



地理学报 2001年第56卷第3期

应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系

作者: 赵茂盛 符淙斌

应用1982~1994年NOAA/AVHRR的归一化植被指数 (NDVI) 资料和587个气象台站的数据对我国不同类型植被生态系统和气候的关系进行研究。首先将我国的植被类型划分为21类, 在此基础上分别研究了不同时间尺度下我国不同区域、不同植被类型和气候的关系。结果表明: 在多年平均状态下, 植被生态系统NDVI水平主要受水分条件的影响; 年内变化上, 温度对植被生态系统季相变化起着比降水略大的作用, 年降水量造成了植被季相响应的差异。在年际变化上, 分别研究了4个季节和整个生长期尺度上的关系, 一般情形为温度和降水对植被的年际波动起着大致相反的作用, 不同植被类型在不同的生长时期 (季节) 对气候的变化响应方式也不同。发现在植被的生长期, 我国南方和北方的植被生态系统对温度和降水的响应方式相反; 同时存在2个植被-气候敏感区, 分别为我国北方的典型草原到森林的过渡区和云南中部部分区域。

应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系 赵茂盛 符淙斌 延晓冬 温刚 (中国科学院大气物理研究所全球变化东亚研究中心, 北京 100029)

摘要: 应用1982~1994年NOAA/AVHRR的归一化植被指数 (NDVI) 资料和587个气象台站的数据对我国不同类型植被生态系统和气候的关系进行研究。首先将我国的植被类型划分为21类, 在此基础上分别研究了不同时间尺度下我国不同区域、不同植被类型和气候的关系。结果表明: 在多年平均状态下, 植被生态系统NDVI水平主要受水分条件的影响; 年内变化上, 温度对植被生态系统季相变化起着比降水略大的作用, 年降水量造成了植被季相响应的差异。在年际变化上, 分别研究了4个季节和整个生长期尺度上的关系, 一般情形为温度和降水对植被的年际波动起着大致相反的作用, 不同植被类型在不同的生长时期 (季节) 对气候的变化响应方式也不同。发现在植被的生长期, 我国南方和北方的植被生态系统对温度和降水的响应方式相反; 同时存在2个植被-气候敏感区, 分别为我国北方的典型草原到森林的过渡区和云南中部部分区域。关键词: NOAA/AVHRR; NDVI; 植被类型; 气候; 中国中图分类号: P462; P935.1 文献标识码: A

陆地生态系统对未来气候变化如何响应是科学界非常关心的问题。预测未来陆地生态系统对全球气候变化的响应依赖于我们对当前植被生态系统和气候之间关系的了解程度, 由于卫星数据在时间和空间上的连续性, 因此在植被-气候关系的研究中被认为是非常有效的数据源。应用NOAA/AVHRR数据集来研究宏观区域植被和气候的关系在国外已有大量研究 [1~3], 但在时间尺度上很少超过10年。我国学者用长时间序列的卫星资料 (12年) 在该方面进行了研究 [4], 研究的区域主要集中在我国东部的季风区, 研究表明了东亚季风是我国东部生态系统变化的驱动力, 并对我国东部季风区植被生长对气候年际波动的响应在纬向上的差异进行了研究; 还有学者对我国主要植被类型10年NDVI变化规律进行了研究 [5], 但该工作未深入研究NDVI的变化规律和气候波动的关系。因此, 我们对不同区域不同植被类型的生态系统对气候波动如何响应仍了解不够。本文应用时间相对较长的卫星资料 and 我国587个气象台站的数据来研究我国所有区域植被和气候之间的关系。为了研究不同植被生态系统和气候之间的关系, 应用遥感数据还对我国的植被类型进行了划分。研究的结果不但有助于我们全面了解我国植被生态系统如何响应气候波动; 同时对我们建立生态模型和检验模型是否合理提供了宏观观测事实依据。

1 数据来源及处理方法

1.1 数据来源

本研究所利用的卫星数据为Pathfinder NOAA/AVHRR多年数据集, 来自美国地球资源观测系统 (Earth Resources Observation System, EROS) 数据中心, 为“准10天”合成的陆地表面NDVI数据集, 空间分辨率为8km, 时间段为1982年1月至1994年8月共12年零8个月的资料, 该数据集已经经过大气校正、云检测和质量控制以便于用户使用, 该数据的具体生成过程见文献 [6]。NDVI的定义为: $NDVI = (Nir - R) / (Nir + R)$ (1-1) 式中 Nir和R分别为AVHRR第一和第二通道反射率。计算出的NDVI值应在-1.0~1.0之间, 但Pathfinder产品将其乘100后再加100, 使其值在0~200之间。NDVI与植被的许多参数密切相关, 如吸收光合有效百分率 (FPAR), 叶绿素密度, 叶面积指数, 植被覆盖率和蒸散率 [7~9]。因此, NDVI在区别植被类型和植被季节物候特征方面非常有效 [10~12]。气候数据为我国683个气象台站1961~1995年间35年逐月平均温度、降水数据集。由于该数据序列的个别站点存在某些时间段的缺测现象, 经过处理, 我们选择587个缺测数据极小的台站数据来研究我国植被和气候多年平均态的关系。在研究植被对气候年际变化的响应时, 又去掉在1982~1993年间存在缺测现象的台站40个, 最后用547个台站的数据来研究我国植被和气候年际变化间的关系。

1.2 研究方法

对“准10天”时间分辨率的NDVI进行月最大值合成, 从而消除来自云和大气的一部分干扰 [13~15], 并将NDVI值还原到-0.1~0.1之间。同时经过GIS处理从全球数据中取出我国部分, 建立了研究所用的我国归一化植被指数 (NDVI) 数据集。依据气象台站的经纬度坐标找到对应点的NDVI值, 考虑到部分台站位于或靠近城镇, 所以取其和相邻3×3个像元的平均为对应的NDVI, 最终形成了基于台站的多年NDVI数据集。将台站每月的温度和降水及NDVI分

别按4个季节、年和生长期(4月~10月)进行合成,然后分别对每年4个季节、全年及生长期合成的NDVI与同期的温度、降水求相关来研究植被生态系统与气候年际变化关系。以往对我国植被分类的研究所用的NDVI数据为某一年 [5, 16],而非一个平均年,本研究表明,我国植被的NDVI对气候年际变化的响应比较大,仅以某一年的NDVI数据进行植被分类,由于没有考虑到气候年际变化对NDVI的影响,所应用的数据必然存在偏差 [11],会对分类的结果产生不利的影响。基于此,本文应用12个月多年平均的NDVI数据进行主成分分析(PCA),对其所得到的前3个主分量进行植被类型的非监督分类,参照中国植被图 [17]和中国土地利用图 [18],来确定非监督分类的植被类型,最终将我国植被划分为21种类型(图1)。图1应用多年NDVI划分的中国植被类型图 Fig.1 Vegetation type of China classified using multi-year NDVI 将587个气象台站12个月多年平均的温度和降水按照NDVI数据的分辨率进行空间Kriging插值,将插值形成的图件利用地理信息系统与划分好的植被类型图叠加,将各植被类型所有像元对应的各月的温度、降水和NDVI累加后除以像元数,从而得到各种植被类型12个月多年平均的温度、降水和NDVI。

2 结果分析

2.1 我国植被与气候在多年平均水平上和多年平均季相变化水平上的关系

2.1.1 多年平均水平

从587个台站多年平均的NDVI与气候的相关图来看(图2),降水是影响我国植被生长状况最重要的因子,总的趋势为:年降水量越大,NDVI值就越大。这种关系在年平均NDVI值较低的情形下更为明显。年平均温度对植被的生长也有正的影响,但这种影响相对降水则小得多。

2.1.2 多年平均季相变化水平

利用不同植被类型12个月多年平均的NDVI分别与对应月的温度和降水求相关,将不同植被类型按其NDVI与气候(温度、降水)的相关系数在二维面上(以NDVI和温度的相关系数为横坐标,NDVI和降水的相关系数为纵坐标)标注其位置(图3a)。图中植被类型的代码依次以英文字母表示。图3表明:首先,除了热性灌丛和草及季雨林(I, F),其它植被类型在年内变化与温度和降水均为正相关。大部分植被类型与温度的相关都较高,说明温度在我国植被生态系统季相变化中起着比降水略大的作用。但是不同植被类型对降水的响应表现出较大的差异。图2 587个气象台站多年平均NDVI和温度(a)、降水(b)的相关图 Fig.2 The correlations between multi-year averaged NDVI and temperature, precipitation for 587 meteorological stations in China 其次,我国植被类型按照其多年平均的季相变化对气候的响应可明显地划分为3种类型(图3)。

第1种类型包括:A.寒温性针叶林, C.落叶阔叶林, D.常绿、落叶阔叶混交林, G.温性落叶灌丛、灌草丛, J.草甸草原, K.典型草原, L.荒漠草原, M.高寒草原, P.高寒草甸, Q.沼泽, R.一年一熟旱作农业, S.一年两熟或两年三熟旱作农业。对照我国年降水量分布图 [19],发现第一种响应类型的植被主要分布在年降水量介于约200mm~1200mm之间的区域,主要为旱作农业植被和温性的森林、灌丛和草原、草甸,还包括高寒地区的草原、草甸。温度和降水的季节性变化对这些植被类型的年内生长都具有重要的作用。

第2种类型包括:E.常绿阔叶林, H.暖性常绿、落叶灌丛和草丛, N.半灌木、灌木荒漠, O.高寒荒漠, T.单双季水稻或经济林, U.沙漠及戈壁。该响应类型的植被主要分布在年降水量小于200mm和年降水量大于1200mm的区域。气候的年内变化对本类型植被的季相变化影响也较大,温度对其季相变化的影响与第一类近乎相同,但降水对其影响较第一类弱,同时,本类型内部存在的差异也主要表现在对年内降水变化的响应程度不同。可能的原因在于,对于E, H和T而言,由于它们分布在我国南方,一则年降水相对比较丰沛,二则降水在年内的分配相对北方较均匀 [19]。

第3种类型包括:B.暖性针叶林, F.季雨林, I.热带灌丛和草丛。因为N, O和U处于干旱区,年降水过于少,植被NDVI的年波动极小。同时,通过比较21种植被类型所处区域的温度年变幅,发现第三种区域的温度年变幅最小。这种温度变化情形可能是导致第三种类型的季相变化不同于前两种的原因。图3 中国21种植被类型12个月多年平均的NDVI与温度及降水的相关及分类图(a)和对应的区域图(b) Fig.3 Correlation between NDVI of 21 vegetation types and temperature, precipitation (a) and three clustered areas map (b) in China for multi-yearly monthly averaged NDVI, temperature and precipitation

2.2 我国植被和气候年际变化的关系

2.2.1 我国植被和气候年际变化的关系在季节上的表现

将四季台站的NDVI与气候(温度、降水)相关图(图4)和植被类型图(图1)在地理信息系统中进行叠加,对不同的植被类型按相关系数是否超过相关检验($p < 0.1$, $f = 10$, $r > 0.4972$)区分为4级: $r > 0.4972$, $0.4972 > r > 0$, $0 > r > -0.4972$ 和 $r < -0.4972$,即显著正相关,正相关,负相关,显著负相关。计算不同相关级别的像元数,以所得的像元数除以该植被类型的总像元数,即得到4个相关级别频率,所有频率的总和为1。为了便于图示和讨论,对负相关系数的级别频率以负数表示(图5)。这样可以比较不同植被类型在不同的季节和时期对气候年际变化的响应。从四季、全年及生长期NDVI与温度和降水的空间相关系数图(图4)及不同植被类型与温度、降水的相关频率图(图5)上可发现不同季节、不同区域和不同植被类型在年际变化上对气候的响应。春季我国大部分区域NDVI和温度为正相关(图4a),尤其东北和江南的大部分区域超过了正相关检验,黄河流域包括华北平原大部分区域和温度为反相关,但大部分区域未超过相关检验,表明该区域在春天略有干旱现象,降水对该区的植被生长具有比温度大的作用。对应的同期降水和NDVI相关图也表明了这一点(图4g)。从不同植被类型的响应上看,大部分植被类型NDVI和温度存在正显著相关频率,当然也有个别植被类型(类型G, I, K, O)表现为负相关,与温度相比,春季的降水与大部分植被类型(除D, O, U)存在较大反相关频率,Black等 [19]研究发现暖春可使北方森林的放叶提前,研究表明,在我国东部地区,几乎所有森林类型都存在类似的现象。夏季是植物生长最旺盛的季节(图4b, 4h),我国东部大致以北纬35度为界,该界以南(除云南部分地区)NDVI和降水为反相关,和温度为正相关;该界以北(除东北部分地区)的NDVI和降水为正相关,和温度为负相关。我国西北和青藏高原(除长江和黄河源头区域)的NDVI和降水为正相关,和温度为负相关。在植被类型上,草原类植被、荒漠和沙漠戈壁等以及一年一熟旱作农业与降水的正相关频率较高(图5c),常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、温性及暖性灌丛和灌草丛和沼泽和同期降水略有负相关,其他植被类型则表现为过渡型。除了寒温性针叶林,其余植被类型在该季节与温度的相关频率(图5a)大体与降水的相关相反。图4 中国NDVI与温度的年际变化在春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)、全年(e)和生长期(f)的空间相关图;NDVI与降水的年际变化在春(g)、夏(h)、秋(i)、冬(j)、全年(k)和生长期(l)的空间相关图 Fig.4 Inter-annual correlation patterns between NDVI and temperature for spring (a), summer (b), autumn (c), winter (d), year (e) and growing period (f) in China; inter-annual correlation patterns between NDVI and precipitation for spring (g), summer (h), autumn (i), winter (j), year (k) and

d growing period (l) in China 图5 中国不同植被类型NDVI年际变化在夏季对温度(a)和降水(c)及生长期对温度(b)和降水

(d)的相关频率图 Fig.5 The frequency of inter-annual correlation for summer between NDVI and temperature (a), precipitation (c) and for growing period between NDVI and temperature (b), precipitation (d) in China 秋季我国大部分区域植被NDVI和温度为正相关,和降水为反相关(图4c, 4i)。因为秋季是我国大部分地区植物叶子枯落的季节,降水过多会导致温度减小,使植物落叶增多。但在东部部分区域降水和NDVI为正相关,尤其是黄河下游以南大部分区域超过了相关检验,表明该季节降水依然是该区植被生长的限制因素。在植被类型上表现为:暖性(B)和常绿(D, E, F, H, I)的森林或灌丛类植被以及一年一熟旱作农业与降水主要呈较大正相关频率;而寒温性针叶林,落叶阔叶林,荒漠沙漠类及高寒类和一年两熟或两年三熟旱作农业与降水的反相关频率较大。而同期与温度的相关频率图表现出与降水大体相反的形势。冬季温度对于南方常绿植被的生长具有重要的生理意义,因此,南方大部分区域NDVI与温度的正相关(图4d)是可以理解的,同时由于过多的降水往往导致温度的下降,所以南方降水和NDVI为负相关(图4j)。但是对于北方,大部分区域植被在冬季有落叶现象,所以NDVI受土壤背景的影响比较大,同时,北方冬季积雪的消融为一较长过程,该过程对地表的反射物理状况有重要影响,从而影响NDVI值。因此,冬季我国北方植被的NDVI和气候的关系难以解释。这也是后面研究全年NDVI和气候关系时在北方某些地区出现难以解释现象的原因。

2.2.2 我国植被与气候年际变化的关系在生长期的表现

将547个台站的各年降水量,平均温度,与对应年的NDVI求相关系数,由图4k可见,在全年时间尺度上,降水和NDVI的关系在全国几乎全为反相关,这与植被实际生长情形不符合,因为在北方干旱区,年降水量为限制植被生长的重要因素;温度部分区域与实际符合(图4e),但在内蒙古的锡林郭勒高原和温度为正相关,也不可能,因为高温可导致地表蒸散加剧,造成地表干旱,对于干旱区而言,会对植被的生长造成不利的影 响。之所以出现不可信的结果,可能由于上述冬季特殊的地表覆盖原因。为此,我们去掉冬季,而以生长时期的NDVI与气候的关系来代表植被与气候的年际关系。为了便于数据的处理及在区域和植被类型上的比较,统一以4~10月作为我国植被的生长期来研究植被对气候的响应。我国植被在生长期对温度和降水的年际变化的响应在空间上表现出近乎相反的态势(图4f, 4l)。从温度和NDVI的关系来看:我国东南部大部分区域及东北的小部分区域和青藏高原小部分区域植被的生长状况与温度成正相关,其余大部分区域与温度成反相关。从降水和NDVI的相关图来看,大部分相对干旱的区域与降水量成正相关,我国大部分相对干旱的区域,降水不足是植被生长的限制因子,从植被类型看,大部分植被类型在生长期和温度为反相关(图5b),尤其是草原类和荒漠类的植被类型,还有旱作农业及沙漠戈壁,而上述类型的植被生长又与降水表现出较高的正相关频率(图5d)。出现这种现象的原因在于:相对湿润区与降水成反相关,我国南方植被在生长期的生长状况与温度反相关的原因可能是,南方的降水量对于植物的生长而言一般已相对充足,过多的降水便意味着云量的增加,入射辐射量的减小,而土壤湿度的增加导致地面潜热蒸发相对增大,这些都会使气温降低,使植物的光合作用能力降低,对植物的生长产生不利的影 响,北方由于降水一般较少,年日照时数和年太阳总辐射量较大,高温导致着干旱及最大潜热蒸发的增大,对植被的生长造成负面影 响。我们把在生长期超过相关检验($p < 0.1$, $r > 0.4972$)的区域称为植被-气候敏感区(图4f, 4l),这样的区域在我国主要有2个,一个是我国北方的草原-森林生态过渡带,另外一个为云南中部的部分区域,即热带灌丛植被类型。这在遥感上证实了生态过渡带对气候变化的敏感性。

3 总结

在多年NDVI数据集的基础上,结合相对密集的气象台站资料,对我国植被与气候的关系进行了较全面的研究,主要结果为:(1)应用多年NDVI资料对我国植被类型进行了划分,形成数字化的植被类型图,以此作为进一步研究植被-气候关系的基础数据。(2)多年平均NDVI与温度及降水的关系表明降水是影响我国植被生长状况的重要因子。(3)植被多年平均季相变化对气候的响应表明,温度对生态系统季相变化起着比降水略大的驱动作用。发现我国不同植被生态系统的季相变化对气候的响应大致可归并为3大类,第一和第二大类在空间上的边界与200mm和1200mm年降水线近乎重合,表明降水是导致季相变化对气候响应区域分异的重要因素。(4)在植被生长的年际变化方面,气候对不同季节,不同区域,不同生态类型的植被生长起着不同的作用。同时,温度和降水对植被生态系统的生长起着大致相反的作用。(5)我国北方和南方存在2个植被-气候敏感区,分别是北方的典型草原到森林的过渡区和云南中部部分热带灌丛和草丛区域。

参考文献(Reference): [1] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. *Science*, 1997, 278:870-872. [2] Moulin S, L Kergoat, N Viovy, G Dedieu. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements [J]. *Journal of Climate*. 1997, 10:1154-1170. [3] Richard Y, I Pocard. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa [J]. *Int. J. Remote sensing*, 1998, 19 (15) :2907-2920. [4] Fu C, G Wen. Variation of ecosystems over East Asia in association with seasonal interannual and decadal monsoon climate variability [J], *Climatic Change*, 1999, 43:477-494. [5] Li Xiaobing, Shi Peijun. Research on regulation of NDVI change of Chinese primary vegetation types based on NOAA/AVHRR data [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41 (3) :314-324. (In Chinese) [李晓兵, 史培军. 基于NOAA/AVHRR数据的中国植被类型NDVI变化规律研究 [J], *植物学报*. 1999, 41 (3) :314-324.] [6] James, M E, S N V Kalluri. The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring [J], *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15: 3347-3364. [7] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1985, 6: 1335-1372. [8] Running S W Nemani R R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24: 347-367. [9] DeFries, R. Mapping the land surface for global atmosphere-biosphere models: Toward continuous distribution of vegetation functional properties [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 20867-20882. [10] Justice C O, Townshend J R G, Holben B N, et al. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1985, 6: 1271-1318. [11] Tucker C J, Townshend J R. Afr

ican land-cover classification using satellite data [J]. Science, 1985, 227:233-250. [12] Running S W, Loveland T R, and Pierce. A remote sensing based vegetation classification logic for use in global biogeochemical models [J]. Am bio., 1994, 23:77~81. [13] Loveland T R, Merchant J W, Ohlen D O et al. Development of land-cover characteristics for the co-terminous US [J]. Photogram-matic Engineering and Remote Sensing, 1991, 57:1453-1463. [14] Townshend J R G, Justice C, Li W, et al. Global land cover classification by remote sensing: Present capabilities and future possibilities [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35:234-255. [15] Ehrlich D, Estes J E, Singh A. Application of NOAA-AVHRR 1km data for environmental monitoring [J]. Int. J. Remote Sensing, 1994, 15:145-161. [16] Sheng Yongwei, Chen Weiyong, Xiao Qianguang et al. Chinese vegetation macroscopical classification using vegetation index of meteorological satellite [J]. Chin. Sci. Bull., 1995, 40 (1) :68-71. (In Chinese) [盛永伟, 陈维英, 肖乾广, 郭亮. 利用气象卫星植被指数进行我国植被的宏观分类 [J], 科学通报. 1995, 40 (1) :68-71.] [17] Huo Xueyu. Vegetation Map of China (version 2) [M]. Science Press, 1982. (In Chinese) [侯学煜. 中国植被图 (第二版) [M]. 北京, 科学出版社, 1982] [18] Wu Chuanjun. 1:1000000 Chinese land use map [M]. Science Press, 1990. (In Chinese) [吴传钧. 1:1000000 中国土地利用图 [M]. 北京, 科学出版社, 1990] [19] Black T A, W J Chen, A G Barr, M A Arain, Z Chen, Z Nestic, E H Hogg, H H Neumann, P C Yang. Increased carbon sequestration by a boreal deciduous forest in years with a warm spring [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27 (9) :1271-1274. Study on the Relationship Between Different Ecosystems and Climate in China Using NOAA/AVHRR data ZHAO Mao-sheng FU Cong-bin YAN Xiao-dong WEN Gang (START, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing, 100029, China) Abstract: Key words:

关键词: NOAA/AVHRR; NDVI; 植被类型; 气候; 中国