	
1.2 国内外研究进展 / 4	
1.2.1 气候变化研究 / 4	
1.2.2 植被的时空分异研究 / 5	
1.2.3 植被生长季研究 / 5	
1.2.4 NDVI 与气候因子关系研究 / 7	
1.2.5 基于 NDVI 的植被生长季开始期与气候因子关系研究 / 8	
1.3 研究思路、技术路线与研究内容 / 9	
1.3.1 研究思路与技术路线 / 9	
1.3.2 研究内容 / 10	
第二章 研究区概况.....	12
2.1 地理位置 / 12	
2.2 地形地貌 / 12	
2.3 气候特征 / 16	
2.4 河流水系 / 17	
2.5 植被类型及特征 / 19	
2.5.1 植被类型 / 19	
2.5.2 主要植被类型基本特征 / 21	
2.6 土壤类型及分布 / 22	
2.6.1 土壤类型 / 23	

2.6.2	土壤类型分布	/ 23
2.7	景观格局	/ 25
2.7.1	黄河源区景观类型	/ 25
2.7.2	干流沿线景观类型	/ 26
第三章	数据处理与研究方法	27
3.1	数据源与预处理	/ 27
3.1.1	黄河源区 NDVI 数据	/ 27
3.1.2	黄河源区边界及气象数据	/ 28
3.2	研究方法	/ 28
3.2.1	生长季开始期和结束期界定	/ 28
3.2.2	回归分析	/ 30
3.2.3	克里金 (Kriging) 插值	/ 30
3.2.4	相关分析	/ 31
第四章	近 40 年黄河源区气候变化特征	34
4.1	气温变化特征	/ 34
4.1.1	1971—2000 年气温变化特征	/ 34
4.1.2	2000—2013 年气温变化特征	/ 34
4.2	降水变化特征	/ 39
4.2.1	1971—2000 年降水变化特征	/ 39
4.2.2	2000—2013 年降水变化特征	/ 40
4.3	小结	/ 43
第五章	生长季 NDVI 时空分异及变化趋势	44
5.1	区域生长季 NDVI 空间分异及变化趋势	/ 44
5.2	区域生长季 NDVI 时序变化及趋势	/ 47
5.2.1	年尺度上区域生长季 NDVI 时序变化及趋势	/ 47
5.2.2	月尺度上区域生长季 NDVI 时序变化及趋势	/ 47
5.2.3	16 天尺度上区域生长季 NDVI 时序变化及趋势	/ 51
5.3	局地生长季 NDVI 变化及趋势	/ 52

5.4	不同海拔高度生长季 NDVI 变化	/ 53
5.5	不同植被类型生长季 NDVI 变化	/ 55
5.6	基于 NDVI 的黄河源区湿地健康评价	/ 58
5.6.1	黄河源区湿地基本特征	/ 59
5.6.2	黄河源区湿地 NDVI 空间分异及变化趋势	/ 62
5.6.3	黄河源区湿地 NDVI 时序变化及趋势	/ 63
5.6.4	黄河源区干流沿线湿地 NDVI 时空分异	/ 65
5.7	小结	/ 66
第六章	区域生长季 NDVI 与气候因子关联特征	68
6.1	区域生长季 NDVI 与气候因子关联的空间分异特征	/ 68
6.2	区域生长季 NDVI 与气候因子关联的时序变化特征	/ 69
6.3	不同海拔 NDVI 与气候因子关联特征	/ 71
6.4	不同植被类型 NDVI 与气候因子关联特征	/ 72
6.5	小结	/ 72
第七章	局地生长季 NDVI 与气候因子关联特征	74
7.1	局地生长季的界定	/ 74
7.2	局地生长季 NDVI 与气温关联特征	/ 75
7.3	局地生长季 NDVI 与降水关联特征	/ 78
7.4	小结	/ 78
第八章	局地生长季开始期 NDVI 与气候因子关联特征	80
8.1	局地生长季开始期 NDVI 与气温关联特征	/ 80
8.1.1	物候生长季开始期 NDVI 与气温关联特征	/ 80
8.1.2	气候生长季开始期 NDVI 与气温关联特征	/ 82
8.2	局地生长季开始期 NDVI 与降水关联特征	/ 85
8.2.1	物候生长季开始期 NDVI 与降水关联特征	/ 85
8.2.2	气候生长季开始期 NDVI 与降水关联特征	/ 86
8.3	小结	/ 87

第九章 讨论与结论	88
9.1 讨论 / 88	
9.1.1 区域生长季植被-气候关系 / 88	
9.1.2 局地生长季植被-气候关系 / 89	
9.1.3 基于 NDVI 的局地生长季开始期植被-气候关系 / 89	
9.1.4 生长季植被-气候关系研究的局限性 / 91	
9.2 结论 / 91	
参考文献	95
附 录	101

第一章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

据世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO）宣布，1998—2007 年是有记载以来最暖和的 10 年。虽然对气候变化的危害临界值没有定量的标准，但全球气候变化给人类及生态系统带来的灾难是显而易见的：极端天气、冰川消融、永久冻土层融化、珊瑚礁死亡、海平面上升、生态系统改变、旱涝灾害增加、致命热浪等。从北极到赤道，气候变化产生的影响都是不可忽略的。

地球升温越来越快，温度上升导致喜马拉雅等高山的冰川消融、对淡水资源形成长期隐患；海平面上升，人口密集的沿海地区和岛屿面临咸潮破坏，甚至淹没之灾，防止被淹没一直都是马尔代夫最重要的国家政策之一，太平洋岛国图瓦卢不得不在 2002 年举国迁往新西兰；冻土融化，日益威胁当地居民生计和道路工程设施；热浪、干旱、暴雨、台风等极端天气、气象灾害等越来越频繁，导致当地居民生命财产损失加剧；粮食减产，千百万人面临饥饿威胁；每年，全球因气候变化导致腹泻、疟疾、营养不良多发而死亡的人数高达 15 万人，主要发生在非洲及其他发展中国家。2020 年，这个数字预期会增加一倍；珊瑚礁、红树林、极地、高山生态系统、热带雨林、草原、湿地等自然生态系统受到严重的威胁，生物多样性受损害。

在全球气候变暖的大背景下，中国近百年的气候也发生了明显的变化：气温上升了 $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ，20 世纪 90 年代是近百年来最暖时期之一。对中国未来气候的预测：到 2020—2030 年，全国平均气温将可能上升 1.7°C ，而青藏高原气温可能上升 $2.2\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ ，相当于 2050 年全国平均气温上升的幅度。由此看来，气候变暖带给青藏高原的变化是非常剧烈的，被称为气候的“放大器”，其所经历的气候变暖过程要比周围地区更为强烈。1961—2012 年青

藏高原的平均增温幅度每 10 年超过了 0.3°C ，是同期全球平均增温幅度的 2 倍。受气候变暖的影响，青藏高原生态系统发生了显著的变化，植被对气候变化的响应尤其显著。

在生态系统中，植被对环境变化比较敏感，其中气候是最主要的自然驱动力，对植被生长具有决定性的作用 (Piao et al., 2011)。在全球气候变化背景下，植被-气候相互关系的定量研究在区域乃至全球变化研究都具有极其显著的意义 (张新时, 1993)。中高纬温带植被和气候都具有季节性变化特征，植被生长的动态过程及其对气候变化的响应是区域植被-气候关系研究中一个重要课题 (Piao et al., 2006a)。

在全球变暖背景下，南北极地区已受到严重影响，而素有地球“第三极”之称的青藏高原生态环境异常敏感和脆弱，是受气候影响变化最为剧烈的区域之一，已成为全球气候变化研究的关键地区，备受学术界关注 (Shen et al., 2011)。然而，青藏高原地区自然环境恶劣，植被和气象观测资料均较贫乏，遥感技术凭借较大的空间覆盖度和较高的时间分辨率，在大尺度陆地生态系统变化研究中发展迅猛，成为高寒地区植被的有效监测和管理手段 (Piao et al., 2006a)。

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 是反映植被生长状况的一个重要遥感参数 (Tucker et al., 1979)，反映植被生物量和覆盖度，对植被生长趋势的变化也非常敏感，是气候变化下植被响应研究的有效指示因子 (Linderholm et al., 2006)，已经广泛应用于植被覆盖 (杨元合等, 2006)、植被健康 (De Keersmaecker et al., 2015)、生物量 (Zhang et al., 2014) 及物候 (Jenkins et al., 2002; Piao et al., 2006a; Yu et al., 2010; Shen et al., 2011; Cong et al., 2013) 等方面的研究。

1.1.2 研究意义

全球气候系统非常复杂，影响气候变化的因素非常多，涉及太阳辐射、大气环流、下垫面性质 (水陆分布、地形、洋流、植被覆盖度等) 和人类活动等诸多方面，对气候变化趋势，在科学认识上还存在不确定性，特别是对不同区域气候的变化趋势及其具体影响和危害，还无法做出比较准确的判断，因此，对局地气候的研究具有重要的理论和实用价值意义。作为“世界屋脊”，青藏高原自身气候变化和生态系统均十分敏感，而且青藏高原是亚洲主要江河的发源地，同时也是全球中低纬度冰川最为发育的地区，其气候变化会对周边地区乃至全球生态系统产生深远的影响。

在青藏高原暖湿化趋势下，植被生长状况总体上呈现出向良性发展的态势 (Piao et al., 2011; Ding et al., 2013)，但因地理位置、地形地貌及植被类型等的不同而呈现出显著的区域差异 (Zhang et al., 2014)。黄河源区位于青藏高原腹地东北部，气候变化剧烈 (李林

等, 2011), 植被生长对气候变化尤其敏感 (Shen et al., 2011)。探讨黄河源区植被-气候关系, 一方面, 对进一步了解全球变化下陆地生态系统的响应具有重大科学意义; 另一方面, 对当地牧草的可持续利用和区域生态环境保护及建设, 保障河源区和中下游地区的生态安全及维护社会经济可持续发展都具有重要的现实意义。

黄河源区属于大陆性高寒气候, 植被生长季相对较短, 非生长季植被枯萎, 且存在霜冻和冰雪覆盖现象。为了突出植被生长变化及其与气候因子的关联特征, 本研究在生长季范畴讨论植被-气候的关系。生长季 NDVI 对气候因子响应的相关研究, 以往多停留在区域整体尺度或不同植被类型尺度进行分析, 而未考虑同一植被类型在区域内部的各个局部地区生长季也可能不同, 不能完全体现区域植被-气候关系的时空异质性。因此, 本研究除在区域整体尺度对植被-气候关系开展研究外, 还对研究区内局地 (以各气象站点为中心的空间范围为代表) 植被-气候相互关系进行探讨, 以求更深入地理解黄河源区植被对气温、降水等主要气候要素的响应过程。

在高寒区域, 植被返青期, 也即植被生长季开始期, 对气温、降水的响应一直是个热点问题, 但是众多研究结果并不一致。有的认为生长季前气温、降水与植被生长季开始期均为显著负相关 (Piao et al., 2006a); 但也有研究表明, 生长季前降水与植被生长季开始期为负相关, 而生长季前气温与植被生长季开始期为正相关 (Shen et al., 2011)。在响应时间方面, 研究结果同样存在分歧: 有研究显示, 植被生长季开始期和生长季前 2~3 月时期气温最相关, 和生长季前 4~5 月时期降水相关性最大 (Piao et al., 2006a); 但也有研究指出, 植被生长季开始期对季前气候因子的响应在局地 (气象站点) 不等, 均保持在近期 1~3 个月范围内 (Shen et al., 2011)。究其原因, 研究尺度及研究方法的差异可能是结论不同的关键所在。

综上所述, 本研究利用 2000—2013 年 MODIS NDVI 数据、气象站点日均温和日降水资料等, 基于区域整体和局部地区两个尺度, 分析黄河源区生长季 NDVI 时空分异及其与气温、降水的关联特征, 并进一步在局部地区尺度探讨生长季开始期 NDVI 与气候因子的关系, 以求多层次、多角度剖析黄河源区的植被生长状况及其植被-气候关系。其中, 本文区域整体尺度简称“区域”, 局部地区尺度简称“局地”, 局地以其对应的各气象站点名称命名。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 气候变化研究

20 世纪 80 年代以来,国际上已有许多学者对全球的气候变化进行了探索。政府间气候变化专业委员会(IPCC, 2007)第四次报告指出,近 100 年里(1906—2005 年),全球平均温度上升了约 0.74°C ,北半球高纬度区域升温幅度较大,大陆地区比海洋变暖更快,而且这种变暖趋势在可预见的未来还将持续;亚洲北部和中部降水量显著增加。2012 年 NASA(美国航空航天局)和 WMO(世界气象组织)均报道了自有地表温度器测资料以来(1850 年),全球最暖的 10 个年份有 9 个出现在 2000—2011 年。

在过去的 20 多年,中国在气候变化规律、气候变化的影响和适应、减缓气候变化等方面的研究也取得显著进展。有研究显示:1951—2002 年,全国年平均气温增暖幅度为 1.1°C ,增温速率接近 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,明显高于全球或北半球同期平均增温速率,且增暖主要发生在 20 世纪 80 年代以后;降水量变化趋势不显著,但区域分异明显,降水增加地区主要为东北北部、长江中下游和西部大部分地区,而降水明显减少地区主要分布在华北地区、东北东南部及西北东部地区(任国玉等, 2005)。

全球变暖导致全球气候发生了很大变化。在全球变暖的大背景下,青藏高原的局地气候也发生了很大变化。但是作为地球上独特的自然区域,其气候变化与中国其他地区相比存在明显差异,同时又具有一定联系。在 1960—2012 年,青藏高原气温的升温率为 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,大约是全球同期升温率的 2 倍(IPCC, 2013)。冰芯记录的结果显示青藏高原古代气温和现代气温变化幅度均比低海拔地区大(姚檀栋等, 2000)。因此,有学者将青藏高原称为全球气候的驱动器和放大器(潘保田, 1996)。青藏高原的降水主要发生在夏季(6—9 月),占全年降水量的 60%~90%(Xiao et al., 2008)。1960—2012 年,青藏高原降水整体呈现增加的趋势,每十年增加 2.2%,但南北差异显著:北部降水量增加,南部同期降水减少。这种差异与西南季风减弱和西风加强有密切联系。

综上所述,由于不同研究选用的研究资料以及研究方法的不同,结果存在一定差异;在全球气候变化的背景下,气候变化趋势存在显著的时空差异。此外,对气候变化及其影响的基本事实已得到国际社会和科学界的广泛认同,但由于研究方法不同、数据资料不同,同一地区的研究结果可能有差异,对气候变化及其影响的研究还存在许多不确定性。因此,在大力研究大尺度气候变化的同时,必须加强区域,尤其是生态敏感脆弱区域气候变化及

其影响等内容研究。

1.2.2 植被的时空分异研究

植被是自然生态系统的重要要素和环境的重要组分,良好的植被状况不仅可以改善环境,而且通过植被能够快速认识自然地域综合体的许多性质及特点。通过遥感手段监测植被,最重要的是利用卫星传感器对地表植被反射光谱的响应,建立光谱响应和植被覆盖及长势之间的相关性。因此,利用波段间的不同组合方式计算的植被指数成为植被遥感监测的重要手段(赵英时,2003)。

Myneni 等(1997)利用 1981—1991 年时序数据对 45°N 以上地区植被研究表明 NDVI 的线性增加趋势为 10%,且春天植被提前回绿现象明显。Stow 等(2003)利用 1990—1999 年 1 km AVHRR LAC 资料提取的 SINDVI 数据发现阿拉斯加 Slope 地区北部植被绿度有增加趋势。朴世龙等(2004)利用 1982—1999 年的 NOAA-AVHRR 数据研究了中国生长季植被变化,研究结果发现,1982—1999 年,中国生长季植被 NDVI 呈极显著增加趋势,但 1992—1994 年 NDVI 直线下降,可见,同一时段内的不同阶段植被变化也不相同。Zhang 等(2014)对青藏高原 1982 年以来高寒草地生态系统中不同植被类型 NPP 的时空变化进行分析,发现 1982—2009 年 NPP 变化总体呈波动上升的趋势,该结果由气温和降水的联合效应导致。但不同区域变化趋势不同,其中黄河流域 NPP 增加最显著,可能和该流域气候变化及生态工程建设的驱动作用有关。刘正佳等(2014)通过研究 1998—2012 年气候变化对三江源地区草地生态系统的影响及适应机制,得出在区域尺度上,15 年来研究区生长季植被覆盖度呈极显著增加的趋势,在草地生态系统类型上,高寒草甸和高寒草原对气候因子的响应存在明显差异性。徐浩杰等(2012)利用 2000—2011 年 500 m TERRA/MODIS NDVI 数据,逐像元计算分析了 12 年来黄河源区高寒草原、高寒草甸、高寒灌丛生长季 NDVI 时空特征。结果表明,2000—2011 年黄河源区植被生长呈改善趋势,且源区不同区域和不同植被类型改善面积不同,气候的暖湿化趋势可能是促使黄河源区植被生长改善的主要原因。

因此,选择不同时间尺度和区域尺度对植被时空分异进行较全面的研究是必要的。

1.2.3 植被生长季研究

气候变暖导致陆地生态系统固有的生命过程规律发生改变,尤其是植被生长季特征的变化(郭灵辉等,2013),包括植被生长季开始期和结束期的提前、延后,生长季长度的延长和缩短等。在对青藏高原植被生长季的研究中,近十几年来主要有以下几种结论:

①生长季开始期提前, 结束期推后, 生长季延长 (Piao et al., 2006a; Zhang et al., 2013; Shen et al., 2015b); ②生长季开始期延迟, 结束期变化不显著, 生长季缩短 (Yu et al., 2010); ③不同区域生长季变化不同 (Chen et al., 2005; Shen et al., 2011)。经初步分析, 争议存在的原因可能与研究尺度和研究方法有关。生长季变化具有一定的时空异质性, 不同区域不同, 不同年份也不同, 差异可达几个月, 在西北欧的研究中也存在类似的情况 (Beck et al., 2005)。因此, 不同的研究尺度和研究方法极有可能导致结论的不同。

纬度位置、海陆位置及海拔高度等都是影响生长季特征的关键性因子 (Linderholm et al., 2006)。气候变暖, 北半球中高纬度地区冰雪融化时间提前, 植被生长季开始期提前, 进而生长季延长, 尤其是冬春变暖会引起生长季开始期显著提前 (Chen et al., 2005); 而低纬地区则由于升温带来的干旱胁迫造成生长季开始期的延迟, 生长季缩短。近海地区较湿润, 春季气温升高, 势必会带来生长季开始期的提前和结束期的推迟, 以及生长季的延长; 而较干旱的内陆地区, 气候变暖, 降水若无增加或者增加不显著, 都将会引起生长季开始期的推迟, 生长季的缩短 (Cong et al., 2013)。海拔越低, 植被生长季开始期越早, 生长季越长; 反之, 海拔越高, 温度越低, 植被生长季开始期越晚, 生长季越短 (Piao et al., 2011)。

生长季的时空分异除受纬度、海陆、海拔及其造成的气候因素差异等影响外, 和冻土消融、植被覆盖度变化、土地利用类型变化、火山爆发、大尺度区域天气现象 (如厄尔尼诺、北大西洋涛动-NAO) 等也有很大关系 (Linderholm et al., 2006; Chen et al., 2011)。研究表明, 气候变暖、冻土退化、土壤水分流失, 导致干旱地区生长季开始期推迟 (Chen et al., 2011); 火山喷发等引起的全球变冷也会导致翌年全球范围内生长季开始期延迟, 1982—1999 年生长季持续提前的趋势在 1992 年出现中断, 即由于 1991 年菲律宾皮纳图博火山爆发造成全球气候变冷的缘故 (Linderholm et al., 2006)。

一般而言, 植被生长季分气候学和植物学两种定义方法, 因定义指标的不同而存在差异。从气温角度来界定的生长季为气候生长季, 其定义为: 某年连续 5 天日平均温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 到连续 5 天日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 这段时期的总天数 (Frich et al., 2002; Linderholm et al., 2006)。从植物学上的物候期角度来界定的生长季为物候生长季, 其定义为: NDVI 最大和最小变化率时刻的 NDVI 临界值之间的时段 (Piao et al., 2006a)。气候生长季和物候生长季在植被生长季研究及生长季植被与气候因子关系研究等方面应用均比较广泛 (Chen et al., 2000; Chmielewski et al., 2004; Chen et al., 2005; 陈效逑等, 2001)。

1.2.4 NDVI 与气候因子关系研究

过去几十年,全球气温上升显著,北半球中高纬度植被受气温影响强烈(孙红雨等,1998)。在青藏高原地区,有研究指出,气温对植被呈现负相关影响,即气温越高,植被生物量和覆盖度越低(Dong et al., 2013);但也有研究认为,气温升高带来植被生长的增加趋势(陈琼等,2010;康悦等,2011)。不一致的原因主要是不同干湿程度区域植被和不同类型植被对气温响应过程存在显著差异(李辉霞等,2011)。然而,温室效应影响下,在温带地区,气温已不再是植被生长的限制性因子,植被生长对气温变化的敏感性将逐渐降低(Piao et al., 2006b)。而且,由于气温升高极易形成干旱灾害,植被对气温的正响应也正慢慢减弱(Piao et al., 2014)。当然,这些结论并不适用于所有植被类型,也随着季节的变化而不同(Piao et al., 2006b)。

全球气候变暖的同时,降水也发生诸多改变,但学术界对植被与降水的关系相对关注较少(Fang et al., 2005)。植被对降水的响应一般表现为正相关,即降水增加,NDVI 增加,植被生长态势趋向良好(Dong et al., 2013),在半干旱区域尤其明显(Ichii et al., 2002)。但是,不同类型植物群落对降水响应不一致。如降水增加,草地和落叶阔叶林 NDVI 显著增加,而落叶针叶林 NDVI 减少,可能是降水量的增多导致寒温带落叶针叶林地区温度降低,光照减少,进而植被生物量减少的缘故(Fang et al., 2005)。较湿润地区或者高寒区域大多会出现诸如此类的现象(陈琼等,2010)。此外,植被生长与降水时间和降水频率也有一定关系,如雨季降水量对植被生长起主要作用(孙睿等,2001);降水量不变的情况下,降水频率降低,植被生产力随之降低(Fay et al., 2003)。

一般而言,植被对气候因子的响应过程还存在滞后效应(Wang et al., 2003; 刘宪锋等,2013; 周伟等,2014)。有研究发现,NDVI 与气温存在 2~3 个月的滞后期,即 4 月或 5 月的 NDVI 值和 2 月的气温相关性最高(Piao et al., 2003)。也有研究表明,NDVI 与同期气温相关性最高,这意味着 NDVI 对气温的响应不存在时滞现象(刘宪锋等,2013)。植被与降水的滞后效应研究结果也存在分歧:Wang 等(2003)认为生长季 NDVI 与季前 1~2 个月降水较为相关,刘宪锋等(2013)则得出 NDVI 与前一月降水的相关系数最高的结论。

综上所述,NDVI 与气候因子的关系存在显著的时空异质性,不同年份,不同地区,不同植被类型 NDVI 与气温、降水的相关性及滞后期均存在差异(Piao et al., 2003; Piao et al., 2004; 杨元合等,2006)。

1.2.5 基于 NDVI 的植被生长季开始期与气候因子关系研究

返青是植被春季物候现象之一，可以很直观地指示植被生长的开始期。植被生长季开始期对生物圈、水圈和大气圈之间的物质循环和能量流动具有重要意义，如碳、氮循环和水循环等；对人类社会经济发展也产生深远影响，如生长季开始期的变化影响作物产量和病虫害防治等（Piao et al., 2006a）。因此，植被生长季开始期一直是物候学研究的热点问题。由于对环境变化响应迅速，尤其对气候因子变化异常敏感，植被生长季开始期和气候因子之间的关系备受科学界关注（方修琦等，2002）。

中高纬植被春季物候活动（spring events，如展叶、开花等）主要取决于温度，春季植被生长和春季气温密切相关（Chmielewski et al., 2004; Linderholm et al., 2006）。随着全球每 10 年 0.2°C 的升温速率（IPCC, 2013），植被生长季开始期对气温的响应也越来越显著。有研究表明，植被生长季开始期和生长季前气温呈负相关关系，季前气温升高，生长季开始期提前（Piao et al., 2006a; Zhang et al., 2013; Shen et al., 2015b）。但也有研究指出，植被生长季开始期对气温呈正相关关系，即季前气温升高，生长季开始期延迟（Yu et al., 2010; Shen et al., 2011）。关于植被生长季开始期对季前气温响应时间长度问题，现有研究也存在较大争议。有研究显示，植被生长季开始期和季前 2~3 个月的气温相关性最高（Piao et al., 2006a）；还有研究认为，各气象站点植被生长季开始期对气温响应程度不同，响应时间也长短不等（Shen et al., 2011）。而且，季前气温存在年际变化，生长季开始期对季前气温的敏感性也随之发生变化（Shen et al., 2014）。

总体来看，温度是影响植被生长季开始期的主导因子，但是降水也会给生长季开始期带来一定影响，尤其在干旱半干旱地区，植被对降水的响应较显著（Shen et al., 2015a）。一般而言，生长季前降水会引起植被生长季开始期的提前（Piao et al., 2006a; Cong et al., 2013; Shen et al., 2011; Shen et al., 2015b），但不同类型植被生长季开始期对降水响应并不一致。例如，季前降水增加可能会提前高寒草原生长季开始期，却会延迟高寒草甸生长季开始期（Piao et al., 2006a）。而在响应时间方面，季前降水对植被生长季开始期的影响可长达 5 个月，从春季一直延续到前一年冬季（Piao et al., 2006a）。在植被生长季开始期和降水的关联特征中，时空异质性依然存在。不同区域、不同年份生长季开始期对降水响应过程不同，甚至在同一区域，二者相关性随着降水特征的变化也会发生变化（Shen et al., 2011; Shen et al., 2015a）。

此外，气温、降水对植被生长季开始期存在交互影响，且会受到其他环境因子的干扰。如季前降水增加，植被生长季开始期对气温的响应显著性增强，对降水敏感性将会减弱