

黄河源区

气候、植被变化与水源
涵养功能评估研究

杜加强 舒俭民 熊珊珊◎著



科学出版社

黄河源区

气候、植被变化与水源
涵养功能评估研究

杜加强 舒俭民 熊珊珊◎著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从黄河源区近几十年来影响水资源的气候变化特征、生态系统水源涵养功能动态趋势、原因等方面进行了系统全面的科学分析总结。通过多种方法在多个时间尺度分析区域气候要素变化过程,建立了区域干湿气候分区;以 NDVI 时间序列为数据源,分析了植被覆盖、生产力对气候变化的响应;提出了大范围植被退化遥感识别的技术方法,并与已有研究进行了验证分析;研究了气候变化背景下黄河源区潜在蒸散量的时空变化及其对气候因子的敏感性;建立了区域尺度水源涵养功能的定量化表征方法,分析了其时空变化特征;通过野外实验发现,植被退化对土壤水源涵养功能具有显著影响。

本书可供生态学、地理学、环境学及全球变化等领域的科技工作者与管理人员,以及高等院校的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄河源区气候、植被变化与水源涵养功能评估研究 / 杜加强等著. —北京: 科学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-03-041610-0

I. 黄… II. 杜… III. ①黄河-生态系-服务功能-关系-气候变化-研究②黄河-生态系-服务功能-关系-地面植被-研究 IV. ①X321. 2②P467③Q948. 15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 191320 号

责任编辑: 张 菊 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 13 3/4 插页: 1

字数: 300 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

国家自然科学基金项目“黄河源区植被覆盖变化
对水源涵养能力的影响研究”(41001055)
和公益性科研院所基本科研业务专项
(2009KYYW10和2012-YSKY-13)等
项目资助

前 言

黄河源区是三江源自然保护区的重要组成部分,对我国北方地区的生态安全、水安全起到重要的保障作用。从 20 世纪 70 年代开始,黄河下游频繁断流,特别是进入 90 年代,黄河源头也出现断流,黄河流域的水资源日趋短缺。黄河是我国北部的重要水系,水资源的供需矛盾十分突出,频繁的断流现象给黄河沿岸地区的社会经济发展造成了很大损失。黄河源区为黄河流域提供了近一半的径流量,其生态环境备受世人关注。保护黄河源区的生态环境,提高水源涵养能力,是从根本上解决黄河断流和枯水的方法之一。系统地研究黄河源区的气候、蒸散发、径流、植被覆盖变化及其相互作用,建立定量化的水源涵养能力表征体系,对于探讨黄河源区近年来的生态系统演变及其服务功能的变化,具有重要的科学意义和实践价值。

本书以黄河的主要产流区——青海省以上黄河流域为研究区域,从气候、植被、蒸散发的空间分布、变化过程和特征趋势出发,分析其可能对水文过程的影响,并在此基础上初步建立了定量化的水源涵养功能指标,研究了黄河源区水源涵养功能的变化。

本书的主要研究内容和结论如下。

1) 深入分析了黄河源区的气温、降水等气候要素的变化趋势、过程,建立了黄河源区的干湿气候分区。

气候变化已经成为全球性的环境问题,生态系统的演变不可避免地要受到气候变化的影响。在全面收集研究区域及周边气象站历年观测数据的基础上,采用气候倾向率、建立气候基线等方法对近 50 年来气候的变化趋势、变化过程进行了分析,重点采用 Mann-Kendall 突变检测方法研究了近 30 年来年尺度和月尺度的气温和降水的变化,并采用较合理的降水蒸散比方法完成了研究区域的干湿气候区划及其变化趋势的计算。研究结果表明,近 50 年来区域的气温除河南气象

站外均呈显著增加趋势，降水量多呈不显著的减少趋势。除个别站点外，年均气温、最高气温的气候倾向率和多年平均值呈沿 1959 ~ 1988 年、1969 ~ 1998 年、1979 ~ 2008 年持续递增的趋势，最低气温的平均值变化趋势也与此相同，表明研究区域的气温呈普遍快速上升的趋势；3 个时段降水量的变化规律较弱，1979 ~ 2008 年总体上呈减少趋势，位于研究区域东南部的主要产流区的降水量显著减少。1982 ~ 2006 年的年均气温在 20 世纪 90 年代中后期存在突变，变暖的趋势更加剧烈，而降水量变化较为平稳、连续。除贵德附近属干旱气候区外，基本上以泽库—玛沁一线为界，南部为半湿润地区，北部为半干旱地区，干湿分界线与 450mm 降水等值线大体一致，且存在干旱化的趋势。

2) 利用 GIMMS AVHRR NDVI 数据，对研究区域 1982 ~ 2006 年的植被覆盖情况进行了动态监测，采用相关分析方法分析了植被覆盖对气候变化的响应。

陆地生态系统与气候变化的关系是全球变化研究的重要内容和焦点之一。植被是陆地生态系统最重要的组成部分，而气候条件则是宏观尺度上植被分布和变化的直接驱动力。1982 ~ 2006 年的 NDVI 变化趋势表明，在研究区域东南部的半湿润地区，NDVI 值呈显著增加趋势，植被覆盖提高主要发生在 6 ~ 7 月和 9 月；其他区域以减少为主，明显减少的区域主要位于玛多县部分地区、兴海—共和沿线区域。植被与气候之间的关系主要采用相关检验和植被降水利用效率变化的方法进行分析。结果表明，在东南部半湿润地区，植被覆盖与气温呈显著正相关，气温的升高促进了植被覆盖的提高；NDVI 与气温呈显著负相关的区域主要集中在源头部分地区和共和、兴海沿龙羊峡水库一带；以干湿界线为分界，NDVI 与降水量的相关系数在半湿润和半干旱地区分别以负值和正值为主，显著正相关的区域主要位于玛多县城附近、研究区中部和西宁市附近。植被对降水和气温变化的响应具有近东南—西北方向空间分异的特点，西北部植被对降水量的敏感性更强，东南部对气温的敏感性更强。降水利用效率与 NDVI 的变化趋势可以判定区域是否存在生态系统退化或改善的状况，结果表明，玛多县部分区域，兴海县沿黄河干流到共和县地带，存在着植被退化；而研究区域东南部的植被覆盖多呈改善趋势。

3) 在筛选适宜于黄河源区的潜在蒸散发评估方法的基础上，计算了研究区域的潜在蒸散发变化趋势及其对几种气候因子的敏感性。

无论在何种空间尺度上，蒸散发都是水量平衡、水量转化的重要环节，同时

也关系到地表的能量平衡,是水循环中最直接受气候变化影响的一项。潜在蒸散发的计算方法多是针对特定气候设计的,具有较强的地域性。采用模型之间相互对比、与实测蒸发皿蒸发量对比的方法,评估了目前国内外广泛应用的14种方法在研究区域的适用性。FAO Penman-Monteith方法在数值和变化趋势方面,都与实测值吻合最好。研究区域的潜在蒸散发主要发生在生长季,并具有随海拔升高而减小的趋势;高海拔地区($\geq 3000\text{m}$)与低海拔地区($< 3000\text{m}$)的变化趋势也不尽相同,前者呈显著增加趋势,变化过程为先减少后增加,后者变化不明显或呈减小趋势,变化过程为先增加后减少。一年四季,日照时数的增加和相对湿度的降低将促进潜在蒸散发的增加,而气温和风速对潜在蒸散发的影响还依赖于其他气候要素的状况;生长季的潜在蒸散发主要受到日照时数、相对湿度和气温变化的影响;近50年来,研究区域潜在蒸散发对气温变化的敏感性显著增强,低海拔地区对相对湿度的敏感性还有所减弱。

4) 建立了区域尺度水源涵养功能的定量化表征指标,评估了近50年来黄河源区水源涵养功能的时空变化特征。

水源涵养功能是江河源区生态系统最重要的服务功能之一,其变化对整个流域的水资源、水环境都具有重要影响。黄河源区的水源涵养功能主要表现在拦蓄降水、调节径流、抑制蒸发等几个方面。以水源涵养量来表征水源涵养功能的“量”,以水源涵养能力来表征水源涵养功能的“质”,并分别采用水量平衡法和比值法来进行分析。结果表明,水源涵养量和水源涵养能力的空间分布呈从东南向西部递减的趋势;1959~2008年,东南部的水源涵养量呈减少趋势,其他地区则以增加趋势为主;东南部呈先增加后减少的趋势,而玛多等地则呈先减少后增加的趋势。玛多县、久治县、河南县等的水源涵养能力呈显著减弱趋势,其他地区的减弱趋势不显著。研究区域东南部是区域降水量最丰富的地区,也是黄河最主要的产流区,该区域水源涵养量和水源涵养能力的降低,可能是近年来黄河源区出水量减少的主要原因之一。

5) 通过实地采样、测试分析,发现高寒地区草甸退化对土壤水源涵养功能具有显著影响。

为定量研究草地退化对土壤水源涵养功能的影响,以土壤蓄水量法表征土壤水源涵养能力。2012年7月末、8月初在不同退化程度的高寒草甸境内共布设32个样地,采集植被样品和土壤样品,通过室内测试分析,计算高寒草甸地表

植被生物量特征和土壤水文物理性质，从而分析草地退化对土壤蓄水能力的影响。结果表明，随着高寒草甸退化程度的加剧，土壤物理性质发生明显变化，土壤容重逐渐增大，总孔隙度降低，土壤蓄水能力下降。中度退化草甸土壤蓄水能力比未退化草甸降低 9%~10%，而严重退化草地则下降 18%~28%。土壤水源涵养量与高寒草甸地上生物量显著相关，为探索利用遥感技术定量化评价不同退化程度草地的水源涵养能力提供了新的思路和参考依据。

本书是对黄河源区气候变化背景下植被响应与水源涵养功能研究的总结，包含了课题组主要研究人员杜加强、舒俭民、张桐、熊珊珊，以及徐翠等硕士研究生的辛勤工作和成果。感谢青海省环境科学研究设计院翟永洪院长、王建荣副院长、李忠主任在数次野外考察、采样时给予大力支持，帮助协调各州县，为我们顺利安全考察保驾护航；感谢青海省环境科学研究设计院拜得珍、巢世军、冯宏昭放下手头工作，全程陪同帮助进行野外采样；感谢青海省生态环境遥感监测中心田俊量主任、葛劲松副主任等在相关研究、考察中给予的帮助和指导。

由于时间和水平所限，本书还存在不少疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月

目 录

1	总论	1
1.1	研究背景与研究意义	1
1.2	国内外研究进展	1
1.2.1	水源涵养功能及其计量方法	1
1.2.2	植被与气候变化	3
1.2.3	水源涵养与气候变化	6
1.3	主要研究内容	7
2	区域概况	8
2.1	自然条件	8
2.1.1	地理位置	8
2.1.2	地质地貌	9
2.1.3	河流水系	10
2.1.4	土壤类型	11
2.1.5	植被分布	12
2.1.6	气候概况	13
2.2	社会经济	14
2.2.1	行政区划	14
2.2.2	人口及民族	14
2.2.3	经济发展	14
2.2.4	土地利用	15
3	气候、植被与径流变化特征	16
3.1	气候变化趋势及特征	16
3.1.1	空间分布特征	16
3.1.2	总体变化趋势	19
3.1.3	变化过程	21
3.1.4	近30年的变化趋势	28

3.1.5	干湿气候划分及其波动	53
3.2	植被变化趋势	56
3.2.1	NDVI 的空间分布	56
3.2.2	NDVI 变化趋势	58
3.2.3	NPP 变化趋势	65
3.3	径流变化	68
3.3.1	年际变化	69
3.3.2	径流年内分配特征	73
4	植被对气候变化的响应	77
4.1	年际变化规律	77
4.1.1	NDVI 与气温的相关性	77
4.1.2	NDVI 与降水量的相关性	78
4.1.3	NPP 与气温、降水量的相关性	79
4.2	月尺度变化规律	81
4.2.1	月 NDVI 与月气温的相关性	81
4.2.2	月 NDVI 与月降水量的相关性	88
4.3	降水利用效率变化与生态退化识别	96
4.3.1	研究方法	97
4.3.2	计算结果	98
4.3.3	成因探讨	102
4.3.4	小结	105
5	蒸散发模拟与分析	106
5.1	适宜方法比选	107
5.1.1	计算方法简介	107
5.1.2	评价方法	112
5.1.3	模拟结果	114
5.1.4	小结	148
5.2	潜在蒸散量变化过程分析	149
5.2.1	ET_0 年内变化	149
5.2.2	ET_0 年际变化	151
5.2.3	ET_0 空间分布及变化趋势	156

5.3	ET ₀ 的气候敏感性分析	158
5.3.1	研究方法	158
5.3.2	计算结果	158
6	水源涵养的时空变化	163
6.1	水源涵养的定量化表征	163
6.1.1	表征方法	163
6.1.2	数据处理	165
6.2	水源涵养的时空变化	165
6.2.1	空间分布	165
6.2.2	时空变化特征	170
6.3	植被退化对土壤蓄水能力的影响	175
6.3.1	研究方法	176
6.3.2	计算结果	181
6.3.3	成因探讨	186
7	问题与挑战	188
	参考文献	191
	附件一 FAO Penman-Monteith 计算方法	202
	附件二 ET ₀ 对气候要素的偏导数	206
	彩图	

1 总 论

1.1 研究背景与研究意义

黄河源区所在的青藏高原素有“中华水塔”和“生态源”之称，具有极其重要的战略地位。青海省民和水文站以上集水区是黄河流域最大的产流区和水源涵养区，青海省出境流量占黄河总径流量的 49.20%，占三江源区总径流量的 43.00%，对整个黄河流域、三江源区的水资源起着举足轻重的作用。但是，近年来黄河源区生态环境的退化影响了水源涵养功能的供给，引起了黄河上游流量明显减少，湖泊、水库水位持续偏低等问题。黄河源区水量的大小不仅对黄河中下游的环境保护起到关键作用，而且直接关系到黄河中下游经济社会的可持续发展。

气候变化已经对全球生态系统产生了明显的影响，青藏高原作为地球的第三极，气候变化具有一定的超前性，高原独特的自然环境条件使其生态系统极其敏感、脆弱，成为全球变化的敏感区域。因此，近年来有关青藏高原气候变化及其对生态系统影响的研究成为热点。已有研究表明，黄河源区的生态系统呈退化状态，由此造成的生态系统服务功能如何变化是需要进一步深入研究的内容，也是目前研究的薄弱环节。水源涵养功能是黄河源区最重要的生态系统服务功能之一，但其与气候变化、生态系统演变的研究相对较少。建立气候变化与生态系统水源涵养功能之间的响应关系，对于源区生态恢复、提高水源涵养能力、合理调控源区人类活动具有重要意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水源涵养功能及其计量方法

随着水资源紧缺问题的日益突出，有关水源涵养功能评估及其价值的研究大量出现。但是，水源涵养功能尚无公认的权威定义^[1]，不同的学者有不同的认识和理解，采用的计量方法也相差较大。广义的水源涵养功能包括拦蓄降水、调节径流、补充地下水、改善区域小气候、影响降水和净化水质等过程的综合表

现^[1,2]；狭义的水源涵养功能重在表征对河水流量增减的影响，即拦蓄降水、调节径流的作用^[1,3,4]。由于森林资源调查数据易于获取，加上林地的单位面积水源涵养能力一般高于其他生态系统，因此目前的研究主要针对森林生态系统拦蓄降水的量和由此带来的生态系统服务价值展开^[2,5,6]，形成了森林水文学、林业生态工程学等新兴学科。生态系统的水源涵养功能主要通过植被截留降水、枯落物持水、土壤贮水、植被覆盖抑制蒸发等过程实现，表现形式主要包括拦蓄降水、调节径流等。水源涵养能力主要与植被类型、盖度、枯落物组成和现存量、土层厚度及土壤物理性质等密切相关，是植被与土壤共同作用的结果；除此之外，还可能与降水量、社会经济等因素有关。水源涵养功能主要以“时空”的形式直接或间接影响河流的径流量，在时间上，它可以延长降水形成径流的时间，或者在枯水季节补充河流的水量，在洪水时减缓洪水的流量、延迟洪峰到来时间，起到调节河流水位的作用；在空间上，生态系统能够将降水或冰雪融化产生的地表径流转化为土壤径流和地下径流，或者通过蒸发蒸腾的方式将水分返回大气中，进行大范围的水分循环，对大气降水在陆地进行再分配^[3]。

人类对生态系统服务的利用正在快速增加，但约有 60% 的服务处于退化或不可持续利用的状态^[7]；科学地描述生态系统服务功能、建立标准的生态系统服务评估、度量方法，是将生态系统服务功能的认识转化为激励机制和制度的前提^[8,9]。有关水源涵养功能的定量化表达方法近年来逐渐得到重视，目前主要包括具有物理单位的水源涵养量（ m^3 ）、水源涵养能力（ mm ）和无量纲的水源涵养指数两大类。水源涵养量和水源涵养能力本质上是相同的，多数是理论上的生态系统最大截留、持水能力，计算方法主要包括分项计量后加和的综合蓄水能力（量）法^[3]、水量平衡法^[5,10]、冠层截留剩余量法^[2]、年径流量法^[3]和地下径流增长法^[1]等；水源涵养指数主要包括采用枯季径流与全年径流的比例^[4,11]、径流系数^[12,13]、综合评价指数^[14,15]等方法来构建，该方法往往是从相对比较的角度出发，物理意义不够明确，评价方法包括单因素评价法和多因子综合评价法等。其中，综合蓄水能力法和水量平衡法目前应用相对较多。

三江源区由于在气候变化、水源涵养功能等方面的典型性，成为广大学者研究的热点地区。王根绪等^[4,12]的研究显示，黄河源区的水源涵养能力持续下降，出源区径流趋于减少，洪水发生频率显著增加；土壤层是贮存水分的主要场所^[16]，而高寒草甸草地的植被覆盖度与土壤水分之间具有显著的相关关系^[17]，草地退化将造成土壤持水能力减弱。

尽管有关水源涵养功能的研究已经从定性的理论基础研究发展到目前的定量、多因素综合计量评价和价值评估研究，但由于对水源涵养功能内涵理解的不一致性以及计量方法之间的差异，使得不同研究之间的可比性不强。由此可知，

水源涵养功能是一个非常复杂的综合概念，也是一个动态发展的概念，在不同地区、不同时期可能具有不同的内涵和外延，需要根据具体情况实际分析。

近年来，国内外学者呼吁建立标准的生态系统服务评估、度量手段^[18,19]，但就目前理论和方法上的研究现状来看，水源涵养功能要做到量化、标准化，还需要在以下几点进行深入研究。

1) 逐步提高计算的准确度。上述计量方法多基于不同植被种类所具有的拦截、持留和贮存水分的能力，这些因素都可能随着植被生长状态不同而改变^[13]，因此，若对同一植被类型在覆盖度、长势等方面的差异不加区分，应用到较大空间尺度时产生的误差将不容忽略。

2) 加强水源涵养的动态变化研究。全球变化已经对生态系统演变产生了显著的影响，水源涵养功能作为生态系统重要的服务功能也必将随之发生变化。要系统研究水源涵养对全球气候变化、生态演变的响应，需要建立具备动态变化特性的指标和参数。

3) 进一步增强与地理信息系统 (GIS)、遥感 (RS) 技术的结合。遥感数据具有长时间序列、空间连续、数据具有面上特征等特点，对于反演历史数据，进行时空对比具有重要意义，是研究水源涵养功能较为理想的技术手段。

4) 与森林相比，草地生态系统水源涵养功能的理论、定量方法研究还较薄弱。草地生态系统在我国陆地生态系统中占有较大比例，许多重要的水源涵养区草地所占面积比例较大，如青藏高原。因此，研究草地生态系统的水源涵养功能具有重要的科学意义和应用价值。

1.2.2 植被与气候变化

植被是陆地生态系统最重要的组成部分，植被变化能够反映陆地生态系统的状况。陆地生态系统对全球变化的响应，特别是地表植被对气候变化的响应已经成为学术界关注的热点问题。地表植被变化主要是地球内部作用（土壤母质、土壤类型等）和外部作用（气温、降水、土地利用等）综合作用的结果^[20]。地球内部作用相对较为稳定，短期内一般不会发生较大变化，地表植被覆盖的变化主要受气候变化、人类活动等外部作用的影响。遥感数据以其覆盖范围广、时空连续性好等特点^[21]，成为绝大部分植被变化与气候变化关系研究的常用数据源。目前，用以表征植被生长状态的遥感指数主要包括代表植被覆盖状况的归一化植被指数 (NDVI)^[22,23]、叶面积指数 (LAI)^[24] 和代表植被生产力的净初级生产力 (NPP)^[25,26]、初级生产力 (GPP)^[27,28]、净生态系统生产力 (NEP)^[29] 两大类。其中，美国国家航空航天局 NASA 的全球调查模拟和制图研究项目 GIMMS 基于

先进型甚高分辨率辐射仪 AVHRR 的 NDVI 数据因具有时间跨度长、连续性好以及较高的精度和质量^[21,30]等优点,得到了广泛应用。研究方法以各种相关分析、线性回归为主,除此之外还包括偏差分析^[31]、定量递归与交叉递归^[32]、二维特征空间^[33]、分布式滞后模型^[22]、降水利用率^[23,34]、时间序列分析^[35]、正交分解法^[24]等方法。由于气象站数量的有限性,有些研究对气候数据进行空间插值,以此研究整个研究区域的植被对气候变化的响应^[23,31,33];有些研究则以气象站周边的植被指数与气候因子建立相关关系^[32,34,36]。采用缓冲区像元内的植被 NDVI 或 NPP 代表地表植被状况,优点是避免了空间插值带来的误差,缺点是数据量受到气象站点数量的限制,也无法得到区域气候和植被变化的宏观认识。植被生长是渐进的,对气候因子的响应可能存在滞后现象^[36],但不同的气候因子、植被类型、研究地点、研究时段、时间间隔得到的滞后时间不同,从几天到几年都有报道。研究时段起点一般为 AVHRR NDVI 数据可用的 1981 年或 1982 年,时间分辨率则从旬、半月、月、季度、生长季到年际都有相关研究^[20-36]。

Nemani 等^[25]采用 LAI、NDVI 等数据和光能利用率模型估算了 1982 ~ 1999 年全球的 NPP 变化,结果发现北半球的 NPP 变化以增加为主,降水对植被生产力的影响高于气温,三江源区 NPP 变化不显著。方精云等^[37]的研究发现,1982 ~ 1999 年,我国大多数地区的 NDVI 都呈现不同程度的增加趋势,温度上升和夏季降水量增加可能是主要的驱动因子;具体到黄河源区,则增加与减少趋势并存。杨元合和朴世龙^[38]采用 1982 ~ 1999 年的 AVHRR NDVI 数据研究了青藏高原草地植被覆盖的变化,结果表明,草地覆盖度显著增加,生长季提前和生长季生长加速是主要原因。朱文泉等^[39]基于改进的光能利用率 CASA 模型计算了我国 1982 ~ 1999 年的 NPP,结果表明气候变化是朝着有利于植被生长的方向发展,受温度制约的青藏高原地区增长趋势约为 1.46%/a。王军邦等^[40]采用 GLOPEM-CEVSA 模型(全球生产效率模型-生产系统过程模型)模拟了 1988 ~ 2004 年三江源区的 NPP 分布及变化,黄河源区 NPP 主要表现为降低趋势,气候的干暖化是原因之一。陶波等^[29]采用 CEVSA 模型计算了 1981 ~ 2000 年中国的 NEP 变化,结果显示青海省东部以减少趋势为主,黄河源区其他区域则变化不显著。徐兴奎等^[24]采用 LAI 表征植被覆盖,对 1982 ~ 2000 年青藏高原植被覆盖状况研究的结果表明,青藏高原地区植被覆盖率总体呈增加趋势,在气候变暖的背景下,湿润和干旱地区植被覆盖呈现两极变化趋势,高原南北部植被覆盖率的年变化基本上是反相位的;黄河源区所在的高原亚湿润大区和高原亚干旱大区的 LAI 以减少趋势为主,气温升高与降水的略有减少是其主要原因。孙睿等的研究发现,1982 ~ 1999 年黄河流域的植被覆盖度增加,但源区所在的青藏高原有所减少,汛期降水量是其主要影响因子^[41]。刘绿柳和肖冈劲^[42]采用 NDVI 年较差与气温、降水的关系

研究了黄河流域植被对气候变化的响应,结果显示不同区域、不同空间位置结果相差较大。

植被变化是在人类活动与气候变化的综合作用下发生的适应性改变,Wessels等^[43,44]提出采用NDVI的相对退化影响(relative degradation impacts, RDI)和采用NPP的局地NPP测量(local NPP scaling, LNS)方法来划定土地退化区域以及气候变化、人类活动对植被退化的贡献,Prince等^[45]采用以津巴布韦为例对LNS方法进行了检验,结果表明基于LNS绘制的退化图与已知退化区域一致。耶鲁大学的Evans和Geerken^[46]提出了一种利用NDVI和降水量数据,通过建立两者之间的关系来定量区分气候和人类活动导致的干旱区植被生产力的降低。Wessels等^[23]将此方法称为剩余量法(residual trends, RESTREND),并以南非为例对该方法进行了验证,结论认为在结合当地的调查研究之后,RESTREND方法可以识别区域尺度植被生长存在潜在问题的地块。Prince等^[47]在西非Sahel地区应用降水利用效率证明1982~1990年,该地区不存在大范围、大规模的植被退化;而Wessel等^[23]的研究发现,降水利用效率与降水具有较强的负相关性,作为退化的指标并不十分可靠。

由此可知,国内外对植被与气候变化的关系开展了大量的研究,但仍然存在一些问题,主要如下。

1) 不同的研究结论不尽相同,有的甚至相互矛盾^[21,42,48]。究其原因,主要有以下几点:①研究时段、研究指标上的差异,不同时段、不同指标的植被变化、气候变化可能不同;②是否区分了不同植被类型对气候变化的响应;③研究时间尺度上的差异,在不同的时间分辨率上植被对气候响应的程度可能不同;④是否考虑了影响的滞后效应以及滞后时段的长度。

2) NDVI年均值取值的差异,也是研究结论不同的原因之一。在10天及以下时间尺度上,国内外学者一般采用通用的最大化处理方法(maximum value composites, MVC)合成NDVI值,以代表各自时间尺度的植被覆盖状况,并进一步消除数据中残留云、大气和太阳高度等因素的影响;在月尺度上,除少数研究者采用三旬平均值外^[22,49],大多数学者均采用月MVC方法;而在年尺度上,不同学者采用的方法差异性较大,有些学者采用年最大化NDVI代表年植被覆盖状况^[36,41,46],有的研究则采用生长季平均^[21,34,38],还有的采用生长季之和^[23,31,43-45]。NDVI是研究中使用最为广泛的遥感产品,取值方式的差异必然影响到研究结果。生长季平均与生长季之和本质上是相同的,对于趋势分析和与气候因子的相关分析几乎没有影响。

3) 大多没有扣除人类活动对植被生长的影响。植被生长变化是对气候、人类活动、自然灾害、病虫害等外部环境改变的综合响应,没有考虑这些因素的影

响,可能会对植被与气候变化关系的研究结果产生影响。尽管一般认为在大尺度上气候要素是陆地植被变化的最主要驱动力,但随着中高分辨率遥感卫星产品的应用[如 MODIS (中分辨率成像光谱仪)],除气候之外因素的影响将更清晰、明显地反映在遥感影像上,对气候与植被相关关系研究结果的干扰可能更强烈。结合研究区域人类活动、自然灾害等历史资料分析气候变化与植被响应的关系,可能是提高分析的准确度,得出更客观、更有实际意义的研究结论的手段之一。

4) 综合气候因子的应用相对较少。气候本身是一个复杂系统,需要多个指标共同进行表征。气温和降水量是植被与气候变化研究中最常用的气候指标,但这两个指标是不是能够全面地代替整个气候条件尚需要进一步的科学论证。同时,气温、降水量等气候因子之间对植被的影响可能存在着相互作用,需要统筹考虑。采用湿润度、干燥度、蒸散发等综合了气温、降水、相对湿度等气候因素的指标,无疑是解决上述难点的方法之一。

1.2.3 水源涵养与气候变化

由于水源涵养的内涵尚无公认的定义、表征指标尚不明确,直接就水源涵养与气候变化开展的研究报道非常少。目前,国内外学者在该研究领域较为明确的研究内容包括径流对气候变化的响应、径流与土地覆盖的关系等。这些研究多是基于多年径流、气候资料来研究两者之间的关系,部分研究考虑了人类活动的影响,研究方法则包括回归分析、模型模拟等。Mahé 和 Pature^[50]在非洲 Sahelian 地区的研究发现,气候变化和人类活动联合作用导致的土地覆盖,是区域河流径流系数增加的主要原因,人类活动的影响大于气候影响。Gardner^[51]采用简单的数学微分方程来描述径流量与年均降水、气温的关系,并将该函数与文献中的模型模拟进行对比,结果显示,采用简单函数关系的模拟结果也较好,作者因此认为采用简单的数学方程可能也能达到复杂模型所取得的效果。Lørup 等^[52]采用水文模型 NAM 和统计检验方法来识别气候变化和土地利用变化的水文效应,结果表明,津巴布韦的 6 个研究流域的径流量均呈减少趋势,而人口和农业强度最大的公共土地所在的流域减少量最大,表明人类活动对径流量的影响不容忽视。Jones 等^[53]采用 SIMHYD、AWBM 和 Zhang01 3 种水文模型来研究年均径流量对年均降水、潜在蒸散发的敏感性,结果表明,对年均降水的敏感性是年均潜在蒸散发的 3~5 倍,说明降水量对径流量的影响要大于潜在蒸散发。Labat 等^[54]采用小波分析的方法对全球 221 条较大河流的月尺度径流量变化进行了多尺度分析,并与全球气温变化进行统计相关检验,结果表明,全球径流量与气温呈正相关关系,气温每增加 1℃,径流量将增加 3.8%。