

中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因素分析

徐兴奎, 陈红, 张凤

(中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029)

摘要: 归一化的植被指数(NDVI)自然正交分解结果显示, 自上世纪 80 年代初期至 1994 年前后, 中国西北部区域地表植被覆盖呈增加的过程; 1994 ~ 2000 年, 地表植被覆盖状况开始退化, 植被退化强度空间分布不匀. TOVS 云覆盖数据与地表特征时间变化的一致性, 间接证明 1994 年之后西北部地区植被退化的事实. 通过降水和 NDVI 的相关分析, 划分出西北地区地表植被覆盖变化气候影响显著区域、气候与人为影响共同作用显著区域. 并从气候和人为影响 2 个方面分析了造成西北部地区地表植被覆盖状况下降的原因. 在降水和 NDVI 相关显著区域, 气候干旱因素是造成 1994 年后植被覆盖退化的主要原因; 而黄河等流域 1994 年后植被退化的区域, 气候干旱和人为活动因素是造成植被覆盖退化的主要因素.

关键词: 归一化植被指数; 植被退化; 自然正交分解; 人为影响

中图分类号: X830.2; Q142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0041-07

Temporal and Spatial Change of Vegetation Cover in the Northwest of China and Factors Analysis Influencing on Vegetations Variation

XU Xing-kui, CHEN Hong, ZHANG Feng

(International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Spatial eigenvectors and temporal coefficients resulting from decomposed NDVI by EOF show that vegetations cover in the northwest of China presented a significantly upward trend from 1982 to 1994, and decreased after 1994. The temporal consistency between annual variations in clouds cover derived from TOVS and land surface feature implies indirectly the land degradation in the northwest of China. Based on the correlation analysis between NDVI and rainfall, two divisions where climatic factors or human activities influences on vegetation cover are marked off. The areas where the correlations is significant, the drought is a principle reason leading to the degeneration of vegetations cover after 1994; another area, such as Yellow River watershed, the drought and human activities are responsible for land degradation.

Key words: normalized difference vegetation index (NDVI); land degradation; empirical orthogonal function (EOF); human activity

地表特征的变化对区域气候和全球气候系统都会产生强烈影响^[1~4]. 在中国西北地区, 这种效应同样也反馈到气候系统中. 环流模式和区域气候模式模拟结果显示, 中国西北部地区沙漠化、荒漠化会产生明显的气候效应^[5,6], 发生在北方气候生态过渡带的植被退化, 对夏季气候的异常变化也有显著影响^[7~9]. 动力因素风速减弱的情况下, 西北部地区灾害性天气如沙尘天气的发生频率等与地表植被年变化也存在显著相关^[10]. 早期资源普查以及近期的研究显示, 随着社会经济的发展和人口密度增加, 西北地区土地利用格局与环境质量发生了改变, 地表生态系统变得越发脆弱^[11,12], 在西北部分地区植被覆盖退化严重, 沙漠化发展迅速^[13,14].

遥感技术是监测地表特征时空变化的重要手段, 但对于干旱和半干旱地区也存在诸多问题. 干旱和半干旱地区地表覆盖以沙漠和荒漠为主, 植被覆盖率较低, 3 个因素制约了遥感监测精度: ①沙漠化

的发展方式十分特殊, 它向前推进的方式首先是在前方植被覆盖地区形成零星的沙丘, 沙漠没有明确的边界^[15]; ②沙漠地区的植被对季节性降水十分敏感, 一场降水可以改变沙漠地区地表覆盖状况, 沙漠面积在动态变化; ③沙漠和荒漠地区少量的植被和土壤的波段信号是混合的、非线性的, 在鉴别沙漠和荒漠时可能造成误差. 通过高分辨率遥感数据, 虽然能够比较准确地判别出干旱地区地表覆盖类型分布, 但时间序列相对粗糙, 无法描述对气候研究具有重要意义的地表特征月变化以及年变化.

本文自然正交分解 NASA 提供的 8 km × 8 km 归一化的植被指数(NDVI), 研究西北地区地表植被覆盖的时空演变过程. 从气候和人为 2 方面分析西北

收稿日期: 2006-02-14; 修订日期: 2006-05-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40233027); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-221)

作者简介: 徐兴奎(1966 ~), 男, 副研究员, 主要研究方向为陆面过程和遥感信息反演, E-mail: xkxu@mail.iap.ac.cn

区域地表特征变化的原因,通过大气响应与地表特征年变化一致性,验证西北地区地表特征变化的真实性.

1 研究方法

1.1 自然正交分解

自然正交分解(EOF)原理是将一个时空场分解成几个主空间波动和时间系数的乘积,消除次要扰动和白噪声来近似描述时空场变化.由于西北研究区域地表覆盖特征月变化剧烈(图 1),为了消除非植被覆盖季节其它因素对 NDVI 的影响,以每年 5~10 月平均 NDVI 代表年平均 NDVI.理由是西北地区植被类型基本为一年生植被,植被生长期主要在 5~10 月,NDVI 与气温和降水的月变化同相位.

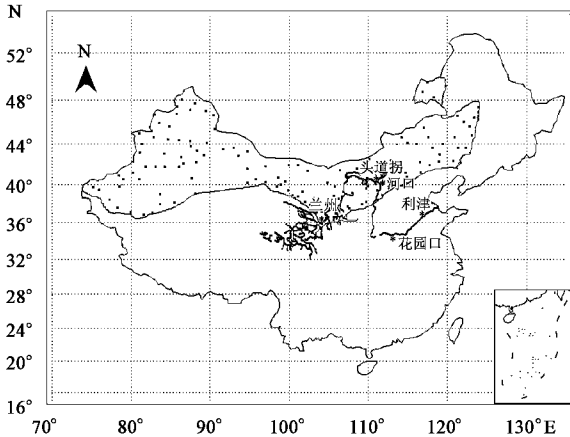


图 1 西北部研究区域地理分布、黄河流域及主要水文观测站(*)和气象站分布(■)
Fig.1 Hydrologic station along Yellow River and weather stations in the northwest of China

1.2 相关性分析

影响地表特征变化的因素主要有 2 种:自然因素和人为因素.自然因素主要指气候因素,地表特征空间分布不均是长期气候适应的结果,所以两者之间应该有固定的相关性.人为因素却能干扰或中断地表特征与气候要素的相互作用关系.通过相关性分析可以发现西北地区地表特征变化的主要原因.

2 西北地区地表植被覆盖时空分布

NDVI 距平自然正交分解后共得到 16 个特征向量.第一、第二特征向量占总方差的 59%(表 1).所以通过前 2 个特征向量场可以近似地描述西北研究区域地表覆盖特征的变化.

NDVI 距平第一特征向量场空间分布全部是正

表 1 特征向量占总方差的百分比		
Table 1 Percentage of variance explained by the eigenvectors using EOF		
序号	特征值	特征值权重/%
1	9.2	47
2	2.3	12
3	1.7	9
4	1.2	6
5	0.9	5
6	0.8	4
7	0.7	3
8	0.6	3
9	0.4	2
10	0.4	2

值,即西北地区植被覆盖年变化趋势空间分布一致(图 2).但也存在空间不均性,在内蒙古东部(I_1)、甘肃南部(I_2)和新疆西部(I_3 , I_4)有 4 个高值中心.对应第一特征向量场时间系数(1994 年由于 NOAA 卫星问题,没有数据),从 1982~1993 年间,第一特征场时间系数总体呈增加趋势,1993(或 1994 年)年之后开始呈下降趋势(图 3).这表明 1982~1993 年,区域植被覆盖状况总体上是在增加,以 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 这 4 个区域增加最明显.但 1993(或 1994 年)之后这种增长中断,时间系数转为下降趋势,暗示上述 4 个高值区植被覆盖状况发生了明显的变化.第一特征向量场反映的是 NDVI 空间总体变化特征,上述区域植被覆盖率降低幅度,还要参照第二特征向量场和对应时间系数.

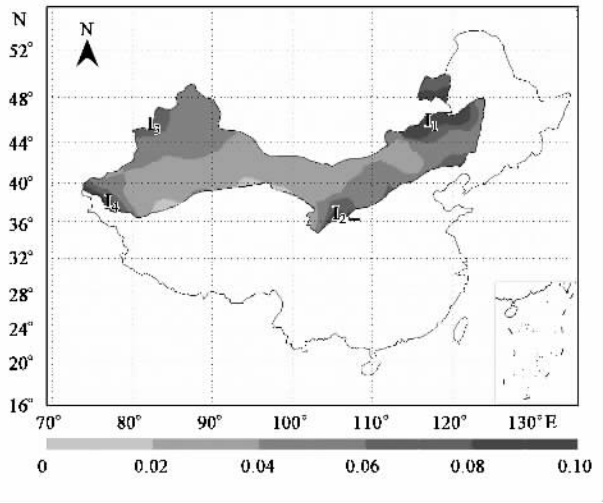


图 2 自然正交分解 NDVI 距平第一特征向量场
Fig.2 First NDVI eigenvector resulting from EOF

第二特征向量反映了 NDVI 距平的局地变化特征.其空间分布显示西北地区植被覆盖局地变化有 2 种反向过程.内蒙古东部(II_1)、甘肃南部(II_2)和

塔里木盆地(Ⅱ₃)为负值中心;内蒙古东南部(Ⅱ₄)、新疆西部(Ⅱ₅、Ⅱ₆)和甘肃东部(Ⅱ₇)存在正值中心(图 4). 参照第二特征场时间系数(图 3), 1982 ~ 1993 年间第二特征场时间系数为负, 之后时间系数变为正值, 但总的趋势是一直在增加. 说明Ⅱ₄、Ⅱ₅、Ⅱ₆ 正值区域, 第二特征场所反映的地表覆盖状况自 1982 ~ 2000 年间一直呈现增加趋势; 而在Ⅱ₁、Ⅱ₂ 和Ⅱ₃ 为中心的负值区域, 自 1993 年(或 1994 年)始, 地表覆盖状况趋于恶化.

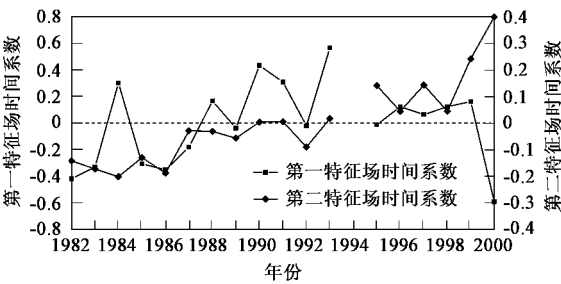


图 3 西北研究区域 NDVI 第一, 二特征场向量场时间系数

Fig.3 First and second temporal coefficients of NDVI in the northwest of China

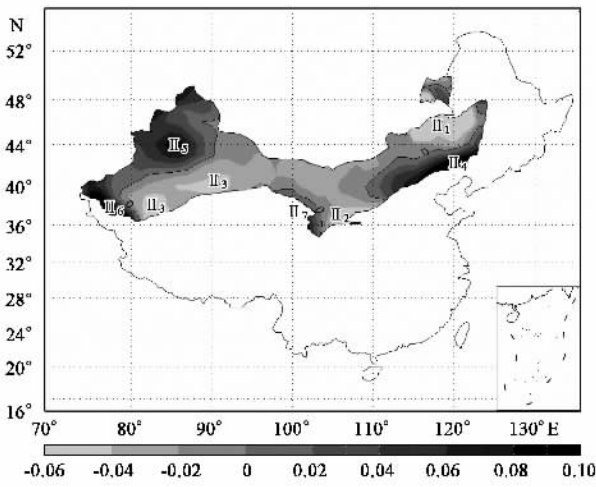


图 4 自然正交分解 NDVI 距平第二特征向量场

Fig.4 Second NDVI eigenvector resulting from EOF

3 西北地区地表植被覆盖变化的原因

3.1 气候因素对植被覆盖的影响

西北地处于干旱气候区域, 年降水总量大多低于 400 mm, 年蒸发潜力远大于降水量. 受地表水资源限制, 植被生长大多依赖于少量自然降水量. 植被对少量降水的适应过程, 使 NDVI 与降水之间形成正的相关性. 但这种相关性可能被一些自然的(突发性

灾害)或人为的影响因素打破, 如人为破坏地表植被覆盖、或在一些河流密集的灌溉区域, 会破坏气候要素与植被覆盖间的相关性.

从气候角度分析, 内蒙古的东南部(Ⅱ₄)、新疆的西部(Ⅱ₅、Ⅱ₆)和甘肃东部(Ⅱ₇)4 个弱退化正值中心有明显的共性. 从 1982 ~ 2000 年之间, 区域的降水量虽然年波动较大, 但并没有出现明显的大的年际变化趋势, 在新疆西部地区(Ⅱ₅、Ⅱ₆), 降水量还有增多的趋势. 但是 4 个区域的平均气温自 1995 年开始却显著增加(图 5 ~ 7). 这种状况打破了地表植被与气候之间长期形成的相互适应关系, 使区域干旱加剧, 导致 1994 年后地表植被覆盖状况开始退化. 尤其是在气温升幅达到一定程度时, 如 1998 年之后, 4 个区域降水量稍有减少, 地表植被覆盖出现较大幅度的下降. 而对于 1994 年之前气温同样有升高趋势, 但植被却呈现增加趋势这一现象, 合理的解释是, 植被对积温和降水的需求是非线性的, 当两者之中某一参数超过某一阈值时, 植被会对另一参数变得非常敏感^[16].

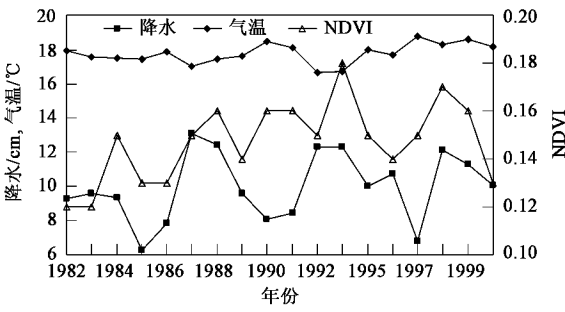


图 5 新疆西部(Ⅱ₅、Ⅱ₆)第二特征场正值区 5 ~ 10 月降水、平均气温和平均 NDVI 年变化

Fig.5 Variation of precipitation, temperature and NDVI between May and October in western Xinjiang province (Ⅱ₅, Ⅱ₆ second eigenvector > 0)

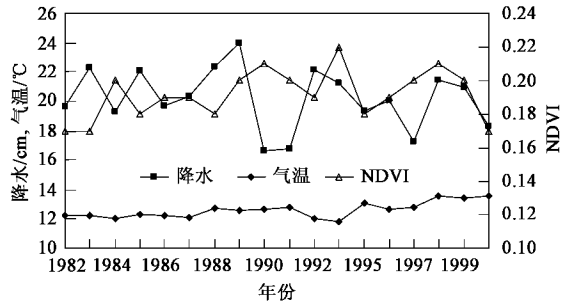


图 6 甘肃东部(Ⅱ₇)第二特征场正值区 5 ~ 10 月降水、平均气温和平均 NDVI 年变化

Fig.6 Variation of precipitation, temperature and NDVI between May and October in eastern Gansu province (Ⅱ₇ second eigenvector > 0)

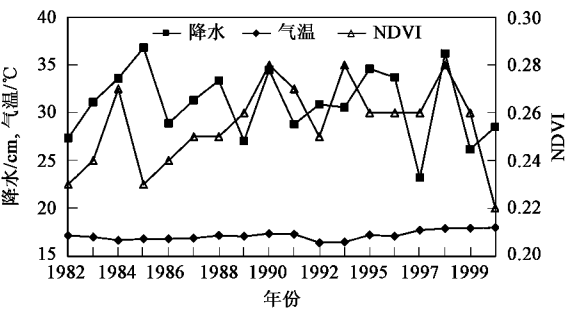


图 7 内蒙古的东南部(Ⅱ₄)第二特征场正值区 5~10 月降水、平均气温和平均 NDVI 年变化

Fig.7 Variation of precipitation, temperature and NDVI between May and October in Southeast of Gansu province (Ⅱ₄ second eigenvector > 0)

从地表覆盖特征角度分析,4 个区域也存在共同之处.这些区域地表水资源相对比较丰富、河流支系分布密集(图 8),并集中了西北地区大部分农业用地,人为因素如水利灌溉等很大部分弥补了因气温增高造成的降水不足,使地表植被退化相对较弱.因此在上述植被弱退化区域,植被年变化存在 2 种相反作用过程:气温持续升高,导致干旱加剧、植被覆盖率降低;但地表丰富的水资源,又部分弥补了降水的不足,缓解植被退化速度.与弱退化区域相反,植被退化相对严重的第二特征场负值区域,1995 年之后,降水量开始减少、气温却显著上升,由于地表水资源匮乏,降水成为植被生长的唯一水源,造成干旱加剧,1995 年开始植被持续退化(图 9).

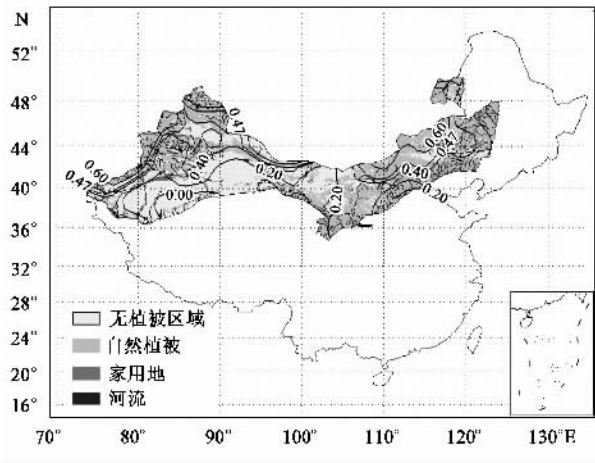


图 8 西北地区地表覆盖类型以及 NDVI 与降水相关性分布

Fig.8 Land surface types and correlation coefficients between NDVI and precipitation in the Northwest of China

气候因素可以造成地表植被覆盖的年际波动,但灌溉等可以弥补降水不足、延缓地表植被的退化进程.由于西北地区蒸发潜力远大于降水量,自然状

态下降水量与 NDVI 间应该存在正相关.相关分析可以粗略地勾画出气候要素起主导地位的区域、气候和人为共同影响的区域.图 8 叠加的轮廓线是 1982~2000 年 5~10 月 NDVI 与降水量之间相关系数分布.相关显著的区域(>0.47)有 3 部分,这些区域共同特点是:地表以自然植被为主,基本没有河流分布,植被生长依赖于自然降水,3 个区域 1994 年后地表植被覆盖呈减少趋势.其中内蒙古东部(105°E~120°E)、内蒙古西部(90°E~100°E)区域处于第二特征向量场所示的植被强退化区域,1994 年后降水量减少,气温增高所致的干旱加剧是造成这 2 个区域植被覆盖减少的主要原因.而新疆西部(74°E~85°E)相关显著区域处于第二特征场植被弱退化区域,与近年来新疆地区降水量和气温同时增加区域极为吻合^[17],这一区域降水增多一方面缓解了植被退化,但又无法抵消气温增高造成的干旱加剧,植被覆盖率呈现弱的退化.

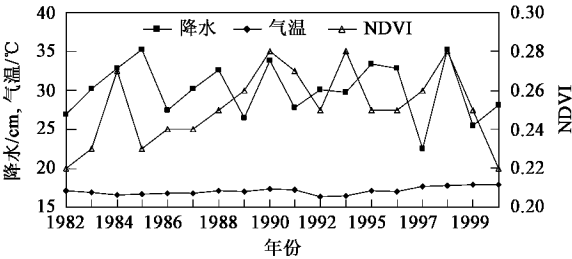


图 9 第二特征场负值区(包括Ⅱ₁,Ⅱ₂,Ⅱ₃)5~10 月降水、平均气温和平均 NDVI 年变化

Fig.9 Variation of precipitation, temperature and NDVI between May and October in the negative second eigenvector regions (Ⅱ₁,Ⅱ₂,Ⅱ₃)

3.2 人为因素对植被覆盖的影响

降水与 NDVI 相关性不显著的区域分为 3 种情况:①无植被区域;②沙漠化严重且植被稀少区域.即使在植被生长季节,这些地区地表覆盖率也很低,覆盖类型以沙漠或荒漠为主,少量植被的增减无法改变区域整体地表特征,因而相关性不显著;③黄河流域和其它河流分布密集、同时植被覆盖率相对较高的区域.这些区域植被类型相对丰富,除少量林地外(根系发达,与降水相关性可能不显著),集中了西北地区大部分农用地和草地.相关不显著的最可能原因是:河水的灌溉弥补了降水不足,打破了降水与植被间自然平衡规律.

黄河自西向东流经青藏高原、黄土高原和华北平原,流域面积的 80% 以上属于干旱半干旱气候区,是流域用水的主要来源,对区域地表环境影响巨大.

黄河水大部分来自流域自然降水,降水量波动直接影响流域各河段天然径流量.黄河上游兰州以上区域,自上世纪 50 年代初至 90 年代末,自然降水量一直比较平稳;黄河上游兰州-头道拐段,80 年代后降水量虽有下降的趋势,但没有出现大的变化(表 2).流域降水量的变化并不能解释黄河干流实际来水量的急剧减少,干旱只是其中一方面因素,而国民经济耗水却是最主要的原因^[18].

黄河引水量间接反映了流域工业、农业、城市规模和人口数量的增加.其中农业用地的增加对地表环境影响规模最大.如黄河上游(河口以上)90 年代农田灌溉面积比 60 年代增加 1.5 倍达到 131.5 万 hm^2 ;中游(河口-花园口)增加 1.7 倍达到 133.3 万 hm^2 .黄河引水中约 95% 是农业用水^[19],导致农业灌溉等耗水量从上世纪 50 年代至本世纪初急剧增加.农业用水一方面延缓了地表植被覆盖的退化程度,但过度依赖黄河可用水量,流量的变化会直接影响流域地表覆盖状况.以黄河流域 2 个典型水文站为例,90 年代后,实测径流量急剧减少(表 2).径流量减少的原因除流域降水减少、农用地面积增多使农

用水增加外,河道萎缩、含沙量增加以及流域水库增多导致补水增加等对黄河径流量的影响更显著^[20-21].结果黄河流域可用水的减少与农用地增加形成矛盾,在干旱日益严重的气候背景下对流域植被生长产生负面影响.黄河下游利津水文站观测结果显示,自 1991 年开始,黄河断流天数急剧增长,1995 年黄河断流首次超过 100d,虽然 1997 年后黄河断流日数逐年下降,但并不意味黄河总流量增加,而是上游、中游人为水流量调节所致.1999、2000 年黄河流域地表植被覆盖异常减少,除气候因素外,人为活动对水资源的调节,使黄河流域农业用水的粗放式使用无法适应水资源的再分配,导致流域地表植被覆盖在 1999、2000 年异常下降.由于缺少其他河流水文观测数据,仅用黄河引水量作为指标,分析人为灌溉因素对西北区域植被覆盖变化的影响显得单薄,但考虑到黄河流域对西北区域环境影响规模最大,对黄河引水量的分析,能从一定程度上揭示人为因素对西北区域,特别是黄河流域范围内植被变化的影响.内蒙东部非黄河流域,由于人口密度更大、农用地更多同时经济发展以畜牧业为主,也存在与

表 2 黄河流域降水量、引黄耗水量和实测径流统计

Table 2 Annual averaged precipitation, water consumption, amount of runoff along Yellow River watershed						
指标	区间	1950 ~ 1959 年	1960 ~ 1960 年	1970 ~ 1979 年	1980 ~ 1989 年	1990 ~ 1999 年
降水量/mm	兰州以上	426.7	437.5	432.5	428.2	421.7
	兰州 ~ 头道拐	280.6	306.6	301.1	274.3	274.7
引黄耗水量 $\times 10^8/\text{m}^3$	上游	73.4	95.2	102.9	121.1	131.7
	中游	30.0	49.4	63.4	62.1	60.2
实测径流 $\times 10^8/\text{m}^3$	兰州	315.3	357.9	318.0	333.5	259.8
	河口镇	245.6	271.0	233.1	239.0	156.7

黄河流域同样的问题.

4 西北地区地表特征变化与大气系统响应的一致性

作为半封闭、相互作用并具有自调整功能的地-气系统,大气会对地表特征变化产生不同程度的响应.云覆盖是一个理想的描述大气响应的参数.首先地表特征变化会直接影响地表热力分布,热力的强弱又会通过对流和湍流交换影响区域云的凝结高度和覆盖率;其次云量的增减意味着降水的增减,无云百分比、最大连续有云天数、最大连续无云天数是能够直接反映旱情的几个重要因子^[22];第三,云覆盖通过影响辐射传输来影响区域气温.

与常规气象观测基本同步的 TOVS 遥感数据^[23],印证了西北地区云覆盖异常变化,而且云分

布异常也是从 1995 年开始,与地表植被覆盖退化期对应(图 10).上世纪 80 年代初至 1994 年期间,虽然地表大气温度也存在增加趋势,但温度的升高并没有对区域云覆盖产生明显的影响,无论是总云量还是低云(云顶气压大于 680 hPa)、中云(云顶气压 680 ~ 440 hPa)和高云(云顶气压低于 440 hPa),5 ~ 10 月平均覆盖率呈相对稳定状态;但自 1995 年开始,这种稳定状态发生显著变化,低、中云覆盖率减少,高云量增多,总云量也呈现减少趋势.造成云覆盖发生变化的最可能原因是地表覆盖特征的改变,即地表植被覆盖率降低,导致西北区域地表层大气热力作用增强,近地层气温升高,结果区域上空云的抬升凝结高度升高,使低云和中云减少,高云增多.得出这个结论充足的理由在于地表热力分布对地表特征的改变非常敏感,而热力变化几乎会即时地在低层大

气中体现出来,并很快通过空气上升运动将热能分散到高层大气。

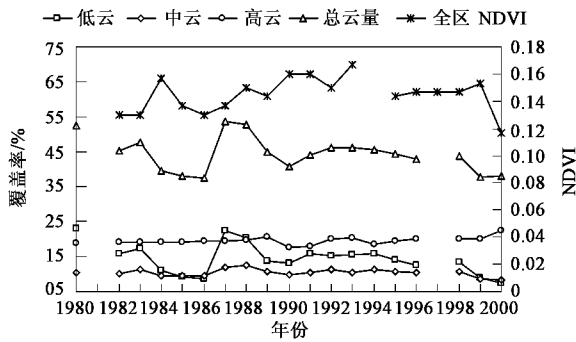


图 10 中国西北地区 5~10 月低云、中云、高云、总云量和全区平均 NDVI 年变化

Fig. 10 Annual averaged variation in low, middle, high, total cloud cover and averaged NDVI between May and October in the northwest of China

地表覆盖特征变化影响云量和云结构的同时,云的变化又通过云-辐射相互作用对区域气候产生影响.对低层大气温度而言,一方面,云的存在将增加地气系统的行星反照率,减少大气和地表对短波辐射的吸收,降低地-气系统的温度;另一方面,它们又吸收来自云底下部的大气和地表的红外辐射,具有同温室气体相同的增温作用.低层大气是冷却还是增暖取决于上述 2 个相反过程的总效果,并且与云层的位置和反射能力密切相关^[24,25].中低云主要由水滴组成,具有很强的反照率,由于其位置偏低、云顶温度偏高,故捕获的长波辐射偏少,通常使云下大气和地表产生明显的冷却作用;高云一般由冰晶粒子组成,具有较小的短波消光系数和单次散射反照率^[26,27],对太阳辐射具有半透明性.由于其位于对流层高层,云顶温度很低,因而能够捕获更多的红外辐射,相对于中低云而言,高云的增暖效应更加明显.所以高云量的增加、中低云量的减少将在对流层低层产生一个相当于温室效应的正反馈;而高云量的减少、中云和低云量的增加则将在对流层低层产生冷却效应.西北地区上空云分布和结构在时间上与地表特征变化的一致性、以及不同云体的正负反馈作用,可以从 1995 年之后西北 5~10 月平均气温年变化显著上升上体现出来。

5 结论

(1) 西北地区植被覆盖自 1982~1994 年前后整体上呈增加趋势,1994 年前后植被覆盖开始下降.植被覆盖率退化强度空间分布并不均匀,地表水资

源相对丰富的新疆西部、内蒙古东南部、甘肃部分地区植被退化程度较弱,其它地区植被覆盖率从 1994 年后持续退化.尤其 1999、2000 年,植被覆盖率异常减少,变化幅度最大的在黄河流域和内蒙古东北部地表水资源匮乏地区.与地表特征变化对应,西北地区云覆盖量与地表特征变化接近于同步,高低中云覆盖量也是从 1995 年之后出现异常变化,这也间接验证西北地区地表特征变的存在。

(2) 1994 年之后植被覆盖下降原因也因地而异.以自然植被为主的内蒙古东北部、西部以及新疆西部地区,1994 年之后气温持续增高、干旱加剧等气候因素是植被退化的主要原因;而在黄河等流域农业植被分布较广地区,1994 年后流域径流量减少、断流天数增加、农业耕地增大等引起农田用水量不足是这些区域植被退化的主要原因。

(3) 西北地区植被覆盖率的减少,意味着区域地表沙漠和荒漠化的加速.地表特征的改变在影响气候的同时,气候系统对地表特征的反馈作用又会进一步加剧西北地区地表沙漠和荒漠化速度.农用地面积持续增加、灌溉区域扩大等人为活动方式,由于过度依赖地表水资源,对西北植被覆盖的影响越发重要.与自然植被不同,农业植被对土壤养分和地表水资源是一个消耗性的过程,气候增暖加上地表水资源日益匮乏,可能导致地表覆盖特征发生不可逆转的过程。

参考文献:

- [1] Bounoua L, Collatz G J, Los S O, *et al.* Sensitivity of Climate to Changes in NDVI[J]. *Journal of Climate*, 2000, **13**: 2277 ~ 2292.
- [2] Lewis T. The effect of deforestation on grown surface temperatures [J]. *Global Planetary Change*, 1998, **18**: 1 ~ 13.
- [3] Ning Zeng, Neelin J D, Lau K M, *et al.* Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction [J]. *Science*, 1999, **286**: 1537 ~ 1540.
- [4] Skinner W R, Majorowicz J A. Regional climatic warming and associated twentieth century land-cover changes in north-western North America[J]. *Climate Res.*, 1999, **12**: 39 ~ 52.
- [5] Xue Y K. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian Grassland on the regional climate[J]. *Journal of Climate*, 1996, **9**: 2173 ~ 2189.
- [6] Wei H L, Fu C B. Study of the sensitivity of a regional model in response to land cover change over northern China[J]. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 2249 ~ 2265.
- [7] Zhang J Y, Dong W J, Fu C B. The influence of vegetation cover on summer precipitation in China: a statistical analysis of NDVI and climate data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 1002 ~ 1006.

[8] Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Ye Duzheng, *et al.* New evidence for effects of land cover in China on summer climate[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, **48**(4): 401 ~ 405.

[9] Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Fu Congbin. Impact of land surface degradation in northern China and southern Mongolia on regional climate[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50** (1): 75 ~ 81.

[10] Xu Xingkui, Chen Hong. Influence of vegetations and snow cover on sand-dust events in the west of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(3): 331 ~ 340.

[11] 张仁慧. 西部干旱半干旱地区水资源合理利用问题探讨[J]. 水土保持通报, 2003, **23**(5): 78 ~ 81.

[12] 李海民. 黄河断流的成因分析[J]. 陕西师范大学学报, 1999, **27**(3): 121 ~ 124.

[13] 杨永春. 干旱区流域下游绿洲环境变化及其成因分析-以甘肃省河西地区石羊河流域下游民勤县为例[J]. 人文地理, 2003, **18**(4): 42 ~ 47.

[14] Xu Xingkui, Lin Zhaohui, Li Jianping, *et al.* Temporal-spatial characteristics of vegetation cover and desertification of China by using remotely sensed data[J]. Progress in Natural Science, 2002, **12**(1): 46 ~ 50.

[15] Dregne H E. Desertification of Arid Lands[M]. London, Paris, New York: Harwood Academic Publishers, Chur, 1983.

[16] 徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析[J]. 生态学报, 2003, **23**(2): 221 ~ 230.

[17] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区近 43 年降水资源变化对农业的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, **23**(4): 179 ~ 185.

[18] 张学成, 刘昌明, 李丹颖. 黄河流域地表水耗损分析[J]. 地理学报, 2005, **60**(1): 79 ~ 86.

[19] 陈霁巍, 穆兴民. 黄河断流的态势、成因与科学对策[J]. 自然资源学报, 2000, **15**(1): 31 ~ 35.

[20] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, **59**(3): 323 ~ 330.

[21] 刘涵, 黄强, 佟春生. 龙刘两库补水对黄河中下游的环境补偿影响分析[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(1): 145 ~ 148.

[22] 刘良明, 胡艳, 鄢俊洁. MODIS 干旱监测模型各参数权值分析[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2005, **30**(2): 139 ~ 142.

[23] Susskind J, Piraino P, Rokke L, *et al.* Characteristics of the TOVS Pathfinder data set[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, **78**: 1449 ~ 1472.

[24] Goody R M, Yung Y L. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis [M]. New York: Oxford Univ. Press, 1989.

[25] Liou K N. Radiation and cloud processes in the Atmosphere: Theory, Observation and Modeling[M]. New York: Oxford Univ. Press, 1992.

[26] Chou M D, Suarez M J, Ho C H, *et al.* Parameterizations for cloud overlapping and shortwave single-scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models[J]. Journal of Climate, 1998, **11**: 202 ~ 214.

[27] Starr D O C. A cirrus cloud experiments: Intensive field observations planned for FIRE[J]. Bul. Amer. Meteor. Soc., 1987, **67**: 111 ~ 137.