

王箬, 赵天保, 侯美亭, 等. 2013. 21 世纪初中国北方地区植被变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 156–164, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11026. Wang Zheng, Zhao Tianbao, Hou Meiting, et al. 2013. Vegetation index trends for the northern part of China at the beginning of the 21st century [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 156–164.

21 世纪初中国北方地区植被变化特征分析

王箬¹ 赵天保¹ 侯美亭^{1,2} 延晓冬^{1,3}

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

³ 北京师范大学, 北京 100875

摘 要 利用增强型植被指数 (EVI) 作为植被活动的指标, 用 MODIS-EVI 时间序列数据定量分析了 2000~2009 年间中国北方地区 EVI 的变化规律。结果表明: 1) 21 世纪初中国北方地区植被覆盖总体改善, 局部退化, 10 年来区域年平均 EVI 增加 5.97%; 2) 逐季节平均 EVI 均呈现上升趋势, 春季、秋季上升幅度小, 夏季、冬季上升幅度大; 3) 中国北方地区植被稀少的区域呈减少趋势, 同时单位面积 EVI 增加, 植被生长更加茂盛; 4) 中国北方地区 EVI 变化空间异质性大。东北平原、华北平原、黄土高原和新疆农业区显著增加, 东北和西部部分地区植被退化。

关键词 植被覆盖变化 增强型植被指数 (EVI) 遥感数据

文章编号 1006-9585 (2013) 02-0156-09

中图分类号 P942

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11026

Vegetation Index Trends for the Northern Part of China at the Beginning of the 21st Century

WANG Zheng¹, ZHAO Tianbao¹, HOU Meiting^{1,2}, and YAN Xiaodong^{1,3}

¹ Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

³ Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)-Enhanced Vegetation Index (EVI) data reported during 2000–2009 have been analyzed to study recent trends in vegetation greenness over the northern part of China at the beginning of the 21st century. The results showed that the afforestation area was larger than the degraded area in the northern part of China during the last 10 years, and the regional total mean annual EVI increased by 5.97%. Seasonal EVI increased significantly, and trends in summer and winter were larger than those in spring and autumn. The sparsely vegetated area declined, unit area EVI increased, and vegetation activity rose during the study period. In addition, EVI changes in the northern part of China exhibited relatively large spatial heterogeneity. The Northeast China Plain, North China Plain, Loess Plateau, and Xinjiang agriculture regions experienced marked increases, and part of Northeast China and West China experienced declining trends. Such patterns are attributed primarily to regional climate changes and human activities such as ecological construction and urbanization.

Keywords Vegetation change, Enhanced Vegetation Index (EVI), Satellite data

收稿日期 2011-02-23 收到, 2012-12-06 收到修定稿

资助项目 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 2012CB956203, 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955700、2010CB950900, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-202-3

作者简介 王箬, 女, 1983 年出生, 博士, 助研, 主要从事生态动力学和全球变化研究。E-mail: wz19832007@163.com

通讯作者 延晓冬, E-mail: yxd@bnu.edu.cn

1 引言

植被是陆地生态系统的主体,在保持水土、调节大气成分以及减缓温室气体浓度上升和维持气候稳定等方面具有不可替代的作用 (Solomon and Shugart, 1993),植被变化对全球能量循环及物质的生物化学循环具有重要的影响 (Liu et al., 2002; Piao et al., 2003),是全球变化研究的热点之一。遥感技术提供了长时间序列、大范围、高精度的地面植被信息,成为研究植被覆盖变化的利器,已有许多研究利用遥感数据对植被覆盖进行了监测分析和研究 (Myneni et al., 1997; Menzel and Fabian, 1999; Cao et al., 2003; 张佳华等, 2003; Zhou et al., 2003; 陈朝晖等, 2004; 丹利和谢明, 2009; Gobron et al., 2010)。随着 MODIS 的出现,发展了一个新的植被指数:增强型植被指数 EVI (Hutet et al., 1997)。EVI 具备了新的特征,其优势在于减少了由土壤背景和残留气溶胶造成的污染,不易饱和,可以容忍更大的冠层密度等 (Huet et al., 1997; 王正兴等, 2003; Zhang et al., 2004)。

中国北方 (东北、华北、西北) 是我国经济生活的关键区域,人口压力大,水资源匮乏,生态环境脆弱,其植被覆盖变化不仅受到气候因子的驱动,同时也受到人类活动的影响。21 世纪以来气候变化更加复杂,人类活动日益剧烈。一方面国家绿化和生态建设等大规模展开,例如退耕还林是迄今为止我国投资最大、涉及面最广、群众参与度最高的一项生态建设工程,根据国家林业局统计数据 (<http://www.forestry.gov.cn>[2012-12-01]),截至 2009 年工程已累计完成退耕地造林 $906.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,给工程重点区域内的植被覆盖带来巨大变化;但另一方面,伴随着经济的发展,城市建设和工业建设进程不断加快,建筑用地扩增,牧地林地退化,也使一些地区植被覆盖朝着恶性方向发展 (Houghton, 2002; Fang et al., 2004)。北方地区植被覆盖更加深刻地记录了人类活动的烙印,在深度、广度上都发生了巨大变化,需要及时分析中国北方地区植被变化的阶段性、时空性。本文利用较高精度的植被覆盖数据描述了中国北方地区植被覆盖总体特征,分析了 21 世纪初中国北方植被的时空变化特征,研究了不同等级植被变化特征和单位面积植被指数变化,可为生态工程建设和土地利用规划提

供参考。

2 数据及分析方法

2.1 研究区概况

中国北方地区包括东北、华北、西北地区 15 省 (直辖市、自治区) (黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、北京、天津、河北、河南、山东、山西、陕西、甘肃、宁夏、新疆、青海),位于 ($33.24^\circ\text{N} \sim 53.28^\circ\text{N}$, $75.14^\circ\text{E} \sim 132.58^\circ\text{E}$),人口占全国的 41.39%,粮食种植面积占全国 54.76%,棉花种植面积占全国 73.43%,油料种植面积占全国 42.82% (中国统计年鉴编委会, 2009),是我国粮食生产的关键区域,在中国的经济生活中起着举足轻重的作用。中国北方地区大部分属于温带大陆性气候区,夏季盛行东南季风,冬季受西伯利亚高压控制。利用欧洲航天局 (ESA) 2004~2006 年全球土地利用产品 (Arino et al., 2007),在原分类体系基础上,考虑中国北方地区具体情况,将土地利用类型分为农田、常绿林、落叶林等 9 类。

图 1 显示,研究区域东部以林地、农田为主,其间有一些草甸灌木分布,植被覆盖度较高。林地主要分布在内蒙古东北部、东北以及陕南等地区;农田主要分布在东北平原、华北平原、黄土高原和河谷区;山东、河北、河南、山西等大部分为农田用地。研究区中西部地区由于高海拔和气候条件限制,植被覆盖较低,内蒙古中西部、甘肃北部至新疆大部分地区为荒漠裸地区域。甘肃南部、青海东部南部和新疆南部有农田和草原灌木的存在。

2.2 数据及方法

本研究所用数据来自 NASA 地球观测系统 (EOS) 提供的 MODIS 陆地植被指数产品 MOD13A3。数据包含两种植被指数:归一化植被指数 (NDVI) 和增强型植被指数 (EVI),时间分辨率为月,空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。MODIS-EVI 经过了全面的大气校正,对残留的气溶胶做了进一步校正,纠正了土壤背景值的影响,不易饱和,可以容忍更大的冠层密度, Wang et al. (2010) 利用中国北方地区两个典型生态系统通量观测数据和两种植被指数进行对比分析,发现在研究时段内 MODIS-EVI 比 MODIS-NDVI 更不易受到雪盖背景的影响,并更好地表征了实际参加光合作用的植被部分,认为 MODIS-EVI 更适于描述中国北方植被

状况,故本文选用 2000~2009 年 MODIS13A3-EVI 数据,经过图像融合、投影转换、剪切等步骤生成中国北方 EVI 时序数据集。

本研究使用区域平均 EVI 表征当年植被平均生长状况;植被指数变化趋势 EVI_{trend} 表征研究时段内当地植被生长年际变化率,正值表示植被改善,负值表示植被恶化;参考 Myneni et al.(1997)关于无植被地区的定义,定义 EVI 小于 0.05 的地区为植被极稀疏地区或无植被地区,大于 0.05 的地区为有植被覆盖地区,在此标准下研究植被覆盖区面积变化及植被覆盖比值。

3 植被覆盖变化

3.1 植被整体分布特征

多年平均中国北方地区植被覆盖的空间分布如图 2 所示。北方 15 省面积辽阔,气候条件不同,植被覆盖空间差异显著。东部植被覆盖好、EVI 数值大,西部植被覆盖差、EVI 数值小,沿内蒙古—青海的东北—西南走向有一条较为明显分界线。分界线以东水热配置较好、气候适宜,植被呈现良好生长状态,内蒙古东北部、东北 3 省东部、山东、河南、

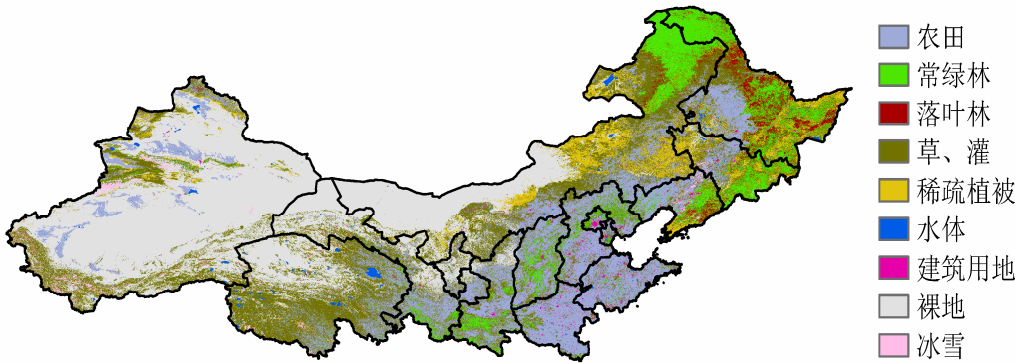


图1 中国北方地区土地利用类型
Fig. 1 Land use types of the northern part of China

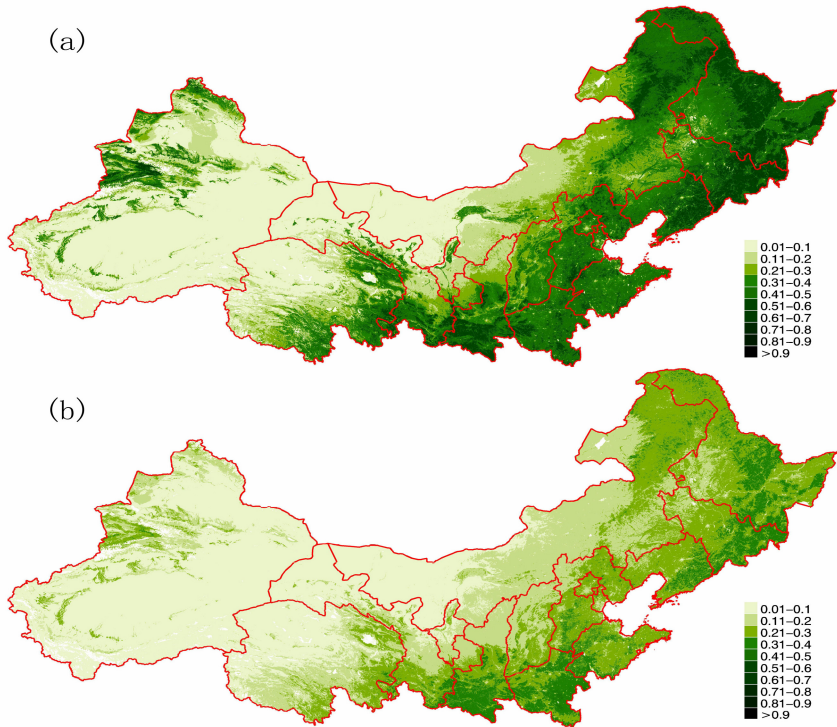


图2 2000~2009 年中国北方地区 (a) 夏季平均和 (b) 全年平均 EVI 空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of mean Enhanced Vegetation Index (EVI) over the northern part of China in (a) summer and (b) all year around from 2000 to 2009

山西一带年平均 EVI 达到 0.3 以上, 夏季达到 0.5 以上。分界线以西的大部分地区处于内陆干旱、半干旱气候条件下, 干旱少雨风大, 沙漠戈壁多, 不利于植被生长。内蒙古西南部、甘肃西北部、新疆大部分、青海西北部年平均 EVI 小于 0.05, 属于本文定义植被极稀疏地区或无植被地区。只有位于伊犁河谷的新疆塔城、伊宁等地水资源较为丰富, 有草原草甸和针叶林的分布, 以及青海湖周围高寒草原、高寒草甸的存在使当地植被指数略高。

多年平均中国北方地区植被覆盖的时间分布特征如图 3 所示。植被随着四季轮回而生长繁茂衰弱, 有明显的季节周期。中国北方地区夏季水热同期, 植被蓬勃生长 EVI 最高, 秋季温带森林落叶, 作物逐渐收割, 中国北方地区 EVI 整体下降, 只有陕西南部残留一部分亚热带森林。冬季植被覆盖稀少, 低 EVI 值多来源于城市绿化常绿植物以及由于

气候变暖而提前萌发的植被。春季冰川解冻植被开始复苏, EVI 又开始一轮增长。EVI 逐月变化图显示中国北方地区 3~7 月为 EVI 上升期, 8 月至次年 2 月为 EVI 下降期, 8 月为全年植被生长最旺盛的月份, 5~10 月为主要生长季节。

3.2 年际变化特征

区域平均 EVI_{mean} 反映了一年内中国北方地区植被的平均生长状况, 区域最大 EVI_{max} 反映了一年内中国北方地区植被在水热条件适宜气候下最优生长状况。图 4 显示了两者的年际变化特征。2000~2009 年无论是区域平均 EVI 还是区域最大 EVI 都呈现上升趋势, 表明中国北方地区植被活动在增强。10 年间区域平均 EVI 呈现 3 个不同时期, 2000~2001 年为稳定期, 2002~2008 年为明显上升期, 2009 年出现反复, 植被生长状况较差。10 年间区域平均 EVI 增幅为 0.009, 约为 5.97%。区域最大

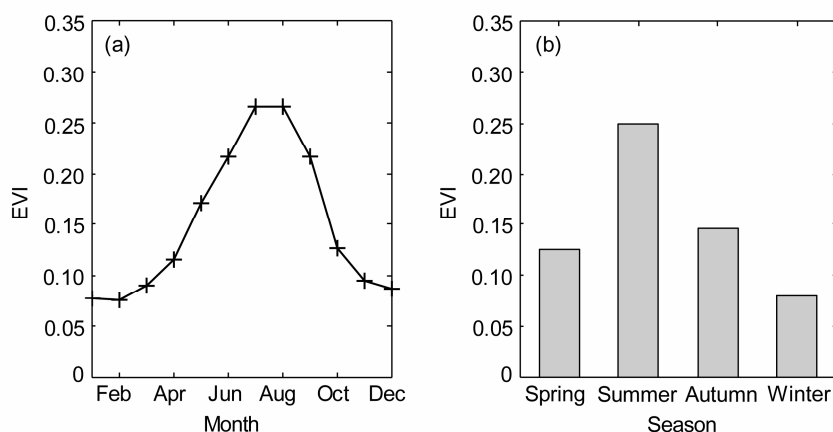


图 3 2000~2009 年中国北方地区平均 EVI 的 (a) 月变化和 (b) 季节变化

Fig. 3 (a) Monthly variation and (b) seasonal variation of mean EVI over the northern part of China from 2000 to 2009

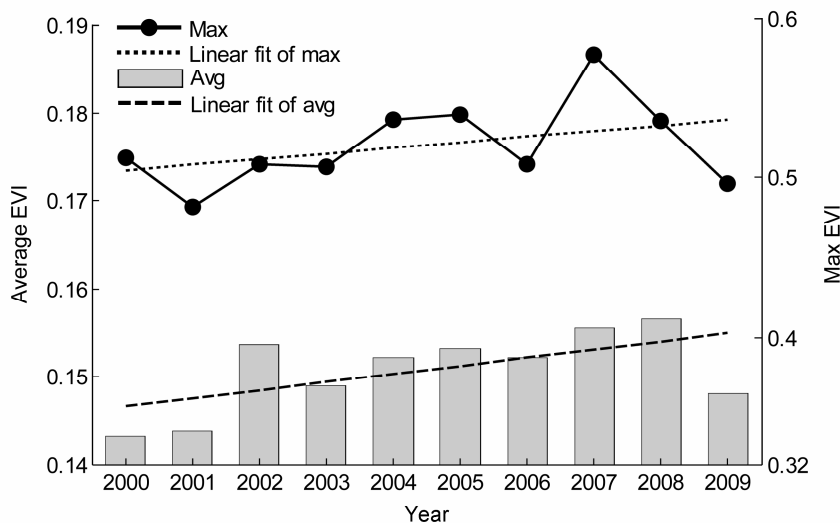


图 4 2000~2009 年中国北方地区区域平均 EVI 和区域最大 EVI 变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of mean EVI and max EVI over the northern part of China from 2000 to 2009

EVI 受到每年温度、水分、光照等配置的影响,在不断波动中上升。2004、2005、2007 年为较高时期,2001、2006、2009 年则为较低时期。10 年间区域最大 EVI 增幅为 0.035。

分析 2000~2009 年中国北方地区 EVI 的变化趋势(图 5),取 5%的显著性水平,10 年间植被显著改善的格点个数为 1618544,占区域面积的 36.19%,植被显著退化的格点个数为 577013,占区域面积的 12.9%,其余地区植被生长状态保持原来水平,无显著变化。可见 21 世纪最初 10 年间中国北方地区植被总体朝着改善方向发展的同时,部分地区植被产生退化或恶化。

中国北方地区 EVI 变化趋势显示了较大的空间异质性(图 5)。EVI 显著增加的区域主要包括东北平原、华北平原、新疆农业生产区以及黄土高原地区,这与退耕还林还草、重建生态家园、建设高效农业等工程密切相关。内蒙古中部退化草原也得到一定程度的恢复,但部分地区植被却进一步恶化,例如阿拉善高原、乌兰察布高原。EVI 显著减少的区域大多位于西部地区,但值得注意的是内蒙古东北部的常绿针叶林、黑龙江中部针阔混交林也出现了明显的退化趋势。EVI 增加、减少区域的空间异质性可能源于城市化、气候影响、生态建设工程、农业生产活动等多重因子的综合作用。

3.3 季节变化特征

植被生长、繁茂、衰弱有明显的季节周期,虽然每个季节植被生长条件不尽相同,但 2000~2009 年 10 年间中国北方地区植被春夏秋冬逐季节

平均 EVI 均呈现上升趋势(图 6)。其中春季、秋季上升幅度小,夏季、冬季上升幅度大。中国北方地区夏季植被生长活动增强直接导致夏季 EVI 上升幅度大,而冬季 EVI 上升幅度大则可能与气候变暖、春季提前,植被生长开始时间提前、结束时间延后有关系。

为了分析各个季节 EVI 增长的具体原因,图 7 给出中国北方地区 EVI 逐季节变化趋势的空间分布。图 7a 显示春季 EVI 在华北平原地区有明显增加,这可能与气候变暖、华北平原春耕提前密切相关。东北平原则以一年一熟作物为主,春季尚未开始耕作,所以气温升高对春季农业耕作影响不大。东北地区春季 EVI 呈现整体下降趋势,常绿针叶林、针阔混交林退化趋势明显。

中国北方地区植被生长最旺盛,植被指数最高的季节为夏季。东北平原、华北平原等主要粮食产区植被生长更加繁茂,东北大小兴安岭林区 EVI 数值可以达到 0.7 左右,陕西南部有林区存在, EVI 数值可达 0.5~0.7。西北部地区新疆西北部天山山麓、青海西南部及青海湖周围植被生长旺盛。10 年来夏季 EVI 变化趋势(图 7b)显示中国北方大部分地区植被生长增强,少部分呈现退化趋势的区域为东北林区、内蒙古部分草原地区、新疆北部。

图 7c 显示华北平原植被活动增强是 10 年来中国北方地区秋季 EVI 整体上升的主要原因,可能源于农作物增产、收割时间退后或种植方式改变。西部及北京、天津、河北地区植被略有下降。图 7d 显示华北平原、内蒙古部分草原以及新疆北部植被活

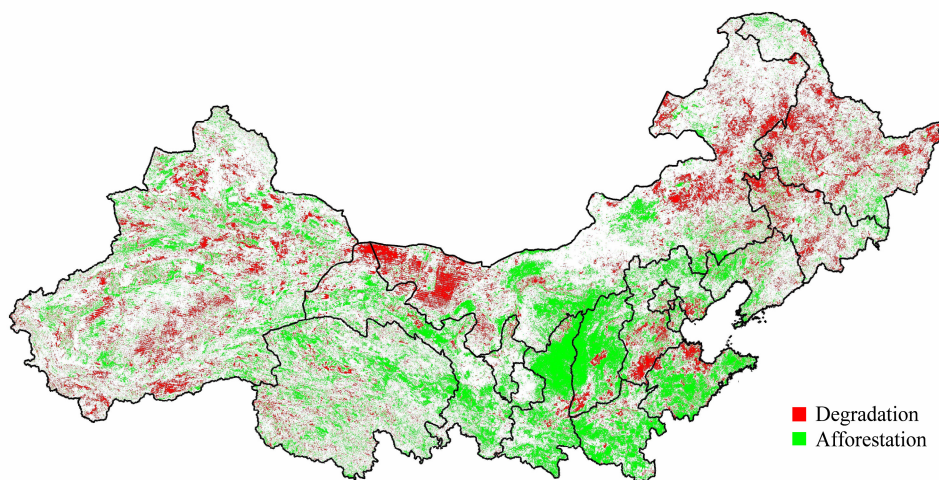


图 5 2000~2009 年中国北方地区 EVI 变化趋势 EVI_{trend} (白色区域植被变化未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验)

Fig. 5 Spatial distributions of the trends in EVI over the northern part of China from 2000 to 2009 (white area: not significant at 0.05 significance level)

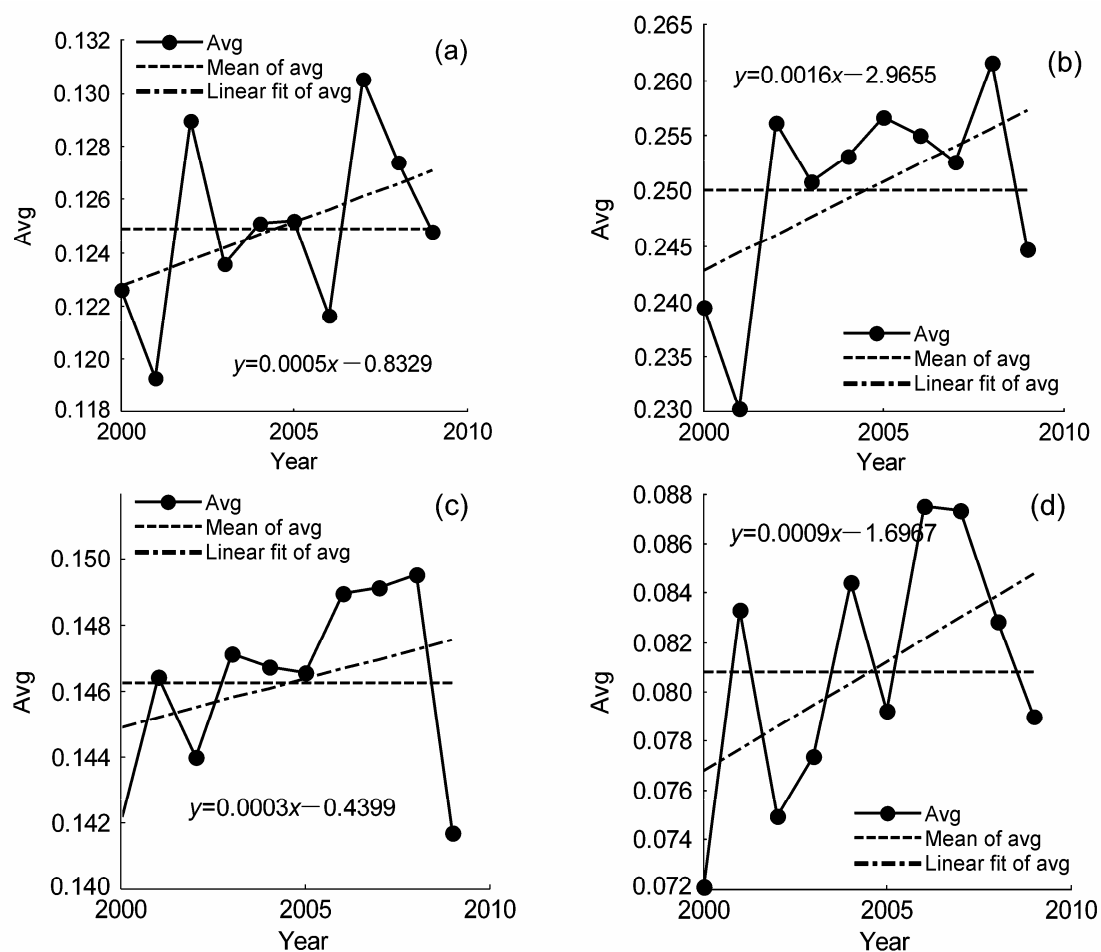


图6 2000~2009年中国北方地区平均 EVI (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of monthly EVI over the northern part of China from 2000 to 2009 in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter

动增强是 10 年来中国北方地区冬季 EVI 整体上升的主要原因。

3.4 不同等级植被变化特征

根据 3.2 节中的定义, 利用区域年平均植被指数 EVI_{mean} 的年际变化和季节变化可以表征中国北方地区整体的植被发展状况, 但平均 EVI 的使用也忽略了不同等级植被变化趋势。因为不同等级植被的变化趋势有可能与平均 EVI 的变化趋势不同甚至相反, 所以有必要将 EVI 分为不同等级考察中国北方地区植被变化。

本文定义 EVI 小于 0.05 的地区为植被极稀疏地区或无植被地区 (Myneni et al., 1997), 则可将年平均 EVI 分为 ≤ 0.05 、 $0.05 \sim 0.1$ 、 $0.1 \sim 0.2$ 、 $0.2 \sim 0.3$ 、 > 0.3 共 5 个等级, 以区分不同植被覆盖情况。其中前两个等级为植被稀疏区域, 第三和第四等级为植被一般生长区域, 第五等级为植被茂盛生长区域。图 8 给出了 2000~2009 年中国北方地区不同

等级植被所占比例变化趋势, 图中显示植被稀疏地区共占总面积 40% 左右, 植被一般生长区域约占 50% 左右, 植被茂盛生长区域占 5%~10%。

EVI 小于 0.05 的地区为植被极稀疏地区或无植被地区, 主要位于西部, 约占总面积的 20% 左右 (见图 9), EVI 在 $0.05 \sim 0.1$ 的地区是植被稀疏区多为荒漠草原等, 约占总面积 20% 左右, 10 年来在波动中有所下降。EVI 在 $0.1 \sim 0.3$ 的地区为农业生产区和草甸草原等自然植被类型, EVI 大于 0.3 的区域为林地或高效农业区, 植被覆盖好, 植被生长旺盛, 所占总面积比例在波动中上升。

定义中国北方地区总面积为单位 1, 使用区域年平均 EVI 除以植被覆盖面积百分比, 得到中国北方地区单位面积 EVI。图 10 中 2000~2009 年中国北方地区单位面积 EVI 呈现明显的上升趋势, 表明近 10 年间中国北方地区植被覆盖面积增加的同时, 单位面积 EVI 增加, 植被生长更旺盛。

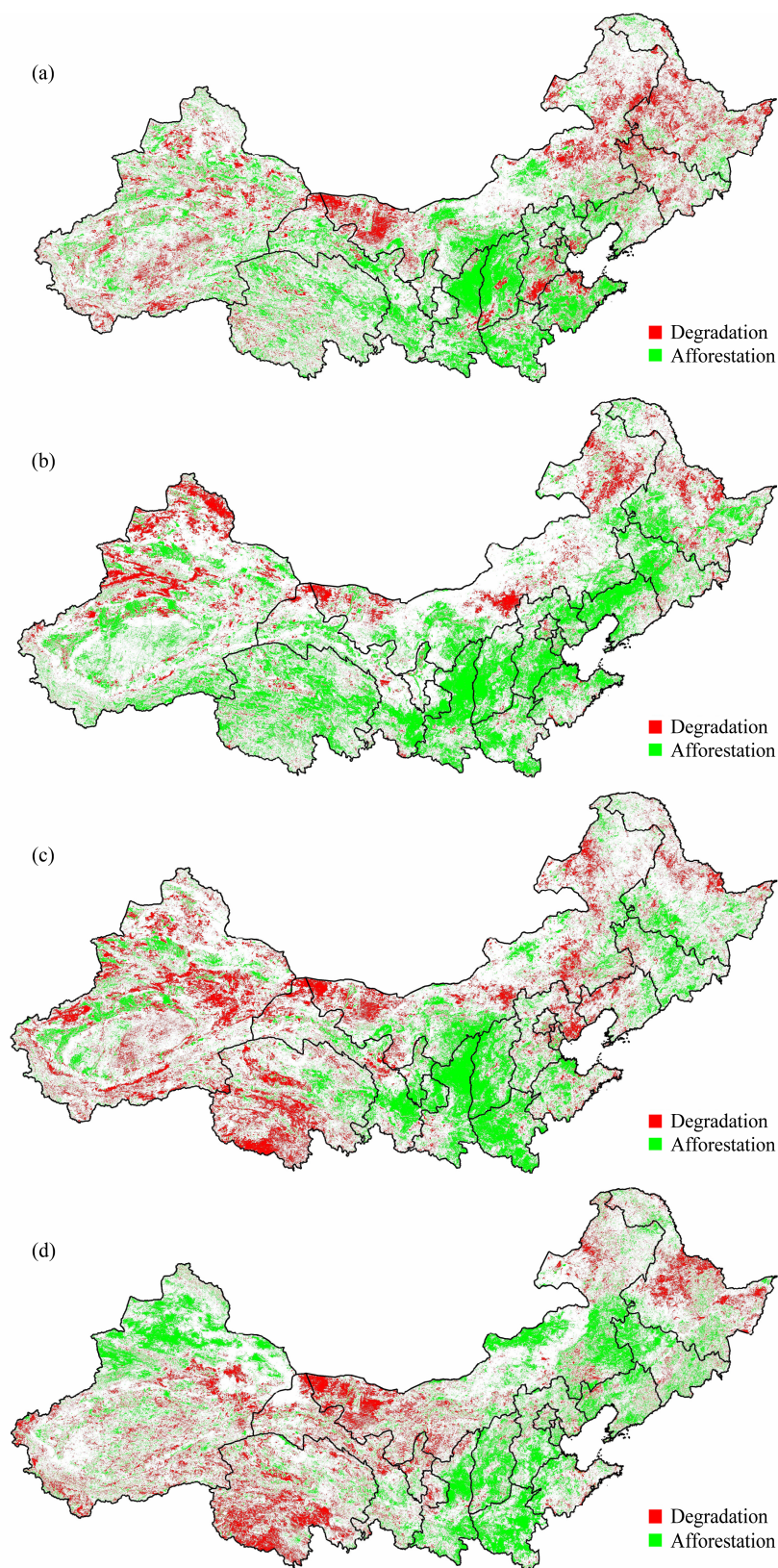


图7 2000~2009 年中国北方地区 EVI (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季变化趋势 EVI_{trend} (白色区域植被变化未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验)

Fig. 7 Spatial distributions of the trends in monthly EVI over the northern part of China from 2000 to 2009 (white area: not significant at 0.05 significance level) in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter

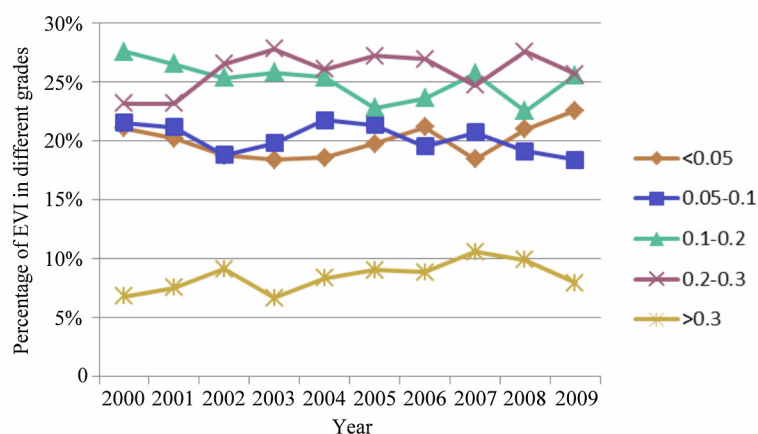


图8 2000~2009年中国北方地区不同等级植被所占比例变化趋势

Fig. 8 Variation characteristics of EVI in different grades over the northern part of China from 2000 to 2009

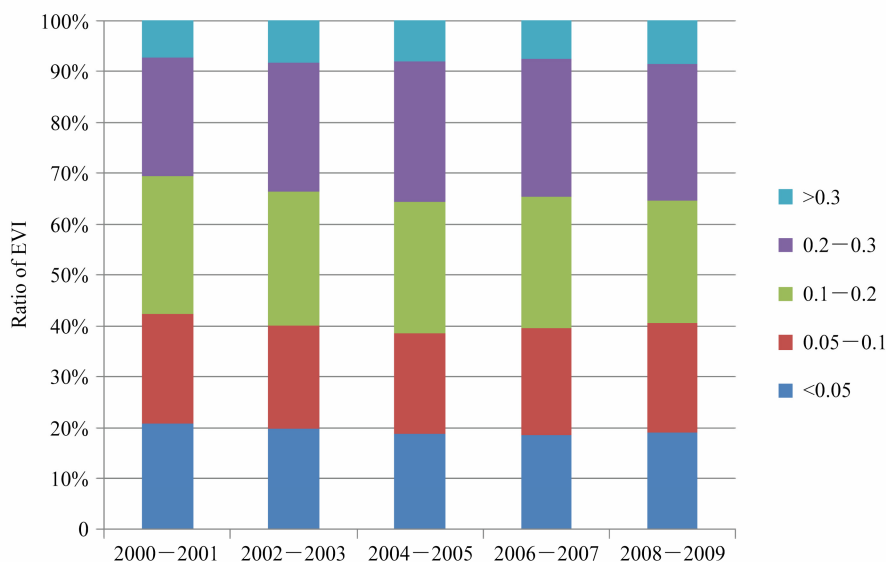


图9 2000~2009年中国北方地区不同时段不同等级植被比例

Fig. 9 Ratio of EVI in different grades over the northern part of China from 2000 to 2009

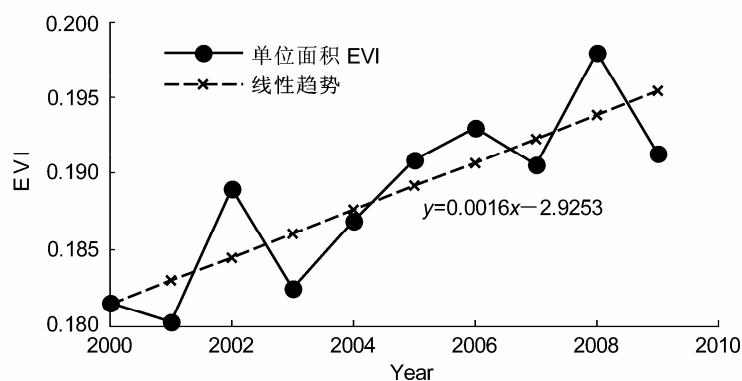


图10 2000~2009年中国北方地区单位面积 EVI 变化

Fig. 10 Variation characteristic of EVI per unit area over the northern part of China from 2000 to 2009

4 结论

在气候变化和人类活动的双重影响下，中国北

方地区的植被覆盖在 21 世纪最初 10 年呈现上升趋势，区域年平均 EVI 增加 0.009。东北平原、华北平原、黄土高原和新疆农业区显著增加，内蒙古东北部常绿针叶林、黑龙江中部针阔混交林退化和部分西

部地区植被退化,表明 EVI 变化趋势空间异质性大。

2000~2009 年中国北方地区植被覆盖的动态变化呈现了季节特征,虽然逐季节平均 EVI 均呈现上升趋势,但幅度并不相同。春季、秋季上升幅度小,夏季、冬季上升幅度大,分析其原因,夏季植被生长增强直接导致夏季 EVI 上升幅度大,而冬季 EVI 上升幅度大则可能与全球变暖后春季提前,植被生长时间提前有关系。2000~2009 年中国北方地区植被覆盖低的面积有减少趋势,植被覆盖好的面积有增加趋势,单位面积 EVI 增加,植被生长更旺盛。气温升高、降水变化是植被覆盖变化的重要原因,人类活动驱动下的农业生态工程同样也是植被变化的重要影响因素,21 世纪最初 10 年来中国北方地区植被覆盖变化特征分析表明,近年来政府倡导下进行的退耕还林还草等植被建设工作带来的生态效益正在不断呈现。

参考文献 (References)

- Arino O, Leroy M, Ranera F, et al. 2007. GLOBCOVER-A Global Land Cover Service with MERIS [C]// Proceedings of the ENVISAT Symposium. Montreux, Switzerland, 6pp.
- Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. 2003. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China [J]. *Global Change Biology*, 9 (4): 536-546.
- 陈朝晖, 朱江, 徐兴奎. 2004. 利用归一化植被指数研究植被分类、面积估算和不确定性分析的进展 [J]. *气候与环境研究*, 9 (4): 687-696.
- Chen Zhaohui, Zhu Jiang, Xu Xingkui. 2004. Recent research progress in uncertainties of the normalized difference vegetation index, land cover classification and vegetation fraction estimation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (4): 687-696.
- 丹利, 谢明. 2009. 基于 MODIS 资料的贵州植被叶面积指数的时空变化及其对气候的响应 [J]. *气候与环境研究*, 14 (5): 455-464.
- Dan Li, Xie Ming. 2009. The spatiotemporal variation of leaf area index in Guizhou and its response to climate based on MODIS data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (5): 455-464.
- Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. 2004. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982-1999 [J]. *Science in China (Ser. C)*, 47 (3): 229-240.
- Gobron N, Belward A, Pinty B, et al. 2010. Monitoring biosphere vegetation 1998-2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L15402, doi:10.1029/2010GL043870.
- Huet A R, Liu H Q, Batchily K, et al. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 59: 440-451.
- Houghton R A. 2002. Temporal patterns of land-use change and carbon storage in China and tropical Asia [J]. *Science in China (Ser. C)*, 45 (Suppl.): 10-17.
- Liu J Y, Liu M L, Deng X Z, et al. 2002. The land use and land cover change database and its relative studies in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 12 (3): 275-282.
- Menzel A, Fabian P. 1999. Growing season extended in Europe [J]. *Nature*, 397: 659.
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 386: 698-702.
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2003. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D14): 4401, doi:10.1029/2002JD002848.
- Solomon A M, Shugart H H. 1993. Vegetation dynamics and global change [M]// Cramer W P, Leemans R. Assessing Impacts of Climate Change Vegetation Using Climate Classification System. London: Chapman and Hall, 190-217.
- Wang Z, Xiao X M, Yan X D. 2010. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in northeastern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 1160-1167.
- 王正兴, 刘闯, Alfredo H. 2003. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI [J]. *生态学报*, 23: 979-987.
- Wang Zhengxing, Liu Chuang, Alfredo H. 2003. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 23: 979-987.
- 张佳华, 侯英雨, 毛飞, 等. 2003. 基于遥感的华北地区作物干旱时空监测研究 [J]. *自然灾害学报*, 12 (2): 255-259.
- Zhang Jiahua, Hou Yingyu, Mao Fei, et al. 2003. Study on spatial-temporal distribution of crop drought in North China based on remote sensing information [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 12 (2): 255-259.
- Zhang X Y, Fredl M A, Schaaf C B, et al. 2004. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid and high latitudes inferred from MODIS data [J]. *Global Change Biology*, 10: 1133-1145.
- 中国统计年鉴编委会. 2009. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社. China Statistical Yearbook Editorial Board. 2009. China Statistical Yearbook [M] (in Chinese). Beijing: China Statistics Press.
- Zhou L M, Kaufmann R K, Tian Y, et al. 2003. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D1), 4004, doi:10.1029/2002JD002510.