

康悦, 李振朝, 田辉, 等. 2011. 黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 505-512. Kang Yue, Li Zhengchao, Tian Hui, et al. 2011. Trend of vegetation evaluation and its responses to climate change over the source region of the Yellow River [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 505-512.

黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究

康悦 李振朝 田辉 刘蓉 史小康 张静辉 文军

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

摘要 利用1982~2001年NOAA/AVHRR(美国大气海洋局卫星/甚高分辨率辐射计)NDVI(归一化植被指数)资料、2000~2008年EOS/MODIS(地球观测系统卫星/中等分辨率成像光谱仪)NDVI资料以及1982~2008年黄河源区的玛多、玛曲和兴海气象台站逐月气温和降水资料,分析了黄河源区玛多、玛曲和兴海地区卫星遥感植被指数的时空变化特征,探讨了全球变化背景下黄河源区植被对气候变化的响应过程。结果表明:黄河源区植被在时间和空间尺度上都呈现退化趋势。1982~1990年黄河源区植被退化主要发生黄河源区鄂陵湖以东区域;1991~2000年植被退化范围进一步扩大到源区北部兴海共和地区以及若尔盖草原;2000~2008年植被退化范围扩大至黄河上游主要水源涵养区的玛曲草原,但源区北部的兴海和共和地区却出现了植被增加的趋势。黄河源区植被对气候变化响应关系为:黄河源区水源涵养区植被对气温的响应最为敏感,气温低于0.0℃时,植被指数对气温的变化没有响应,当月平均气温大于5.0℃时,植被指数随气温的升高呈指数关系增长。局地降水对植被的影响非常复杂,在生长初期(4~6月)影响很大,但随着植被生长丰茂,植被指数达到高值而趋于饱和时,对局地降水的响应就会很小。

关键词 黄河源区 植被指数 气温 降水

文章编号 1006-9585(2011)04-0505-08 **中图分类号** P407.8 **文献标识码** A

Trend of Vegetation Evaluation and Its Responses to Climate Change over the Source Region of the Yellow River

KANG Yue, LI Zhengchao, TIAN Hui, LIU Rong, SHI Xiaokang, ZHANG Jinghui, and WEN Jun

Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract The characteristics of vegetation and its response to climate change were explored using NOAA/AVHRR (NOAA/Advanced Very High Resolution Radiometer) (1982-2001) and EOS/MODIS (Earth Observation System/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (2000-2008) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) products, monthly air temperature and precipitation of Maqu, Madoi, and Xinghai meteorology stations over the source region of the Yellow River. The results showed: The vegetation of Madoi region generally revealed a decreasing trend in the time and space scale; the vegetation of Maqu region, which is the source region of the up-

收稿日期 2009-12-08 收到, 2011-05-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40775022, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-328

作者简介 康悦, 女, 1964年出生, 实验师, 主要从事陆面过程观测试验研究。E-mail: ykang@lzb.ac.cn

stream Yellow River, revealed an increasing trend before 2000 and appeared to degenerate after that; The vegetation revealed a decreasing (increasing) trend before (after) 2000 in the north of the source region of the up-stream Yellow River. The NDVI appeared to decrease during 1982 - 1990 in the spatial scale, this occurred in the east region of the Ngoring Lake. The areas with decreasing trend of vegetation further enlarged during 1991 - 2000. During 2000 - 2008, an evident degeneration occurred in Maqu area, while the vegetation of Xinghai region generally increased. The responding relationship of the vegetation to climate change implied: The air temperature was the most sensitive factor to vegetation variation in the source region of the Yellow River, an exponential relationship existed between them, the NDVI had a little variation when the air temperature was lower than $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the NDVI increased fast with the air temperature when the air temperature was greater than $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Local precipitation had great contribution to the early growing of the vegetation, when the vegetation saturated and the NDVI reached maximum, local precipitation was not sensitive to vegetation variation anymore.

Key words source region of the Yellow River, NDVI, air temperature, precipitation

1 引言

在全球气候变化和人类活动影响下,黄河上游水源涵养区草地出现了严重退化,生态环境出现急剧恶化的现象,其高寒生态系统正在发生一系列的变化,特别是黄河源头鄂陵湖和扎陵湖的出水口多次出现断流现象更是引起社会各界的关注(万力等,2003;杨建平等,2005)。黄河源区生态系统的变化最直观地反映了湿地退化以及植被覆盖面积不同程度的缩小。更深层次上,它不仅削弱了黄河源区天然生态的屏障作用,还降低了黄河源区的水源涵养和产流能力,黄河上游地表径流产流能力持续减弱,使得黄河上游径流呈现持续减小的趋势(韦志刚等,2003;蓝永超等,2007)。

目前,有关黄河源区生态环境演变过程及气候响应的研究已经得到了广泛重视(张懿锂等,2007)。由于黄河源区地域辽阔,给野外试验直接获取数据带来了很大困难,地面观测点的空间代表性也有限。因此,利用人力开展区域面上陆面参数的调查有着相当的难度,而利用卫星遥感技术结合地面观测开展区域面上的研究能够弥补这些不足,特别是卫星遥感资料具有覆盖面积大、实时性和动态性强等优点而得到广泛的应用,使其在陆面参数动态过程监测有很大的应用潜力(刘蓉等,2007)。

最近十年来,国内许多学者利用卫星遥感观测资料得到的植被指数对黄河源区植被变化机理进行了探索性的研究(孙睿等,2001;摆万奇等,

2002;柳媛普等,2007;张帅等,2008)。由卫星遥感得到的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)估算的植被覆盖面积在一定程度上能反映陆地植被覆盖的变化,在全球变化研究中充当“指示器”的作用(马明国等,2006),然而对该地区植被的时空分布及其演变特征和植被对局地气候变化的响应等方面的研究还不够深入。而由卫星遥感获取的 NDVI 是反映陆地植被状况的一个有效参数,能较好地反映植被生长变化情况,是国际上比较通用的一种植被动态监测指数(文军和王介民,1997)。为此,本文主要利用美国大气海洋局卫星/甚高分辨率辐射计(NOAA/Advanced Very High Resolution Radiometer, NOAA/AVHRR)和地球观测系统卫星/中等分辨率成像光谱仪(Earth Observation System/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, EOS/MODIS)的 NDVI 产品对黄河源区植被的时间和空间变化特征进行全面分析,并对探讨其气候响应过程,以期对黄河源区植被的时间和空间变化特征及其局地气候变化响应有一个全面的认识。

2 研究区地理环境特征

黄河源区泛指黄河上游唐乃亥水文站以上地区,面积为 121972 km^2 ,仅占全流域面积的 15.3% ,但多年平均径流量却占全流域的 32% 。由于吉迈—玛曲区间面积仅占黄河源区总面积的 34% ,产流量却占 54% ,所以许多研究者把黄河源区定位在包括四川若尔盖和甘肃玛曲在内的唐乃亥

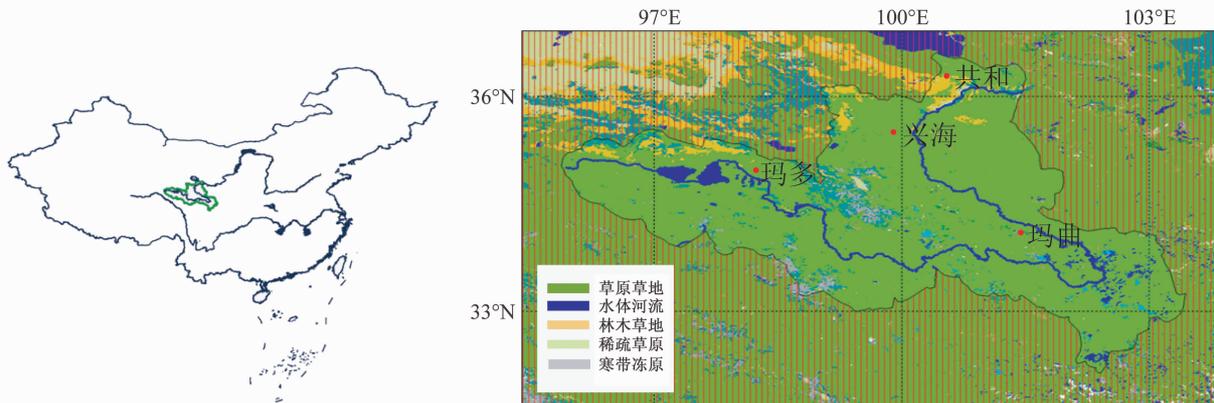


图 1 研究区域地理位置 (左) 和植被分类分布 (右)

Fig. 1 The geographic location (left) and vegetation classification (right) of the study area

以上地区 (蓝永超等, 2006)。黄河源区属于大陆性高原气候, 地貌以草原草甸为主, 生态环境比较复杂, 东南部属湿润气候带, 中部属半干旱气候区, 西北部属干旱气候区。考虑到以上论述, 本研究区域的植被分类和地理位置见图 1 所示。

为了揭示黄河源区地表植被的时间变化规律及其对气候变化的响应过程, 本研究选取有空间代表性且有气象观测资料的玛多、玛曲和兴海地区的植被指数和气象观测资料进行分析。玛多县位于黄河源区西部的源头地区, 地理位置为 (34°00'N~35°40'N, 96°50'E~99°20'E), 海拔高度在 4200 m 以上, 属高原山地草原, 地势相对平坦, 间有平地、沙漠和沼泽等地貌, 境内分布有 4000 多个大小不等的湖泊, 我国最大高原淡水湖泊鄂陵湖和扎陵湖在其境内。黄河源区东部的玛曲地区地理位置为 (33°06'N~34°33'N, 100°45'E~102°29'E), 平均海拔 3300~4806 m, 是黄河上游主要的水源涵养区和黄河上游径流主要补给区, 研究该地区植被的时空变化对认识和揭示黄河源区水资源的变化有重要意义。兴海地区位于黄河源区北部, 位于 (34°48'N~36°14'N, 99°01'E~100°20'E), 平均海拔 4300 m, 境内地貌类型多样, 其中以山地草原为主, 气候具有显著的高原大陆性气候特征。

3 资料介绍及分析方法

本研究使用归一化的植被指数 (NDVI) 表征陆地表面植被的发育或长势情况, 定义为卫星遥

感观测近红外波段和可见光红波段地表反射率之差与这两个波段地面反射率之和的比值。对黄河源区 1982~2000 年的植被变化分析采用 NOAA/AVHRR 的近 20 年植被指数产品, 空间分辨率为 8 km, 时间分辨率为月, 时间跨度为 1982 年 1 月至 2000 年 7 月。对 2000 年以后黄河源区植被变化分析, 采用 EOS/MODIS 的植被指数产品, 其空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为旬。为了使两套资料有一致性和可比性, 将 EOS/MODIS 的植被指数产品重采样为空间分辨率为 8 km 的数据, 取每月 3 旬中的最大值, 使其时间分辨率为月, 与 NOAA/AVHRR 的植被指数产品一致, 时间跨度为 2000 年 2 月至 2008 年 11 月。

4~10 月为黄河源区植物的生长季节 (杨建平等, 2005), 牧草春季返青期最早的是海北地区 (4 月 16 日), 最晚的曲麻莱地区 (5 月 11 日)。秋季黄枯最早的是河南地区 (9 月 5 日), 最晚的海北地区 (10 月 1 日) (祁如英等, 2008)。基于这个原因, 为了消除地域和积雪覆盖等对植被指数的影响, 本研究仅选取每年 6、7、8 月的植被指数进行地表植被变化分析。

本文分析 NDVI 时间序列变化趋势时, 对每个像元点的 NDVI 值求时间导数, 得到该像元所代表区域的植被指数变化趋势, 即斜率 (K)。如果 $K > 0$, 表明该像元区域植被呈现增长趋势; 当 $K < 0$, 表明该像元区域植被呈现出退化趋势。如果得到每个像元点的变化趋势, 则进一步可以得到黄河源区植被变化的空间分布。

本文拟用 EOS/MODIS 植被指数分析 2000~

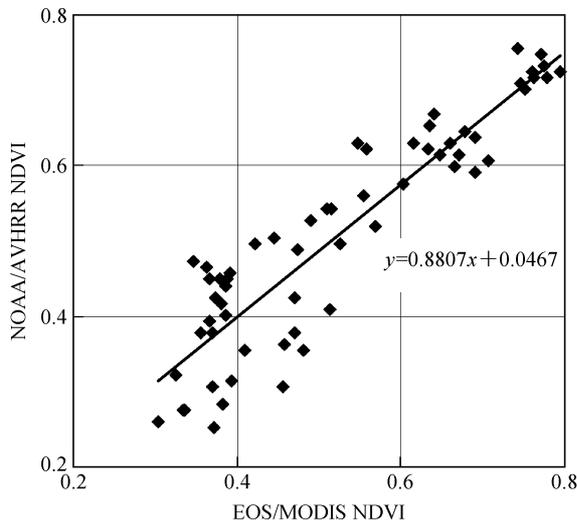


图2 EOS/MODIS NDVI 和 NOAA/AVHRR NDVI 对比分析
Fig. 2 Inter-comparison between NDVI products of EOS/MODIS and NOAA/AVHRR

2008年黄河源区的植被变化特征。但为了保证EOS/MODIS与NOAA/AVHRR两种资料的一致性,有必要对两种数据产品进行对比分析。为此,选取2000年2月至2001年7月间既有EOS/MODIS又有NOAA/AVHRR观测获得的植被指数资料进行对比分析(见图2)。结果表明:两种数据产品的一致性较好,相关系数高达0.91,两者数值平均相差仅为0.0815(EOS/MODIS NDVI略大于NOAA/AVHRR NDVI),两种资料能够基本一致地反映区域和时空尺度上植被的变化过程。为了使两种数据产品在同一地貌条件下对表征植被有可比性,在下面的分析统计中,利用图2中的统计关系式,将EOS/MODIS NDVI(或NOAA/AVHRR NDVI)作为已知量,则估算的NDVI相当于对NOAA/AVHRR NDVI(或EOS/MODIS NDVI)进行了订正的数值,这两种数据在相同植被条件有相当的数值,具有可比性。

为了研究黄河源区植被变化对气候变化的响应,本研究还选取了中国国家气象台站网在黄河源区的玛多、玛曲和兴海气象站1982~2008年的逐月气温、降水观测资料。

4 黄河源区的植被时空变化特征

黄河源区植被的演变过程主要体现在时间和空间尺度的变化,以下将选取1982~2000年的NOAA/AVHRR NDVI以及2000~2008年的

EOS/MODIS NDVI资料分别进行植被指数的时间和空间变化趋势分析。

4.1 1982~2008年间植被指数的时间变化趋势

图3为黄河源区的玛多地区、玛曲地区、兴海地区和整个源区的地表植被的时间变化序列。从图3可以看出,近二十几年,在黄河源区西部的黄河源头玛多地区(图3a)、东部的水源涵养玛曲地区(图3b)和整个黄河源区(图3d),植被在20世纪90年代中期以前呈现增加的趋势,90年代中期以后,植被呈退化趋势。在源区北部兴海等地区(图3c),在2000年以前,地表植被的演变过程基本保持稳定,只是近年来才呈现出略有增加的趋势。对黄河源区整体而言,1995年以前植被呈现出增加的趋势,1995年以后整体呈退化趋势。

4.2 1982~2008年间植被空间变化趋势

根据第3节有关植被变化趋势分析或植被是否退化的定义,分别统计出黄河源区1982~1990年、1990~2000年和2000~2008年植被指数的演变的空间分布图,见图4所示。

由图4可以得出:黄河源区植被在空间上呈现出逐步退化的趋势,1982~1990年NDVI减小的区域主要在黄河源区鄂陵湖以东地区,NDVI减小区域占玛多地区总面积的67%;1991~2000年源区植被退化的趋势进一步扩大,源区北部兴海和共和地区NDVI减小的区域由1982~1990年的15%迅速递增至1990~2000年的88%;2000~2008年黄河源区的玛曲草原也出现植被退化,玛曲地区NDVI指数减小的区域由1990~2000年的11%增至2000~2008年的52%以上,除源区北部的兴海和共和地区出现了植被增加的趋势,其他区域NDVI都在不同程度的减小。源区北部兴海和共和地区在1990~2000年NDVI减小的区域为88%,而2000~2008年只有55%。

5 黄河源区植被对气温和降水变化的响应

陆地植被的发育生长过程受多种自然和人为因素的共同影响,其中气候变化是最主要的因素之一。为了分析黄河源区植被对气候变化的响应,本研究将选取黄河源区3个气象台站的气候观测

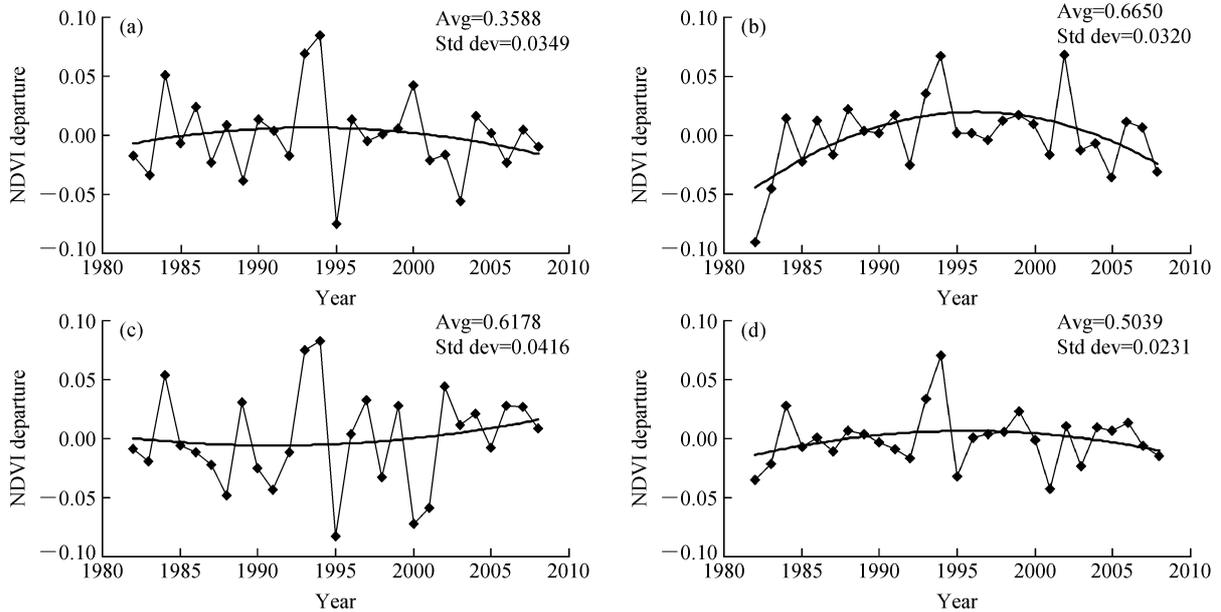


图3 1982~2008年黄河源区6~8月平均的NDVI距平的时间变化序列：(a) 玛多地区；(b) 玛曲地区；(c) 兴海地区；(d) 黄河源区

Fig. 3 The temporal trend of vegetation index over the source region of the Yellow River during 1982-2008: (a) Madoi; (b) Maqu; (c) Xinghai; (d) the entire source region

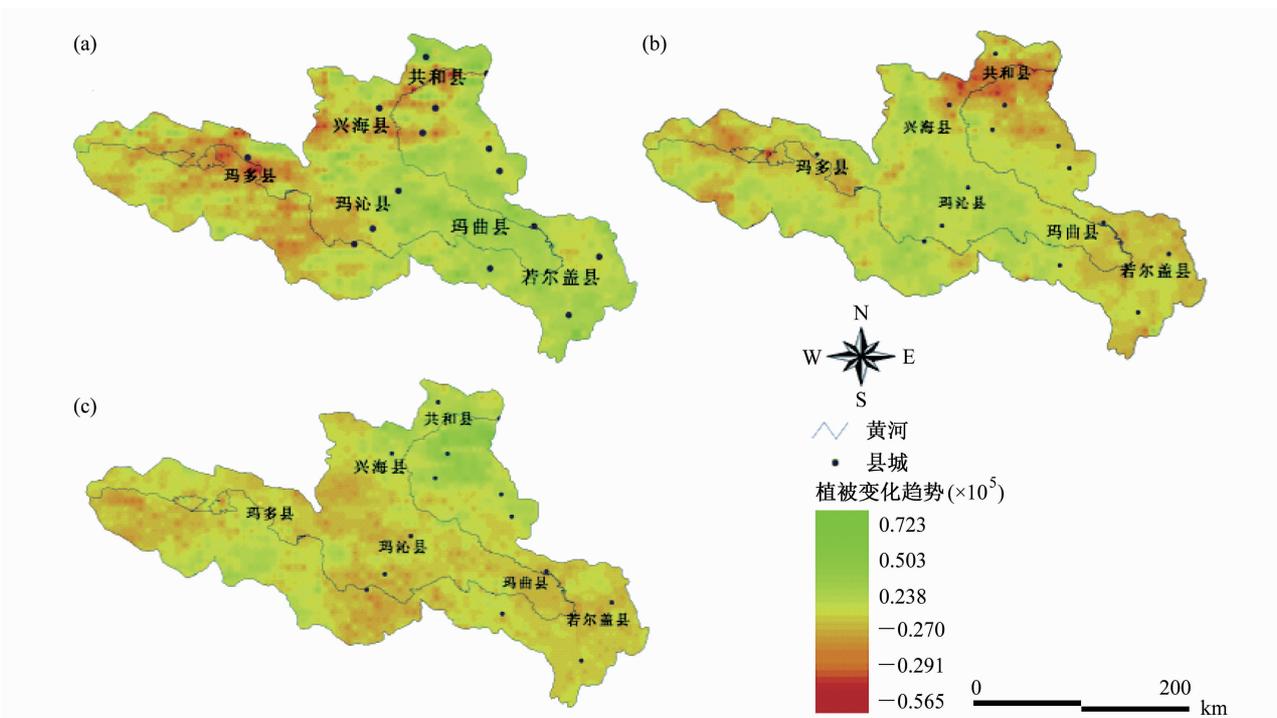


图4 黄河源区植被指数的空间变化趋势分布：(a) 1982~1989年；(b) 1990~1999年；(c) 2000~2008年

Fig. 4 The regional distribution of vegetation index trend over the source region of the Yellow River: (a) 1982-1989; (b) 1990-1999; (c) 2000-2008

资料和植被指数, 分别就植被指数对局地气温和降水的响应过程进行分析。

5.1 温度与 NDVI 的相关分析

在局地降水、太阳辐射和土壤质地等条件相同时, 植被的生长发育主要受热量即空气温度的控制。为此, 本研究将分别提取黄河源区玛多、玛曲和兴海 1982~2008 年气温月平均值, 以气象站为中选点选取 3×3 像元点求植被指数区域平均值以使 NDVI 与气象资料与之有较好的匹配, 分析空气温度与 NDVI 的相关性, 建立 NDVI 与温度的响应关系如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 黄河源区气温对植被有较为明显的影响, 植被指数与气温的变化呈指数关系。当平均气温较低时, 植被指数随温度的增加较为缓慢, 说明低温环境不利于植被生长。同时也说明气温低于 $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 土壤层还可能冻结, 不利于植被的生长。而当平均气温升高时并在 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时, 土壤层开始解冻, NDVI 随温度的升高呈指数关系增长, 这主要是当平均温度高于 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 植被开始发育, 使得 NDVI 快速增加。另

一方面, 除热量对植被的影响外, 在该地区气温较低时, 月降水量也少, 而在雨季时气温较相对较高, 有利于植被的生长发育。

5.2 降水与 NDVI 相关分析

降水是植被生长发育最主要的主导因素之一, 王小平等 (2007) 对玛曲气候变化对植被的影响进行了研究, 但对整个黄河源区的情况还缺乏全面的认识。为了探索黄河源区植被对降水的响应过程, 本研究分别提取玛多、玛曲和兴海 1982~2008 年月 NDVI 值和相对应降水月平均值, 建立 NDVI 对局地降水的响应关系如图 6 所示。

从图中可以看出, 受多种气象和地域因素的制约, 黄河源区不同区域植被指数和局地降水变化的关系比较复杂, 但整体趋势仍然是植被指数随降水的增加而增大, 特别是在黄河源区的玛曲和兴海地区, 这种趋势更明显。在黄河源头的玛多地区这种关系差一些, 主要是源头地区降水较小, 植被的动态范围也小的缘故。同时, 降水和植被生长不在同一个时间尺度上, 即先有前期降水, 然后有植被生长发育, 也是一个重要原因;

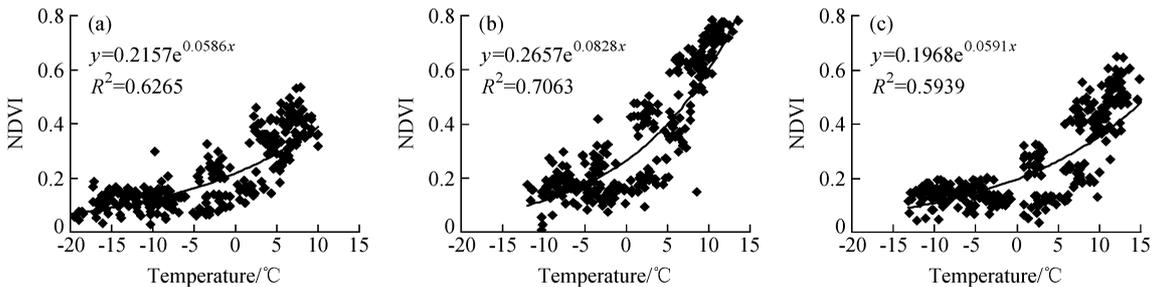


图 5 黄河源区地表植被与气温的相关关系: (a) 玛多; (b) 玛曲; (c) 兴海

Fig. 5 The relationship between vegetation index and air temperature at the three sites in the source region of the Yellow River: (a) Madoi; (b) Maqu; (c) Xinghai

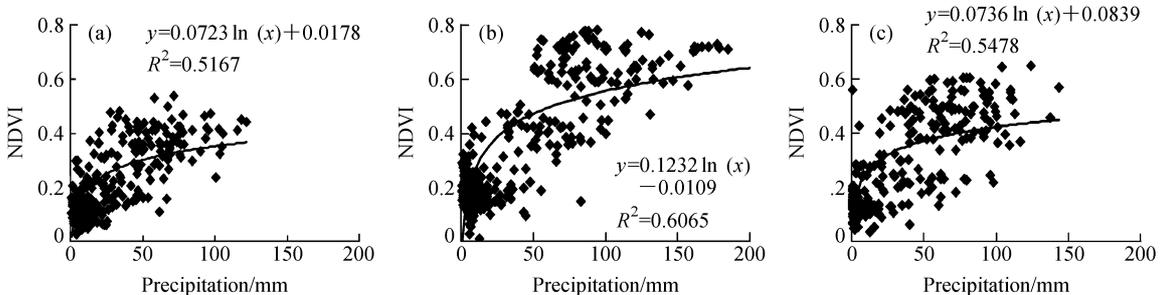


图 6 黄河源区地表植被与降水的相关关系: (a) 玛多; (b) 玛曲; (c) 兴海

Fig. 6 The relationship between vegetation index and precipitation at the three sites in the source region of the Yellow River: (a) Madoi; (b) Maqu; (c) Xinghai

而黄河源区降水的空间一致性较差, 而草原植被的空间均匀性较好也是一个重要原因。

本研究中对植被指数和降水采用对数关系拟合, 结果并不理想, 但任何拟合都应该有一定的物理意义, 影响植被生长发育的因素很多, 如局地降水、空气温度、日照和土壤质地等, 但如果其它条件一定, 当局地降水逐渐增加时, 开始时植被指数会增加很快, 但当达到一定数值后, 植被指数不再增加, 趋于饱和状态, 二者的变化是呈对数关系。因此, 我们认为局地降水与 NDVI 的关系还是应该用对数关系拟合, 同时这也说明了该地区制约植被生长发育或指数变化的很复杂。

6 总结与讨论

本文通过分析近 30 年来黄河源区 EOS/MODIS NDVI 和 NOAA/AVHRR NDVI 及其与局地气温和降水的关系, 得出以下结论:

(1) 在时间尺度上, 近 30 年来, 整个黄河源区植被在 1995 年前呈现出增加的趋势, 而 1995 年以后呈现退化的趋势; 有些地区 2000 年前波动变化, 但变化趋势平稳, 而 2000 年后呈现增加趋势。如玛多和玛曲地区在 1995 年前后呈现出先增加后退化的趋势, 而兴海地区 2000 年前变化不大, 但 2000 以后呈现出弱的增加趋势。

(2) 在空间尺度上, 黄河源头地区植被呈现退化趋势, 作为黄河源区主要水源涵养区的玛曲和若尔盖地区在 1990 年后植被出现退化, 而兴海地区 2000 年后植被有增加的趋势。

(3) 黄河源区植被生长发育对局地气温和降水呈现出正的响应过程, 气温低于 $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 土壤层冻结, 不利于植被的生长。而当平均气温在高于 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 土壤层开始解冻, 植被指数随温度的升高呈指数关系增长, 植被开始发育, 使得植被指数快速增加。黄河源区不同区域植被指数和降水的关系比较复杂。其中, 植被的动态范围、降水的空间非均匀性以及植被和降水不在同一时间尺度上等方面是这种关系的主要因素。

由于近年来黄河源区植被生长状况出现急速退化, 使得黄河源区植被和生态环境的恢复建设凸显必要, 以上研究结果对黄河源区生态环境和植被的恢复建设有一定的参考或借鉴意义, 并且

在当前全球变化和气候变暖和降水不变或略有增加的背景下, 这将有利于黄河源区植被和生态环境的自然恢复与保护建设。但由于围栏放牧、牲畜超载和草原鼠害等方面的影响, 将会严重制约草原植被的自然恢复(赵彩霞和郑大玮, 2004; 王静等, 2006)。本文研究结果建议, 在减轻过度放牧、取消或不提倡围栏放牧和抑制草原鼠害等方面加大投入, 使黄河源区朝着有利于生态环境自然恢复的方向发展。

参考文献 (References)

- 摆万奇, 张懿锂, 谢高地, 等. 2002. 黄河源区玛多县草地退化成因分析 [J]. 应用生态学报, 13 (7): 823 - 826. Bai Wanqi, Zhang Yili, Xie Gaodi, et al. 2002. Analysis of formation causes of grassland degradation in Maduo County in the source region of Yellow River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 13 (7): 823 - 826.
- 蓝永超, 沈永平, 李州英, 等. 2006. 气候变化对黄河源区水资源系统的影响 [J]. 干旱区资源与环境. 20 (6): 57 - 62. Lan Yongchao, Shen Yongping, Li Zhouying, et al. 2006. Influences of globe-warming on water resources system in the river head area of the Yellow River [J]. Journal of Arid Land Resource and Environment (in Chinese), 20 (6): 57 - 62.
- 蓝永超, 林纾, 文军, 等. 2007. 黄河上游丰、枯水年汛期及前期的环流特征分析 [J]. 高原气象, 26 (5): 1052 - 1058. Lan Yongchao, Lin Shu, Wen Jun, et al. 2007. Studies on atmospheric circulation anomaly of flood period and prefreshet period in the highest and the lowest flow years in the upper reach of Yellow River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (5): 1052 - 1058.
- 刘蓉, 文军, 张堂堂, 等. 2007. 利用 MERIS 和 AATSR 资料估算黄土高原源区植被含水量时空变化 [J]. 遥感技术与应用, 22 (3): 381 - 371. Liu Rong, Wen Jun, Zhang Tangtang, et al. 2007. Vegetation water content retrieved using MERIS and AATSR data over the Loess Plateau field experiment 2005 [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 22 (3): 381 - 371.
- 柳媛普, 吕世华, 李锁锁. 2007. 近几十年黄河源区气候与植被变化及相关分析 [J]. 高原气象, 26 (5): 1045 - 1051. Liu Yuanpu, Lü Shihua, Li Suosuo, et al. 2007. Changes and relation analyses of climate and vegetation in the source region of Yellow River in recent several decade years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (5): 1045 - 1051.
- 马明国, 王建, 王雪梅. 2006. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展 [J]. 遥感学报. Ma Mingguo, Wang Jian, Wang Xuemei. 2006. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing

- [J]. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 10 (3): 421 - 437.
- 祁如英, 张成昭, 郭卫东. 2008. 青海省天然牧草物候期变化特征分析 [J]. *青海气象*, 9 (4): 16 - 21. Qi Ruying, Zhang Chenzhao, Guo Weidong. 2008. Analysis on the bioclimatological characteristics of Qinghai pastures [J]. *Journal of Qinghai Meteorology* (in Chinese), 9 (4): 16 - 21.
- 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 2001. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系 [J]. *地理学报*, 56 (6): 776 - 783. Sun Rui, Liu Changming, Zhu Qijian. 2001. Relationship between the fractional vegetation cover change and rainfall in the Yellow River basin [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 56 (6): 776 - 783.
- 万力, 曹文炳, 周训, 等. 2003. 黄河源区水环境变化及黄河出现冬季断流的原因 [J]. *地质通报*, 22 (7): 521 - 526. Wan Li, Cao Wenbing, Zhou Xun, et al. 2003. Changes of the water environment in the headwater area of the Yellow River and the cause for the zero flow of the river occurring in winter [J]. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 22 (7): 521 - 526.
- 王静, 尉元明, 孙旭映. 2006. 过牧对草地生态系统服务价值的影响——以甘肃省玛曲县为例 [J]. *自然资源学报*, 21 (1): 109 - 117. Wang Jing, Wei Yuanming, Sun Xuying. 2006. Effects of excessive grazing on grassland eco-system services valuation [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 21 (1): 109 - 117.
- 王小平, 郭妮, 杨嘉. 2007. 黄河上游玛曲县气候变化对植被的影响研究 [J]. *西北植物学报*, 27 (4): 776 - 783. Wang Xiaoping, Guo Ni, Yang Jia. 2007. Impact of the climate on the vegetation in Maqu county in the upper reaches of Yellow River [J]. *Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica* (in Chinese), 27 (4): 776 - 783.
- 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 2003. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化 [J]. *大气科学*, 27 (2): 157 - 170. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. 2003. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (2): 157 - 170.
- 文军, 王介民. 1997. 一种由卫星遥感资料获得的修正的土壤调整植被指数 [J]. *气候与环境研究*, 2 (3): 302 - 308. Wen Jun, Wang Jiemin. 1997. A modified soil-adjusted vegetation index obtained from satellite remote sensing data [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2 (3): 302 - 308.
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 2005. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录 [J]. *地理学报*, 60 (3): 467 - 478. Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng. 2005. NDVI reflection of alpine vegetation in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 60 (3): 467 - 478.
- 张帅, 邵全琴, 刘纪远. 2008. 黄河源区玛多县草地覆被变化分析 [J]. *资源科学*, 30 (10): 1547 - 1554. Zhang Shuai, Shao Quanqing, Liu Jiuyan. 2008. Grassland cover change near the source of the Yellow River: Case study of Madoi county [J]. *Resource Science* (in Chinese), 30 (10): 1547 - 1554.
- 张懿铨, 丁明军, 张玮, 等. 2007. 三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景 [J]. *地理研究*, 26 (3): 500 - 507. Zhang Yili, Ding Mingjun, Zhang Wei, et al. 2007. Spatial characteristic of vegetation change in the source regions of the Yangtze River, Yellow River, and Lancang River in China [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 26 (3): 500 - 507.
- 赵彩霞, 郑大玮. 2004. 内蒙古冷蒿小禾草放牧草原退化与恢复对策研究 [J]. *草业学报*, 13 (1): 9 - 14. Zhao Caixia, Zheng Dawei. 2004. Inner Mongolia *Artemisia frigida* degraded rangeland and restoration strategie [J]. *Acta Prataculturae Sinica* (in Chinese), 13 (1): 9 - 14.