

近 20 年来中国植被活动在增强*

方精云** 朴世龙 贺金生 马文红

(北京大学环境学院生态学系, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要 为阐明近 20 年来中国植被覆盖变化的整体状况, 利用归一化植被指数(NDVI)作为植被活动的指标, 使用第 3 代 NOAA-AVHRR/NDVI 时间序列数据, 研究了 1982~1999 年间中国地区 NDVI 的变化. 为消除地表非植被因素的影响, 参考国际惯例, 定义年 $NDVI \geq 0.1$ 的地区为有植被覆盖地区(简称植被地区), $NDVI < 0.1$ 的地区为植被稀少地区. 结果表明, 18 年来, 我国大多数地区的 NDVI 都呈现不同程度的增加趋势, 表明我国的植被活动在增强. 与 80 年代初相比, 90 年代末植被地区的面积增加 3.5%, 植被稀少地区的面积下降了 18.1%. 全国平均年 NDVI 增加了 7.4%. 生长季节的延长和生长加速是我国 NDVI 增加的主要原因, 而温度上升和夏季降水量的增加以及农业活动的加强可能是其主要的驱动因子. 我国 NDVI 变化趋势显示了较大的空间异质性: 东部沿海地区呈下降趋势或变化不明显; 农业产区和西部地区增加显著. 这种空间异质性是由于城市化过程、农业生产活动、区域气候特征以及植被对气候变化的区域响应等综合因素作用的结果.

关键词 中国 NDVI 植被活动 气候变化 农业生产活动 城市化过程

过去的 20 余年, 中国的土地利用/土地覆盖发生了很大的改变: 一方面通过植树造林、引水灌溉增加绿洲、集约经营等农业手段, 使植被活动朝着增强的方面发展^[1,2]; 另一方面, 由于迅速扩展的城市化和工业化以及过度放牧等人类活动导致植被退化^[3,4]. 因此, 关于中国一些地区植被变化的状况, 常常存在两种截然不同的报道. 那么, 从全国整体的角度看, 中国植被活动的状况如何是十分关注的问题, 但尚没有一个令人信服的综合分析.

在全球范围, 来自大气成分观测^[5,6]、物候及土地利用变化研究^[7~10]、以及碳过程模型模拟^[11~13]等方面的研究均表明: 近 20 年来, 北半球陆地植被活动在显著增强, 导致北半球陆地生态系统是重要的大气 CO₂ 的汇. 这种增强的植被活动近年来被卫星遥感数据的研究得到进一步证实^[14~21]. 但是具体到我国, 近 20 年来陆地植被活动的情景如何并不清楚. 长时间序列的、精度可靠的遥感信息为回答这一问题提供了有效数据.

卫星遥感数据覆盖面积广(例如, NOAA 的 AVHRR 数据可以覆盖全球)、时间分辨率高(AVHRR 数据可以每天有一个数据), 因此, 在研究国家、洲际、全球的植被覆盖和植被活动中得到广泛应用, 使过去难以实现的大尺度时间序列研究成为可能. 归一化植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index) 是指示大尺度植被覆盖和植被生产力的良好指标, 广

2003-04-09 收稿, 2003-09-27 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40024101, 90211016)

** E-mail: jyfang@urban.pku.cn

泛应用于大尺度植被活动状况的研究^[14-16,22-29]。尤其是最近,第3代 NOAA/AVHRR NDVI 时间序列数据由于基本上清除了大气水汽、火山爆发等因素的影响,数据精度得到进一步提高,从而使该数据成为研究大尺度生态过程的一个不可多得的数据源^[16,23]。本文利用第3代 NOAA/AVHRR NDVI 时间序列数据^[16,18],研究1982~1999年间中国陆地植被覆盖的变化,试图从整体上揭示中国植被的变化状况。本研究利用 NDVI 数值的大小来指示植被活动的强弱或植被覆盖的变化,某一地区植被活动的增强或减弱包含植被覆盖面积的变化和单位面积植被质量的变化这两个方面的影响,植被覆盖面积的增加和单位面积植被质量的提高都将导致植被生产力的增加。本文从这两个方面讨论过去近20年来我国植被活动的变化。

有必要说明,文中所研究的植被状况包括自然和人工植被在内的植被整体的情况,不区分人工植被和自然植被。这种处理一是基于我们的研究目的,即揭示全国植被的整体变化情况;二是从植被科学本身来讲,在某些情况下,区分自然植被与人工植被是困难的,如弃耕地及人工抚育的天然草场等。

1 数据和方法

1.1 若干概念

(1) 植被稀少地区和植被覆盖地区:理论上,NDVI变动于-1~1之间。NDVI数值越大,表明植被的覆盖程度越高,植被活动越强。在冰雪覆盖的地区,NDVI常常为负值;在戈壁沙漠地区,受下垫面信息的影响较大,其值不稳定,常常不能真正反映植被的覆盖状况。因此,在植被覆盖率低的地区,人们常采用年或月平均NDVI的某一界限值作为阈值,来排除非植被因素的影响。较早期使用月平均0.05的NDVI阈值^[14],后来使用年均值0.1作为阈值^[19,20]。本文也使用0.1的年平均NDVI作为阈值。因此,本文定义:NDVI小于0.1的地区为“植被稀少地区”,大于或等于0.1的地区为植被覆盖较为密集的地区(简称“植被覆盖地区”或“植被地区”)。从该定义可知,本文所说的“植被稀少地区”和“植被地区”是个相对的概念。本文的研究区主要为“植被地区”。由于气候等因素常常导致不同年份同一地点的NDVI有变化,因此,本文的“植被地区”面积在不同年份可能有变动。

(2) 植被变化:同“植被活动”的概念相似,本文中使用的“植被变化”概念包含两种意义,即植被地区的面积变化和单位面积NDVI值的变化。

(3) NDVI变化率:由下式计算:

$$\text{NDVI变化率}(\%) = \text{直线斜率}/\text{均值} \times 18 \times 100,$$

式中,直线斜率表示NDVI对年份的直线斜率,即对18年(1982~1999)的年平均或月NDVI值与年份之间求直线回归,所得回归直线的斜率。均值为18年的平均年NDVI值。该变化率在数值上相当于研究期间年平均NDVI的末期值与初期值之差,被初期值除。

1.2 NDVI数据

所使用的NDVI数据来自GIMMS(Global Inventory Monitoring and Modeling Studies)工作组进行大气校正和消除了火山爆发等因素而得到的从1982年1月至1999年12月每15天的NDVI/AVHRR卫星遥感时间序列数据,空间分辨率为8 km × 8 km。

因为用NDVI来指示植被活动的状况,因此NDVI数据质量是本研究的关键所在。为此,对NDVI数据在中国的适用情况稍作分析。

Slayback 等人^[23]比较了 5 种不同处理的 NDVI 数据系列在阿拉伯沙漠地区的变化情况(图 1(a))以及传感器改变对不同区域 GIMMS-NDVI 数据的影响(图 1(b)). 结果表明, 在 5 种

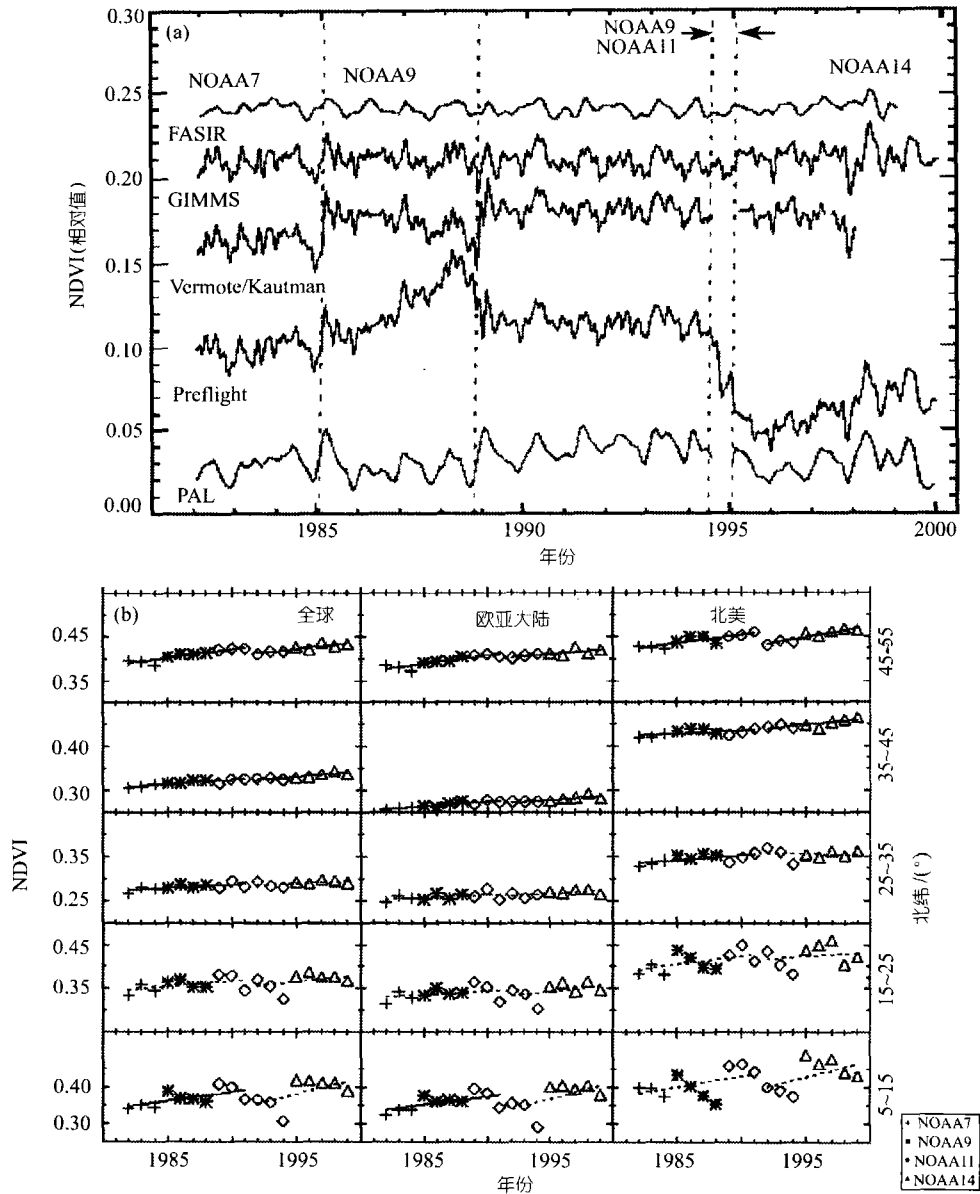


图 1 不同处理的 AVHRR/NDVI 数据的比较以及卫星改变对不同区域 NDVI 数据的影响

(a) 1982~1999 年间, 卫星传感器系统经过了 4 次更换(NOAA 7, NOAA 9, NOAA 11, NOAA 14). 利用 Arabian 沙漠对 5 种处理的 NDVI 时间序列数据(PAL, Preflight, FASIR, GIMMS 以及 Vermote)进行比较, 可见 GIMMS 数据(1982~1999)变化较为平稳, 不受传感器更换的影响, 而且消除了两次(1983 和 1992 年)重大火山的影响. 因此, 在进行时间序列分析时, 该数据质量是可靠的^[23]. (b) 不同纬度带 5~9 月平均 GIMMS-NDVI 值的年际变化. 该图表明, 在中国的主要区域(北纬 25~55 度), NDVI 的时间序列数据没有异常变化, 并不受卫星传感器系统和火山爆发的影响, 也即 GIMMS-NDVI 时间序列数据在中国使用是可靠的^[23]. 符号示卫星

NDVI 数据系列中, GIMMS-NDVI 数据在 1982~1999 年的 18 年间变化平稳, 没有明显的增加或减少的趋势, 传感器改变对这种趋势也不产生明显的影响. 这表明, 相对于其他 NDVI 数据来源来说, GIMMS-NDVI 时间序列数据适合于大尺度植被活动变化的分析(图 1(a)). 另一方面, 在不同区域比较中, 中国陆地大都处于纬度 $25^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 之间. 从图 1(b)可见, 中国地区 NDVI 的变化十分平稳, NDVI 变化趋势没有出现随传感器的改变而发生明显变化的情况. 这些都说明 GIMMS-NDVI 数据用来分析我国的植被活动状况是合适的.

1.3 气候数据

所使用的气候数据为 1982~1999 年 680 个气象站的月平均气温和月降水资料.

1.4 数据处理

每月的 NDVI 数据通过国际通用的 MVC(最大值合成)法获得^[30], 该方法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰^[30]. 对通过 MVC 法获得的 NDVI 图像进行投影变换, 转换成分辨率为 0.1 度的经纬网投影, 以便作进一步分析. 本研究中的年 NDVI 值由一年 12 个月中月 NDVI 值 ≥ 0.1 单位的月份的 NDVI 累加得到. 由于气候数据中的位置是用经度和纬度来表示的, 因此对气候数据进行 Kriging 插值, 获取与 NDVI 数据相匹配的分辨率为 0.1 度的栅格格式的气象要素图.

2 结果与分析

2.1 植被覆盖的年际变化

图版 I (附本刊后) 分别表示 80 年代初(1982~1984 年平均)和 90 年代末(1997~1999)中国年 NDVI 的分布. 可以看出:

(1) 无论是 80 年代初, 还是 90 年代末, 我国年 NDVI 大体上呈现由东南向西北递减的趋势: 东半壁数值较大, 西半壁较小, 我国西北的荒漠地区 NDVI 值极小, 属本文定义的植被稀少地区. 在云南南部以及西藏的东南部, 由于水热条件良好, NDVI 值相当大.

(2) 与 80 年代初相比, 我国东北平原、华北平原以及四川盆地等农业区的 NDVI 增加明显, 而珠江三角洲和长江三角洲地区由于城市化的影响, NDVI 则显著减小.

(3) 比较两个时期的 NDVI 分布, 可以发现, 90 年代末西北植被稀少地区的面积有所减少. 为了分析 NDVI 的变化趋势, 对 18 年(1982~1999)的 NDVI 数据进行统计处理, 得到 18 年来植被地区和植被稀少地区的面积变化趋势(图 2(a)和(b)). 18 年来, 植被地区($\text{NDVI} \geq 0.1$)的面积呈增加趋势($R^2 = 0.15, P = 0.12$), 增加速率(斜率)为 $0.98 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{年}$ (图 2(a)), 而植被稀少地区的面积则相应地减少 $0.98 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{年}$ (图 2(b)).

另一方面, 18 年来我国单位面积年 NDVI 值的变化趋势说明, 无论是植被地区的单位面积平均年 NDVI 值($\text{NDVI} \geq 0.1$ 地区的年 NDVI 累计值与该地区总面积之比)(图 2(c)上), 还是全国国土总面积的单位面积平均年 NDVI 值(NDVI 累计值与全国陆地总面积之比)(图 2(c)下), 都呈显著增加趋势, 可决系数分别为 0.24 ($P = 0.04$)和 0.44 ($P < 0.01$). 这表明在过去的近 20 年中, 我国植被的总体状况是向着良性的方向发展. 图 3 总结了这 18 年植被地区和植被稀少地区植被活动的变化: 植被地区的面积由 1982 年的 $784 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到 1999 年的 $812 \times 10^4 \text{ km}^2$, 增加了 3.5%, 而植被稀少地区($\text{NDVI} < 0.1$)的面积由 1982 年的 $155 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到 1999 年的 $127 \times 10^4 \text{ km}^2$, 减少了 18.1%. 就单位面积年 NDVI 数值的变化而言, 在植被地区平均年 NDVI

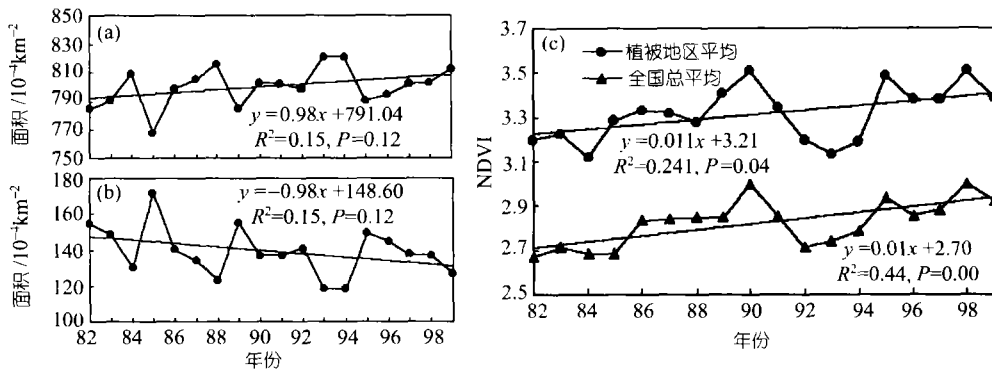


图 2 18 年来我国植被活动的变化

(a) 植被地区($NDVI \geq 0.1$) 的面积变化, 显示 18 年来面积增加较显著. (b) 植被稀少地区($NDVI < 0.1$) 的面积变化, 显示 18 年来面积减小较显著. (c) 我国单位面积年 NDVI 总量的变化, 无论是植被地区($NDVI \geq 0.1$) 的单位面积平均值(上图), 还是全国总陆地面积的单位面积平均值(下图)都呈现显著增加的趋势

由 3.2 增加到 3.4, 净增加了 6.3%, 而就全国单位面积平均值而言, 年 NDVI 则由 2.7 增加到 2.9 单位, 增加了 7.4%.

2.2 植被活动增加的机制以及气候变化的影响

按照最近的研究, 导致北半球陆地植被活动增强的直接因素来自两方面: 生长季的延长(包括春季提前和秋季推迟)和生长季的生长加速^[14,31]. 那么, 对于中国来说, 情况如何呢? 图 4(a)表示 80 年代初(1982~1984 年平均)和 90 年代末(1997~1999 年平均)中国植被地区平均月 NDVI 的季节变化曲线. 可以看出, 无论是生长季的长度还是生长季的生长量(NDVI 值的大小), 90 年代末比 80 年代初都要大, 除 12 月份外, 其他各月份 NDVI 的值都是 90 年代末大于

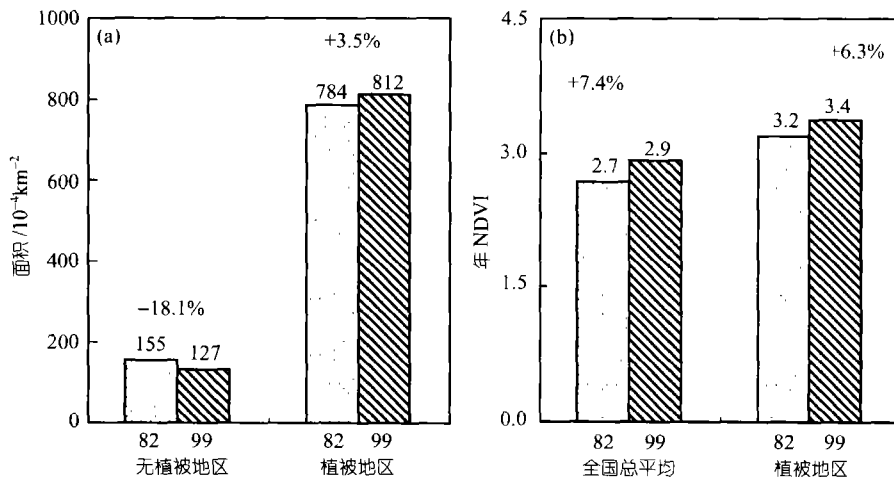


图 3 过去 18 年来我国植被覆盖状况的面积变化和年 NDVI 平均值的变化

(a) 植被稀少地区的面积减少 18.1%, 植被地区的面积增加 3.5%. (b) 单位面积的年 NDVI 平均值增加 7.4% (全国总陆地面积平均)和 6.3% (植被地区的总面积平均)

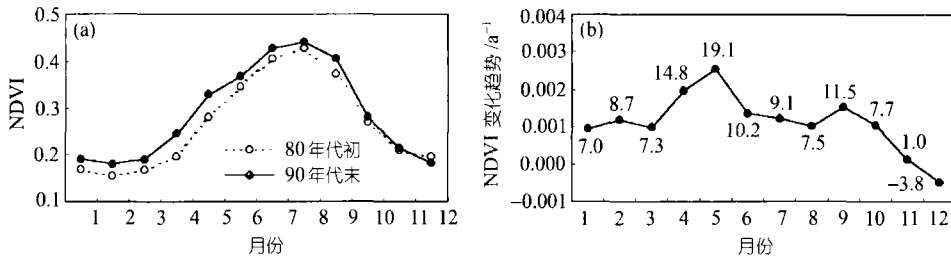


图 4 我国植被活动的季节变化

(a) 80 年代初(1982~1984 年)与 90 年代末(1997~1999 年)全国 NDVI 月平均值的季节变化。(b) 18 年来我国月 NDVI 的变化趋势(月 NDVI 对 18 年的回归直线斜率)及各月对 NDVI 变化的贡献率(%). 该值为正值时, 表明 18 年来该月的 NDVI 呈增加趋势. 值越大, 增加越显著; 反之, 当该值为负值时, 该月的 NDVI 呈减少趋势

80 年代初, 尤其是上半年的增加尤为显著.

为了进一步分析不同月份和季节对全年 NDVI 增加的贡献, 图 4(b)显示 18 年来各月份的月 NDVI 变化率, 即 18 年来月 NDVI 值对年份的回归直线斜率. 可以看出, 除 12 月份外, 其他各月份的趋势都是正值, 即 NDVI 呈增加趋势, 4 和 5 月份趋势最大, 即增加趋势最显著. 这也表明, 我国春季的 NDVI 增加最显著. 12 月份我国平均 NDVI 呈减小趋势. 图中各月的数值表示该月 NDVI 变化的量占年 NDVI 变化中的百分比, 即表示该月对年 NDVI 变化趋势的贡献. 图中显示, 5 月份最大, 占总增加量的 19.1%, 其次是 4 月份, 为 14.8%. 春季(3~5 月)占总增加量的 41.2%, 夏季(6~8 月)占 26.8%, 秋季(9~11 月)占 20.2%. 冬季(12 至翌年 2 月)的植被生长只发生在我国南方, 仅占 11.9% (其中 12 月为-3.8%). 可见, 我国 NDVI 的增加主要发生在春季, 其次是夏季. 这与 Zhou 等人^[19]和 Los 等人^[17]得出的春季提前是北半球植被活动增强的主要原因的结论一致.

我国 NDVI 的增加与气候有着密切的关系^[21,29,31]. 为了分析 NDVI 变化与气候变化的关系, 图 5 给出相对应的 18 年来我国年均温和年降水量的变化曲线. 18 年来, 我国的年平均温度虽然有所波动, 但增加趋势十分明显, 年平均增加 0.062℃, 即过去近 20 年中, 增加了约 1.2℃. 这比世界上其他地区的增加更显著^[32]. 降水的年际变化波动较大, 没有明显的趋势.

相对于气候的年际变化而言, 气候的季节变化对植被生长的影响更直接^[21], 因此, 我们对不同季节 NDVI 以及相对应的温度和降水的季节变化进行了分析(图 6). 图 6 显示春季是我国 NDVI 增加最显著的季节, 增加速率(直线斜率)为 0.0018 ($R^2 = 0.40, P = 0.005$), 夏季为 0.0012 ($R^2 = 0.35, P$

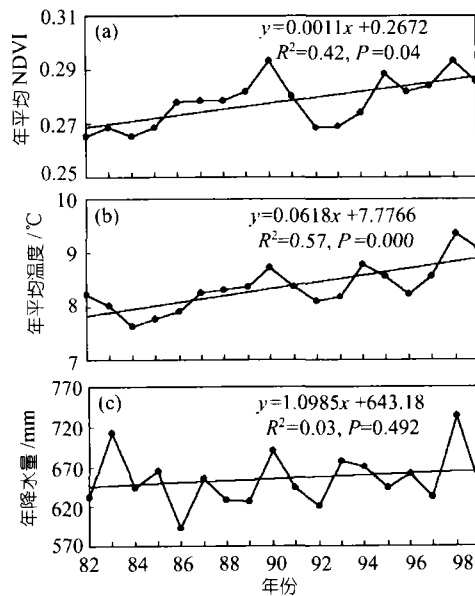


图 5 1982~1999 年我国年平均 NDVI ((a))、年平均温度((b))以及年降水量((c))的年际变化

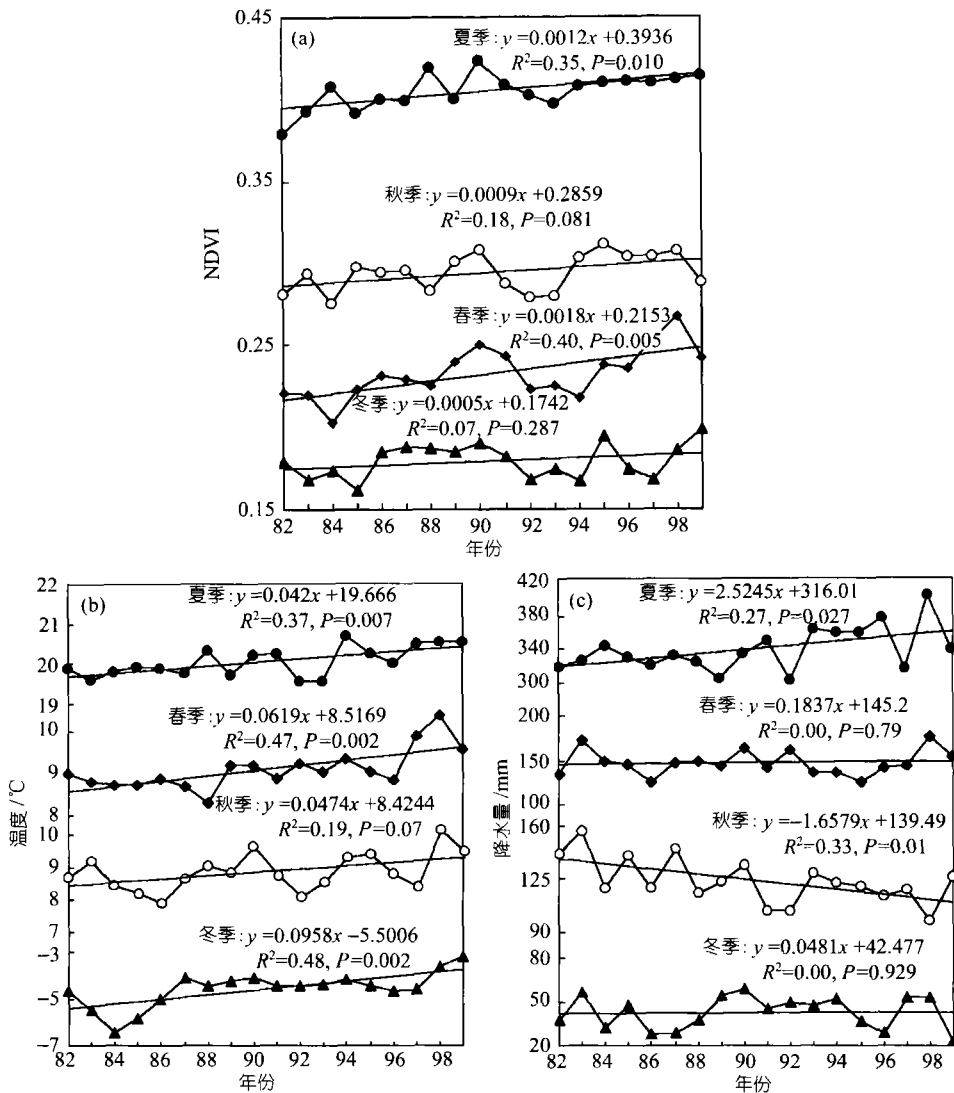


图 6 1982~1999 年间我国不同季节 NDVI ((a))、年平均温度((b))以及年降水量((c))的年际变化

= 0.010), 秋季 0.0009 ($R^2 = 0.18, P = 0.081$), 冬季增加不显著 ($P = 0.287$)。但相对应的, 我国温度增加最显著的季节是冬天, 为 $0.096^\circ\text{C}/\text{年}$; 其次为春季, 为 $0.062^\circ\text{C}/\text{年}$; 夏秋季温度增加幅度相似。

值得强调的是, 我国的降水变化格局在不同季节有不同的表现。如前所述, 虽然我国降水的年际变化无明显趋势, 但季节变化趋势较为明显: 过去 18 年我国夏季降水明显增加 ($R^2 = 0.27, P = 0.027$), 尤其是进入 90 年代以后, 增加趋势尤为显著; 秋季降水明显减少 ($R^2 = 0.33, P = 0.010$), 春季降水变化不明显。也就是说, 我国夏季降水显著增加, 而秋季降水减少了因夏季增加的部分, 从而维持全年的降水基本保持不变。这种降水格局对我国 NDVI 的增加十分有

利。在植被生长季节, 水热同步增加显然能加速植被生长, 这是我国气候变化与植被生长关系的一大特点。另外, 虽然秋季降水有所减少, 但植被本身的生长已进入晚期或停止期, 因此, 降水的减少可能对植物的生长影响较小。

2.3 NDVI 变化的空间分布及其可能原因

尽管我国 NDVI 呈较明显的增加趋势, 但存在较大的空间异质性。图版 II 的上图(附本刊后, 下同)表示各象元 18 年来 NDVI 的变化趋势(斜率), 图版 II 的下图显示显著性水平的空间分布。可以看出, 在我国东部的农业区(华北平原、东北平原、长江流域的部分地区)、受西南季风影响显著的藏东南、云南西南部以及新疆南疆(主要是山区和农业区)等地区, NDVI 增加显著; 而在长江三角洲、珠江三角洲、云南高原、青藏高原腹地等地 NDVI 呈下降趋势。尤其值得提及的是, 图版 II 清楚地显示, 新疆天山地区的 NDVI 增幅十分显著, 为全国增幅最大的区域之一。如下文所述, 关于该地区及西北地区生态环境及植被覆盖变化问题, 施雅风等人^[33~35]最近明确提出了自 80 年代以来我国西北气候由暖干向暖湿转型的观点。图版 II 的结果支持了这一观点。

为了分析各省区尺度的 NDVI 大小及其变化, 表 1 列出各省区、直辖市的年 NDVI 均值及其变化趋势(NDVI 值对年份的直线斜率)和 NDVI 变化率, 并按 NDVI 变化率对各省区进行排序。可以看出, 与图版 II 趋势一致, 我国东南沿海各省、市、区的 NDVI 数值较大, 西部较小, 新疆仅为 0.74, 是最小的省区。最大的为云南和海南, 分别为 5.22 和 5.20, 这两个省位于我国南亚热带/热带区域, 植被覆盖程度高。另一方面, NDVI 的变化趋势也有由东南向西北减小的趋势, 但城市化显著的上海为负值(即 NDVI 在减小)。

我们分析了表 1 中列出的各省区单位面积年 NDVI 变化率的基本特点和可能的原因。

(1) 上海、浙江、贵州、福建、广东、广西、黑龙江等地为负值或增加较小($< 5\%$)。这些地区的大部分主要是由于城市化过程导致 NDVI 下降和增幅较小, 但在贵州, 气候变化可能是主要原因。在黑龙江, 可能与森林砍伐^[36]以及 1987 年的特大森林火灾有关。

(2) 山东、河南、河北、安徽等农业大省 NDVI 增加速率较大, 为 10%以上。近 20 多年来, 我国主要农业产区的粮食产量显著增加是个不争的事实。虽然粮食产量与种植类型和种植面积、集约程度等有关, 但在很大程度上能够反映植被的覆盖状况^[37]。我国华北和东北地区显著增加的 NDVI 与本地区的粮食总产量的增加是十分一致的。例如在过去的 20 多年里, 华北地区的粮食总产量增加了 40%^[38]。

(3) 我国西部的新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙古等省区增幅显著($> 7\%$), 其中, 新疆增加速率高达 26.8%。这些地区的气候变化, 尤其是夏季降水的增加(图 6(c))可能是其主要的的原因之一。分析西北地区的降水资料表明, 过去 20 年, 该地区的夏季降水明显增加($r = 0.32$)。这种水热变化同步的结果促进了植被的生长。另外, 部分地区人工灌溉导致人工绿洲的形成^[39]以及春季提前也可能是主要原因之一。新疆显著的 NDVI 增幅也可能部分来自该地区较小的 NDVI 基数(年 NDVI 均值仅为 0.74, 表 1)和 NDVI 初期值的作用。我国的西部地区大都为牧区, 因此 NDVI 增加这一事实说明, 在这些地区, 气候变化和人工农业绿洲造成的正面影响可能大于由放牧引起的负面影响。

关于我国西部 NDVI 在增加的结果得到了许多研究的印证。如钟德才^[40]通过分析近 20 年

的地面调查资料、航空照片以及 TM 卫星影像资料,发现我国的现代沙漠以平均每年 445 km^2 的速度在向草原化和绿洲化方向发展. 吴薇^[41]也指出,自 80 年代后,我国沙漠化极为严重的毛乌素地区沙漠化趋势得到了遏制,沙漠化面积有所减少. 基于遥感数据的分析也认为内蒙古地区的植被生产力在增加^[42]. 施雅风等人^[33-35]最近更是从历史、近代和目前西北地区(尤其是新疆地区)的气候变化的分析结果中,得出一个重要观点:80 年代以来,我国西北地区的气

表 1 我国部分省区 1982~1999 年单位面积年 NDVI 均值、年 NDVI 变化趋势、年 NDVI 变化率以及按 NDVI 变化率所进行的排序(由大变小)

省市区	排序	年 NDVI 均值	NDVI 变化趋势	年 NDVI 变化率/%
新疆	1	0.74	0.011	26.8
山东	2	3.59	0.032	16.0
河南	3	3.86	0.031	14.5
河北	4	3.58	0.026	13.1
安徽	5	3.95	0.028	12.8
台湾	6	4.82	0.030	11.2
北京	7	2.13	0.013	11.0
海南	8	5.20	0.031	10.7
辽宁	9	3.72	0.020	9.7
江苏	10	3.94	0.021	9.6
甘肃	11	1.98	0.010	9.1
湖北	12	4.08	0.020	8.8
青海	13	2.10	0.010	8.6
湖南	14	4.02	0.018	8.1
宁夏	15	2.07	0.009	7.8
内蒙古	16	2.41	0.010	7.5
陕西	17	3.59	0.013	6.5
四川	18	4.07	0.014	6.2
江西	19	4.39	0.015	6.2
吉林	20	3.86	0.013	6.1
西藏	21	3.85	0.012	5.6
山西	22	3.25	0.010	5.5
云南	23	5.22	0.016	5.5
天津	24	3.03	0.009	5.3
广西	25	4.45	0.011	4.4
广东	26	4.51	0.011	4.4
黑龙江	27	3.84	0.009	4.2
福建	28	4.99	0.006	2.2
贵州	29	4.00	0.004	1.8
浙江	30	4.72	-0.003	-1.1
上海	31	3.88	-0.009	-4.2

候出现由暖干向暖湿转变的强劲信号, 其结果是导致我国西北地区过去的 10 多年里降水量、冰川消融量、径流量增加, 不少湖泊水位上升, 植被改善等. 最近完成的我国西部环境演变的综合评估结果也表明西部的植被覆盖在增加^[43].

3 结语

如上文所述, 过去近 20 年我国的 NDVI 在大多数地区都呈增加趋势, 表明我国的植被活动在增强, 这与近年来一些报道中所说的我国植被状况严重恶化的情况有所不同. 确实, 在我国的一些地方, 由于城镇化和人为过度利用土地(如过度放牧)导致植被状况恶化, 但从总体上看, 我国植被的覆盖状况与 80 年代初相比有所改善. 这与全球、尤其是北半球显著增加的植被覆盖的大趋势是一致的^[14-18,23]. 例如, Zhou 等人^[19]报道北半球 NDVI 增加的面积高达 61%.

总结 18 年来我国 NDVI 的变化趋势, 有如下特点:

(1) 18 年来, 我国的植被活动显示了增强的趋势. 与 80 年代初相比, 全国植被地区的面积增加了 3.5%, 植被稀少地区的面积减少了 18.1%, 全国单位面积年 NDVI 增加了 7.4%.

(2) NDVI 变化的地区性差异较大. 东部沿海地区呈下降趋势或变化不明显, 农业产区增加显著, 西部地区大都呈增加趋势.

(3) 生长季节的延长和生长加速是我国 NDVI 增加的主要原因, 而气候变化, 尤其是温度上升和夏季降水量的增加可能是 NDVI 增加的主要驱动因子之一.

(4) 农业区 NDVI 显著增加表明, 农业科技进步是导致该地区 NDVI 增加的重要因子之一, 城镇化过程是东南沿海地区 NDVI 下降或变化不明显的可能因素.

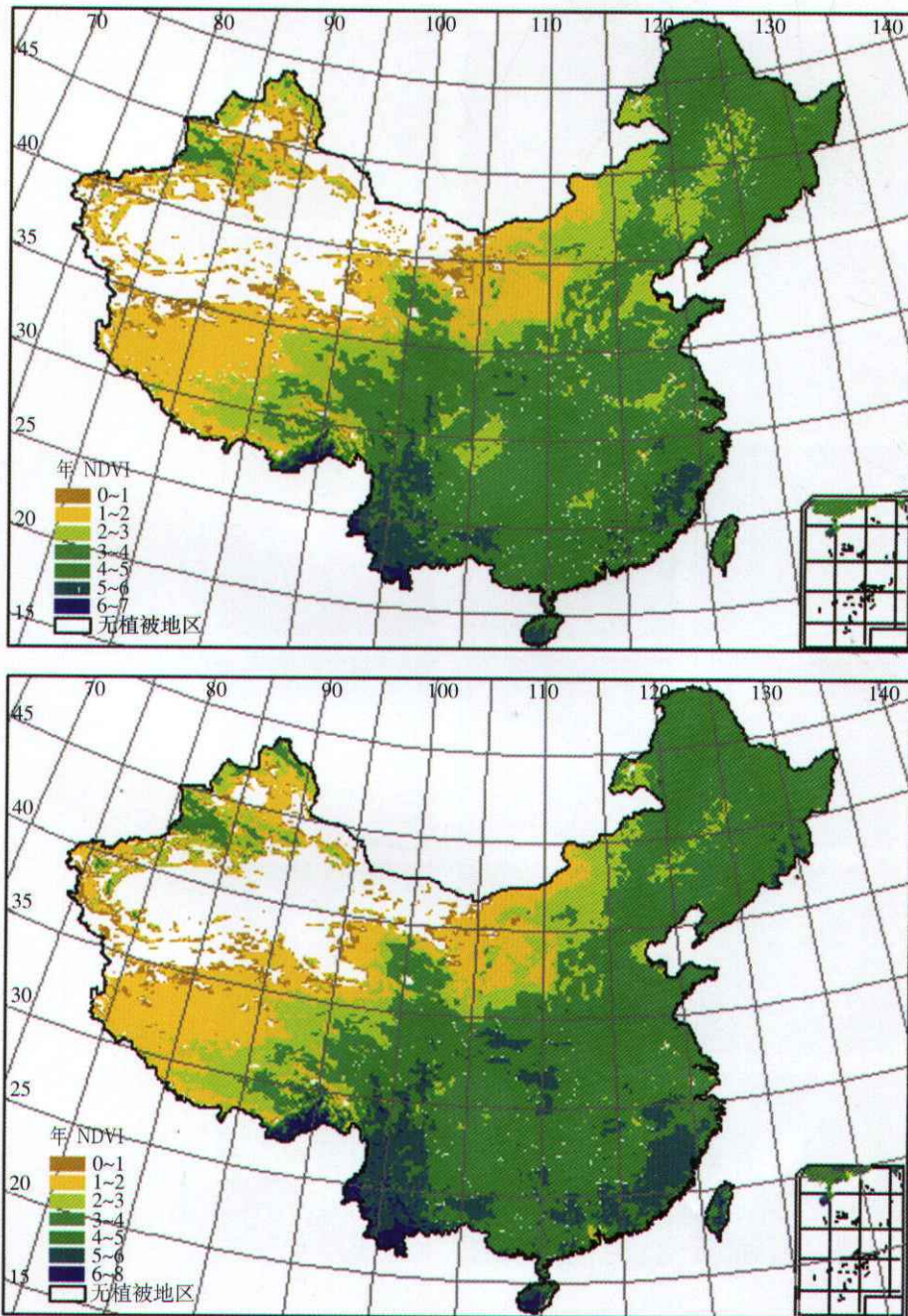
(5) 上述变化都可找到相对应的气候变化或人工影响的信号. 最近的地面观测、遥感研究、气候变化研究等都支持本文的西北地区 NDVI 在增加的结论, 其中, 施雅风等人^[40-42]提出的西北气候由暖干向暖湿转型的观点是该结论的最有力印证.

参 考 文 献

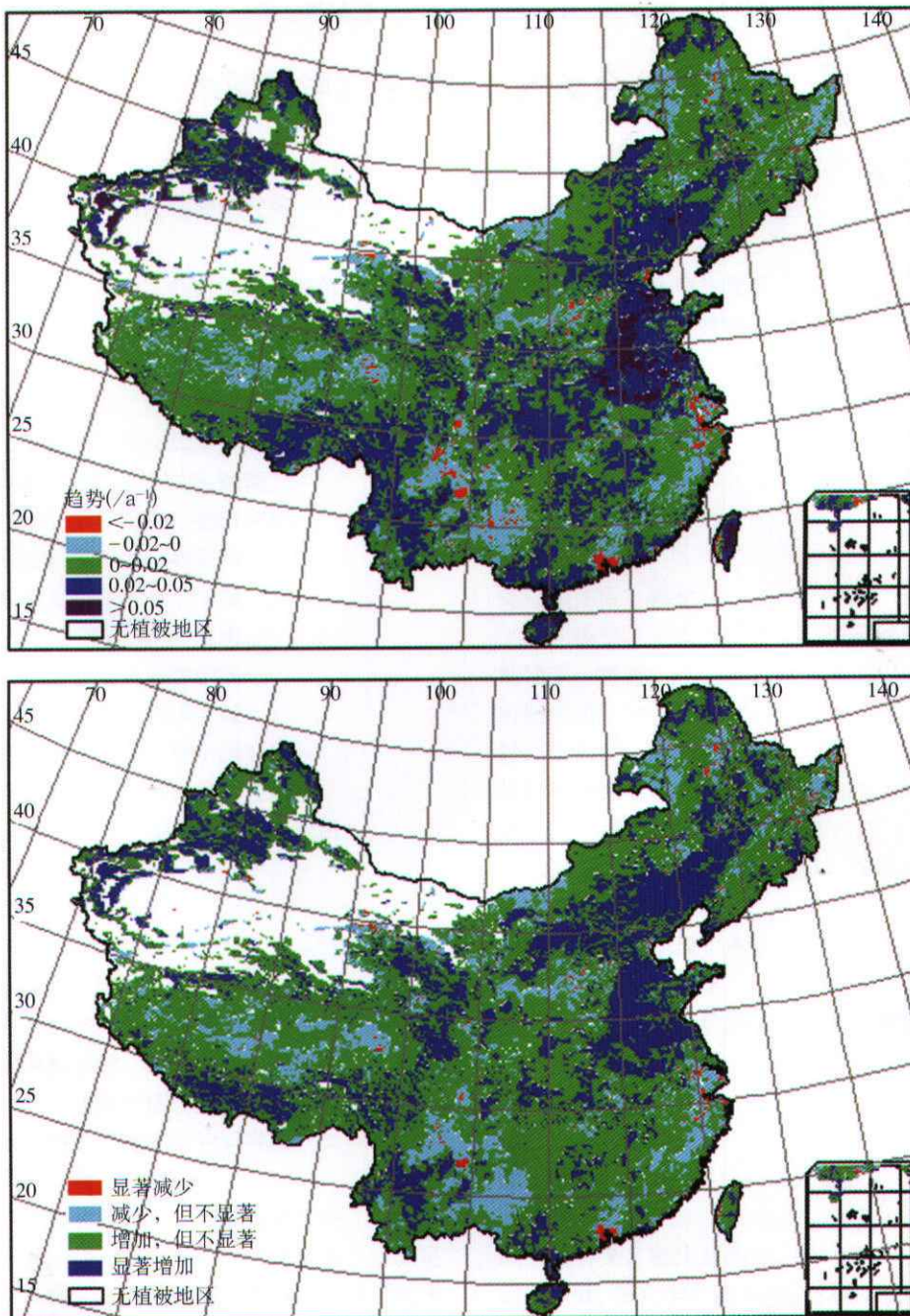
- 1 Zhang P, Shao G F, Zhao G, et al. China's forest policy for the 21st century. *Science*, 2000, 288: 2135
- 2 张新时, 李 博, 史培军. 南方草地资源开发利用对策研究. *自然资源学报*, 1998, 13: 1~7
- 3 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. *中国科学, D 辑*, 2002, 32: 1031~1040
- 4 Houghton R A. Temporal patterns of land-use change and carbon storage in China and tropical Asia. *Science in China, Series C*, 2002, 45(Supp.): 10~17
- 5 Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation in inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382: 146~149
- 6 Ciais P, Peylin P, Bousquet P. Regional biospheric carbon fluxes as inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Ecol Appl*, 2000, 10: 1574~1589
- 7 Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96: 9701~9704
- 8 Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659
- 9 Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320~2322
- 10 Pacala S W. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292: 2316~2320

- 11 Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234 ~ 240
- 12 Schimel D, Melillo J, Tian H Q, et al. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 287: 2004 ~ 2006
- 13 Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biol*, 2003, 9: 536 ~ 546
- 14 Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981~1991. *Nature*, 1997, 386: 698 ~ 702
- 15 Fang J Y, Piao S L, Field C, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1: 293 ~ 297
- 16 Myneni R B, Dong J, Tucker C J, et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 14784 ~ 14789
- 17 Los S O, Collatz G J, Bounoua L, et al. Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature, and precipitation. *J Climate*, 2001, 14: 1535 ~ 1549
- 18 Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude NDVI and growing season trends from 1982 to 1999. *Int J Biometeorol*, 2001, 45: 184 ~ 190
- 19 Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J Geophys Res*, 2001: 106 (D17): 20069 ~ 20083
- 20 Zhou L M, Kaufmann R K, Tian Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of vegetation greenness and climate between 1982 and 1999. *J Geophys Res*, 2003, 108 (D1), 10.1029/2002JD002510
- 21 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Interannual variations of monthly and seasonal NDVI in China from 1982 to 1999. *J Geophys Res*, 2003, 108, No. D14, 4401, doi: 10.1029/2002JD002848
- 22 Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, et al. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of United States. *Ecology*, 1997, 78: 953 ~ 958
- 23 Slayback D, Pinzon J, Los S O, et al. Northern hemisphere photosynthetic trends 1982~1999. *Global Change Biol*, 2003, 9: 1 ~ 15
- 24 史培军, 宫 鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京: 科学出版社, 2000. 67 ~ 96
- 25 史培军, 李晓兵, 周武光. 利用“3S”技术检测我国北方气候的植被响应. *第四纪研究*, 2000, 20: 220 ~ 228
- 26 李克让, 陈育峰, 黄 玫, 等. 气候变化对土地覆盖变化的影响及其反馈模型. *地理学报*, 2000, 55: 57 ~ 63
- 27 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. *第四纪研究*, 2001, 21: 294 ~ 302
- 28 香 宝, 刘纪远. 东亚土地覆盖动态与季风气候年际变化的关系. *地理学报*, 2002, 57: 39 ~ 46
- 29 龚道溢, 史培军, 何学兆. 北半球春季植被 NDVI 对温度变化响应的区域研究. *地理学报*, 2002, 57: 505 ~ 514
- 30 Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 1435 ~ 1445
- 31 Piao S L, Fang J Y, Chen A P. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate change in China. *Acta Bot Sin*, 2003, 45: 269 ~ 275
- 32 IPCC. *Climate change 2001: Impact, adaptation, and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 33 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24: 219 ~ 226
- 34 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23: 152 ~ 164
- 35 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景. *科技导报*, 2003, 2: 54 ~ 57
- 36 Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, et al. Characterization of changes in land cover and carbon storage in Northeastern China; an analysis based on Landsat TM data. *Science in China, Series C*, 2002, 45(Supp.): 40 ~ 47
- 37 Malmström C M, Thompson M V, Juday G P, et al. Interannual variation in global-scale net primary production: testing model estimates. *Global Biogeochem. Cycl*, 1997, 11: 367 ~ 392

- 38 中国农业年鉴编委会. 中国农业年鉴 1999. 北京: 农业出版社, 1999
- 39 张新时. 天山北部山地-绿洲-过渡带-荒漠系统的生态建设与可持续农业范式. 植物学报, 2001, 43: 1294 ~ 1299
- 40 钟德才. 中国现代沙漠动态变化及其发展趋势. 地球科学进展, 1999, 14: 230 ~ 234
- 41 吴 薇. 近 50 年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究. 中国沙漠, 2001, 21: 164 ~ 169
- 42 Runnström M C. Is northern China winning the battle against desertification? Satellite remote sensing as a tool to study biomass trends on the Ordos plateau in semiarid China. *AMBIO*, 2000, 29: 468 ~ 476
- 43 秦大河主编. 中国西部环境演变评估(综合卷). 北京: 科学出版社, 2002



80 年代初(1982~1984, 上图)和 90 年代末(1997~1999, 下图)我国 3 年平均年 NDVI 的空间分布



18 年来我国 NDVI 变化趋势大小(上图)及其显著性水平(下图)的空间分布