DOI：10.13745/j.esf.sf.2018.4.19

京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖状况的区域差异研究

李庆旭[1,2]， 张 彪[1,*]， 王 爽[1,2]， 谢高地[1,2]

1. 中国科学院 地理科学与资源研究所，北京 100101
2. 中国科学院大学，北京 100049

LI Qingxu[1,2]， ZHANG Biao[1,*]， WANG Shuang[1,2]， XIE Gaodi[1,2]

1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100101，*China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100049，*China*

LI Qingxu，ZHANG Biao，WANG Shuang，et al. Regional differences of vegetation cover in the Beijing－Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2015. *Earth Science Frontiers*，2018，25(5)：298-304

Abstract：Vegetation status represents the overall condition of regional ecological environment，hence vegetation coverage is often used to measure the effectiveness of ecological protection and restoration projects. Although numerous studies have reported the overall changes of vegetation coverage in the Beijing－Tianjin sandstorm source region，few studies have investigated the regional differences over the years. In this paper，we calculated the annual vegetation coverage from 2000 to 2015 in the Beijing－Tianjin sandstorm source region using MODIS data，emphasizing the regional variations of vegetation cover in different subzones through statistical and GIS technology. The results indicated that，during the study period，the annual vegetation coverage in the region increased from 35% to 45% with an average annual growth rate of 0.4%. Although vegetation coverage in the eight subzones presented similar growth trend，remarkable differences existed in the vegetation status and growth speed. The annual vegetation growth rates in the Jinbei mountain-hill and Yanshan mountain-hill-water-source-protection subzones exceeded 0.6%，however，lower than 0.2% annual growth rates were observed in the Otindag sandy land and Desert grassland subzones. In addition，higher degree of vegetation primarily distributed in the sandstorm source regions of Beijing，Chengde and Tianjin with Shuozhou and Zhangjiakou showing higher growth rates，whereas the rates were lower than 0.1% in Wulanchabu and Baotou. Approximately 51% Beijing－Tianjin sandstorm source region saw growth rate increasing in 2015 compared to 2000，while the remaining areas experienced decline in the mid and western districts. In conclusion，this study confirmed that significant vegetation improvement has been made in the Beijing－Tianjin sandstorm source region，however，some areas remain poorly covered，therefore more efforts should be directed to these areas towards ecological restoration.

Key words：vegetation cover；NDVI；regional difference；Beijing－Tianjin sandstorm source area

摘 要：植被覆盖状况是监测与表征区域生态建设成效的重要指标。以往研究注重区域植被覆盖状况的整体变化分析，对长时期区域内部植被覆盖变化及其差异研究较少。文中基于京津风沙源区遥感影像数据，采用 GIS 空间分析技术，重点评估了 2000—2015 年植被覆盖度的年际变化及其区域差异。研究结果表明，2000—2015 年京津风沙源区植被覆盖度变化为 35%～45%，且随年份变化呈波动增加趋

收稿日期：2018－03－07；**修回日期**：2018－03－15
基金项目：国家重点研发计划(2016YFC0503403)
作者简介：李庆旭(1981—)，男，博士研究生，主要从事生态系统服务与区域关系研究。E-mail：qingxulee@163.com
*通讯作者简介：张 彪(1980—)，男，副研究员，主要从事城市与区域生态学研究。E-mail：zhangbiao@igsnrr.ac.cn

势，年均增速为 0.4%（$P<0.05$），生态治理取得明显植被恢复成效。8 个治理分区植被覆盖均有所增加，但区域差异明显，晋北山地丘陵亚区和燕山丘陵山地水源保护亚区植被覆盖度年均增速超过 0.6%，浑善达克沙地亚区与荒漠草原亚区植被覆盖度年均增速不及 0.2%，这与区域地表组成和气候背景有关。从地市来看，北京、天津和承德植被覆盖度较高，但朔州和张家口植被覆盖度增速明显，而乌兰察布和包头植被覆盖度年均增速低于 0.1%。相比 2000 年，2015 年京津风沙源区有 51%的区域植被覆盖度增加，49%区域植被覆盖度未变或降低，主要集中在京津风沙源区的中部和西部县市（旗），未来生态治理过程中应加以重点关注。

关键词：植被覆盖；归一化植被指数；区域差异；京津风沙源区

中图分类号：X171.4；X87　**文献标志码**：A　**文章编号**：1005－2321(2018)05－0298－07

土地是人类赖以生存的物质基础和重要自然资源。1949 年以来由于人口数量持续增长以及土地资源的不合理利用，我国土地资源退化态势总体较为严重[1]。截至 2014 年，我国仍有荒漠化土地 261.16 万 km^2，沙化土地 172.12 万 km^2[2]。为遏制土地退化与生态环境恶化，我国相继实施了一系列重大生态保护与建设工程[3]。其中，京津风沙源治理工程是我国为遏制北京及周边地区土地沙化趋势、改善京津地区大气环境质量而实施的一项重大生态工程。京津风沙源治理一期工程（2001—2010 年）已于 2012 年结束，二期工程（2013—2022 年）也于同年开始实施，并将工程区范围由原来的 75 个县（旗、市、区）扩大至 138 个[4]。但是，生态建设工程实施时间长，投资规模大，涉及范围广，而生态系统恢复与演化也是一个漫长的过程，因此做好生态系统状况评估与生态恢复成效动态监测尤为重要[5-7]。石莎等[8]利用像元二分法对京津风沙源区 2001—2005 年植被恢复效果进行了野外调查；滑永春等[9]利用归一化植被指数（NDVI）监测分析了京津风沙源工程治理区 2000—2008 年荒漠化程度变化趋势；严恩萍等[10]采用 MODIS02B 数据源分析了 2000—2012 年京津风沙源重点治理区（山西和内蒙古境内共 48 个县）的植被覆盖度变化特征；吴丹等[11]从生态系统结构、质量和服务功能角度综合评估分析了 2000—2010 年京津风沙源治理的生态效应。但是这些研究均集中于京津风沙源治理工程期内的生态状况变化分析，缺少从较长时段区域内部植被变化特征及其差异的分析，因而对风沙源治理工程的分区施策指导性不足。本文基于京津风沙源区遥感影像数据，采用 GIS 空间分析技术，重点评估了 2000—2015 年植被覆盖度的年际变化及其区域差异，为京津风沙源治理二期工程的差异化措施及政策制定提供参考依据。

1　研究区概况

京津风沙源治理区（109°30′～114°20′E，38°50′～46°40′N）位于我国北方地区，西起内蒙古的达尔罕茂明安联合旗，东至河北省平泉县，南起山西省代县，北至内蒙古东乌珠穆沁旗，东西横跨近 700 km，一期工程范围涉及北京、天津、河北、山西和内蒙古 5 省（直辖市、自治区）75 个县，总国土面积 45.8 万 km^2，其中沙化土地面积 10.2 万 km^2[12]。京津风沙源区地貌由平原、山地和高原组成（图 1）。其中，京津市区为海河平原的一部分，其西部、西北、北部被太行山北端、燕山西部环绕，山地外侧为内蒙古高原。东部浑善达克沙地是锡林郭勒高原的重要组成部分，沙化土地广布；西部乌兰察布高原由阴山北麓的丘陵、地势平缓的凹陷地带及横贯东西的石质丘陵隆起带组成，境内多季节性河流；燕山山地和太行山地形起伏较大，地形雨较多，易造成水土流失。风沙源区整体上属于干旱与半干旱地区，多大风和沙尘暴天气，是京津地区风沙的主要来源。此外，内蒙古高原地带性土壤以黑钙土、栗钙土、棕钙土为主，燕山山地以石灰土、石质土为主。风沙源区植被类型复杂，内蒙古高原天然植被以冷蒿、大针茅、克氏针茅和短花针茅等灌草为主，人工植被以阔叶乔木和旱生灌木为主；燕山山地及太行山北部山地的天然植被以温带、暖温带落叶阔叶林为主，但现存植被多为次生杨桦林及荆条、胡枝子、山杏等针叶灌丛，人工植被以油松为主，高海拔地带以落叶松为主[8]。由于治理区面积广阔，地貌差异大，涵盖不同生物气候带和土壤类型区，为针对性开展生态治理与成效评估，一般分为荒漠草原亚区、典型草原亚区、浑善达克沙地亚区、大兴安岭南部亚区、科尔沁沙地亚区、农牧交错带草原亚区、晋北山地丘陵亚区和燕山丘陵山地水源保护区等 8 个亚区（图 1）[13]。

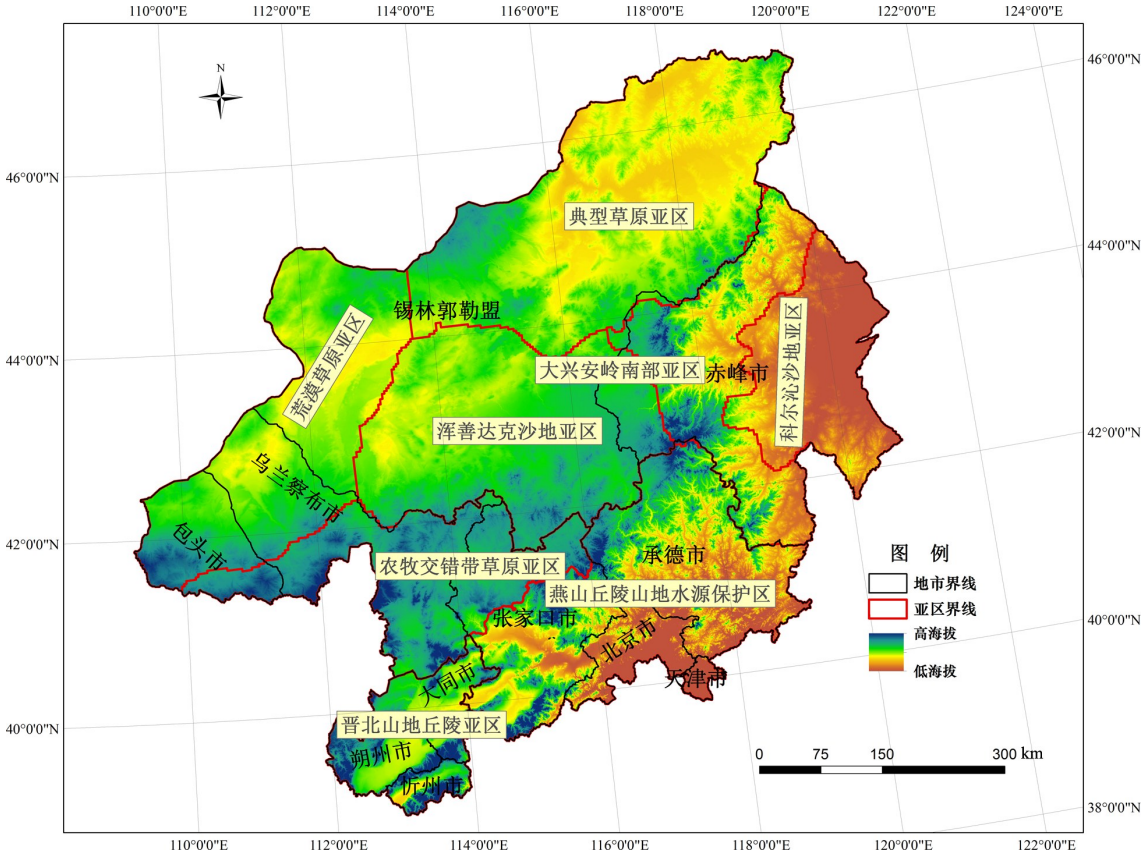


图 1 京津风沙源区海拔及区域组成

Fig.1 Elevation and subzones of the Beijing－Tianjin sandstorm source region

2 研究方法

植被是生态系统中连接土壤、大气和水分的自然纽带[14-15]，植被变化在一定程度上反映了土地覆盖及其生态状况变化[16-22]。植被覆盖度是一种基于归一化植被指数(NDVI)反映植被盖度信息的指标，能够在一定程度上弥补低覆盖度植被难以区分而高覆盖度植被易于饱和的不足，从而有效拉伸植被信息值域[23-24]。该研究中所使用的 NDVI 数据来自美国地球资源观测系统数据中心合成的、时间分辨率 16 d、空间分辨率 250 m 的 MOD13Q1 产品。该数据已经过几何精纠正、辐射校正、大气校正等预处理。本文首先对该数据集进行了 Savitzky-Golay 滤波[25]，以去除噪声干扰，然后利用 MRT 投影转换工具对 MODIS 数据进行投影和格式转化批处理，并采用最大值合成法[26]，依次合成获得 2000—2015 年 NDVI 数据，在 Arcgis10.0 软件里通过掩膜得到京津风沙源区不同年份 NDVI 数据。

植被覆盖度是衡量地表植被及区域生态状况的重要指标，指植被冠层的垂直投影面积与土地总面积之比，且与 NDVI 具有很好的相关性[27]。因此，基于归一化植被指数的植被覆盖度计算公式为[9]

$$CV=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \quad (1)$$

式中：CV 表示研究区栅格单元植被覆盖度，%；$NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 分别为栅格单元 NDVI 的最小值和最大值。

此外，为清晰反映不同区域植被覆盖度及其年际变化特征，采用 ArcGIS 10.0 软件的区域统计工具，计算同一区域内所有栅格单元植被覆盖度的平均值(公式(2))，并以 2000 年为参照年份，2015 年区域植被覆盖度与之差值代表变化值(公式(3))，并采用 SPSS 12.0 软件进行方差分析，以完成显著性检验。具体计算公式如下：

$$RCV=\frac{\sum_{i=1}^{n}CV_i}{n} \quad (2)$$

$$\Delta=RCV_{2015}-RCV_{2000} \quad (3)$$

式中：RCV 为区域植被覆盖度，%；i 为某一区域内的栅格单元($i=1,2,3,\cdots,n$)；Δ 为不同时间植被覆盖

度变化值；2015 和 2000 分别为评估年与参照年份。

3　结果与分析

该研究利用最大合成法逐年提取研究区 2000—2015 年 NDVI 最大值，然后计算该年份植被覆盖度，并统计出整个研究区平均值绘制年际变化曲线（图 2）。结果表明，京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖度变动在 35%～45%之间，与年份变化有显著相关性（$P=0.01$），且整体呈波动增加趋势，年均增速为 0.34%。

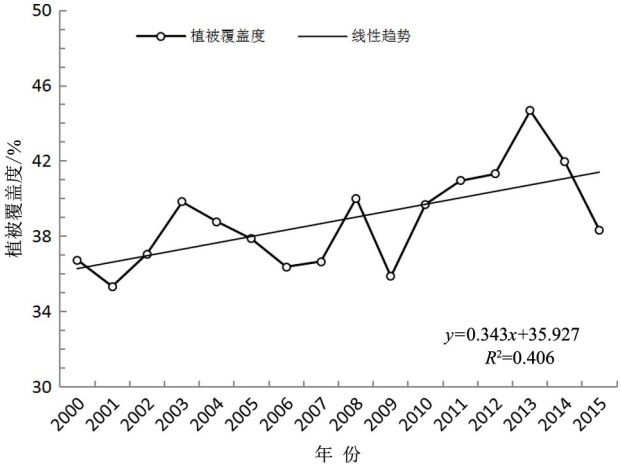


图 2　京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖度年际变化

Fig.2　Variation of annual mean vegetation coverage in the Beijing－Tianjin sandstorm source region

3.1　亚区植被覆盖度差异

为监测不同治理分区的生态恢复成效，对京津风沙源区内 8 个亚区植被覆盖度变化进行分析。首先将京津风沙源区 8 个亚区植被覆盖度读取至 SPSS 软件中进行方差分析，经检验，$F=247.194$，$P=0.001$，在检验水准为 0.05 的水平下，不同亚区植被覆盖度差异有统计学意义。结果表明，8 个亚区植被覆盖度存在明显区域差异（图 3）。燕山丘陵山地水源保护亚区植被覆盖度最高，2000—2015 年平均值为 62.29%，且年均增加 0.84%；大兴安岭南部亚区、晋北山地丘陵亚区和科尔沁沙地亚区植被覆盖度较高，多年平均值分别为 50.01%、45.56%和 40.11%，年均增速分别达到 0.43%、0.58%和 0.55%；典型草原亚区和农牧交错带草原亚区植被覆盖度分别为 36.31%和 35.93%，代表着京津风沙源区植被覆盖的平均水平，植被覆盖度年均增速分别为0.21%和 0.31%；浑善达克沙地亚区植被覆盖度较低，2000—2015 年均值为 29.95%，而荒漠草原亚区植被覆盖度最小，多年平均值仅为 19.11%，且二者植被覆盖度年均增速均不及 0.1%，其主要原因是上述区域土地覆被以沙地、荒漠为主，生态治理工程措施难以短时期内改变当地生态状况。

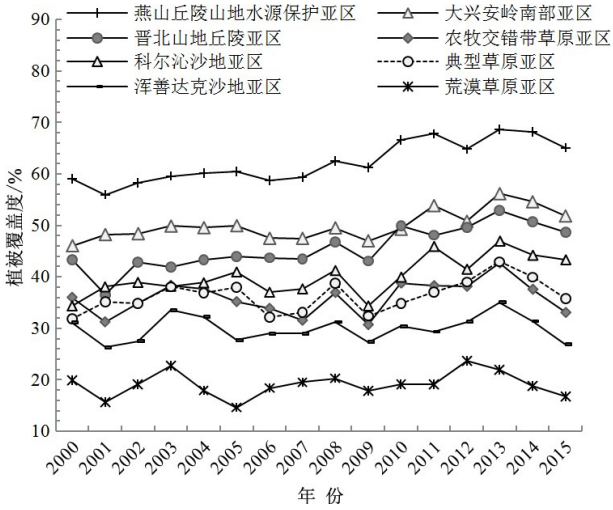


图 3　京津风沙源区不同亚区植被覆盖度变化

Fig.3　Changes of vegetation coverage of eight subzones in the Beijing－Tianjin sandstorm source region

3.2　地市植被覆盖度差异

为监测不同地市生态治理成效及分区制定治理措施，对京津风沙源区内 11 个地市植被覆盖度变化进行分析。首先将京津风沙源区 11 个地市植被覆盖度导入 SPSS 软件中进行方差分析，经检验，$F=294.634$，$P=0.001$，在检验水准为 0.05 的水平下，植被覆盖度差异有统计学意义。统计结果表明，不同地市植被覆盖度之间存在明显区域分异（图 4）。北京市（昌平区、门头沟区、平谷区、密云区、怀柔区和延庆区）、天津市（蓟县）和承德市植被覆盖变化范围相接近，2000—2015 年植被覆盖度平均值分别为 68.90%、65.39%和 65.73%，且植被覆盖度增加趋势明显，年增速分别为 0.81%、0.58%和 0.74%，原因主要是上述地区土地覆被以乔木、灌丛等植被为主；山西省忻州市（繁峙县、代县）、朔州市（怀仁县、山阴县、应县及朔州市区）和大同市（阳高县、天镇县、大同县、左云县、浑源县及大同市区），以及河北省张家口市、内蒙古赤峰市的植被覆盖度较高且接近，年平均值分布在 43%～55%之间，植被覆盖度年均增速分别为 0.67%、0.86%和 0.59%，以及 0.57%和 0.44%；乌兰察布市与锡林郭勒盟植被覆盖度较低，多年平均值分别为 28.13%和 30.82%，年均增速分别为 0.14%和 0.20%；包头市植被覆盖度最低（22.41%），且年均增速仅为 0.11%。

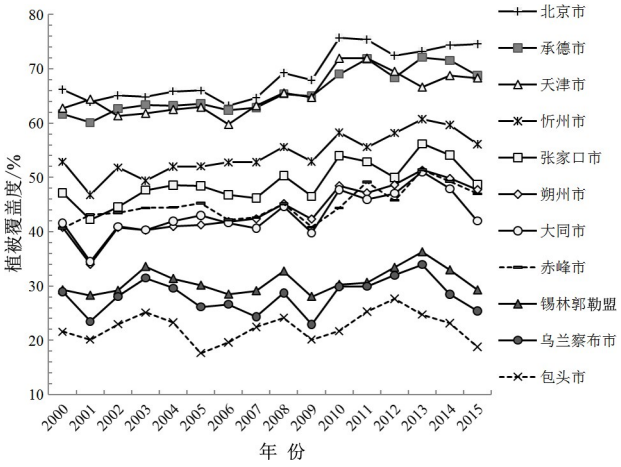


图 4 京津风沙源区不同地市植被覆盖度变化

Fig.4 Changes of vegetation coverage of eleven districts in the Beijing－Tianjin sandstorm source region

3.3 植被覆盖度变化空间

为进一步研究京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖度的空间变化情况，以 2000 年和 2015 年分别作为评估期初和期末的时间点，采用 2015 年研究区植被覆盖度像元值减去 2000 年植被覆盖度像元值，得到植被覆盖变化的空间分布情况。结果发现：相比 2000 年，2015 年京津风沙源区有 15%的区域植被覆盖度明显增加，36%地区植被覆盖度处于一般增加水平(表 1)，植被覆盖度增加地区集中分布在北京、天津、承德、赤峰以及锡林浩特市及周边地区(图 5)；约有 10%地区植被覆盖度未发生明显变化，主要分布在二连浩特市和四王子旗附近地区；另外有 35%地区植被覆盖度处于一般降低水平，5%地区植被覆盖度明显降低，植被覆盖度下降地区主要集中在京津风沙源区中部和西部的正镶白旗、镶黄旗、化德县等县市(旗)。

表 1 京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖度变化区

Table 1 Statistics of district wise vegetation coverage changes in the Beijing－Tianjin sandstorm source region between 2000 and 2015

植被覆盖度	变化值 Δ 分级	变化区面积占比	变化区集中分布县市(区、旗)
明显增加区	Δ≥0.1	14.59%	宁城县、平泉县、密云区、敖汉旗、承德县等
一般增加区	0.01≤Δ<0.1	35.51%	隆化县、万全县、翁牛特旗、张家口市区、延庆区等
无变化区	−0.01≤Δ<0.01	10.01%	察哈尔右翼前旗、二连浩特市、涿鹿县、左云县等
一般降低区	−0.1≤Δ<−0.01	34.72%	克什克腾旗、张北县、沽源县、康保县、朔州市区等
明显降低区	Δ<−0.1	5.17%	镶黄旗、化德县、繁峙县、正镶白旗、浑源县等

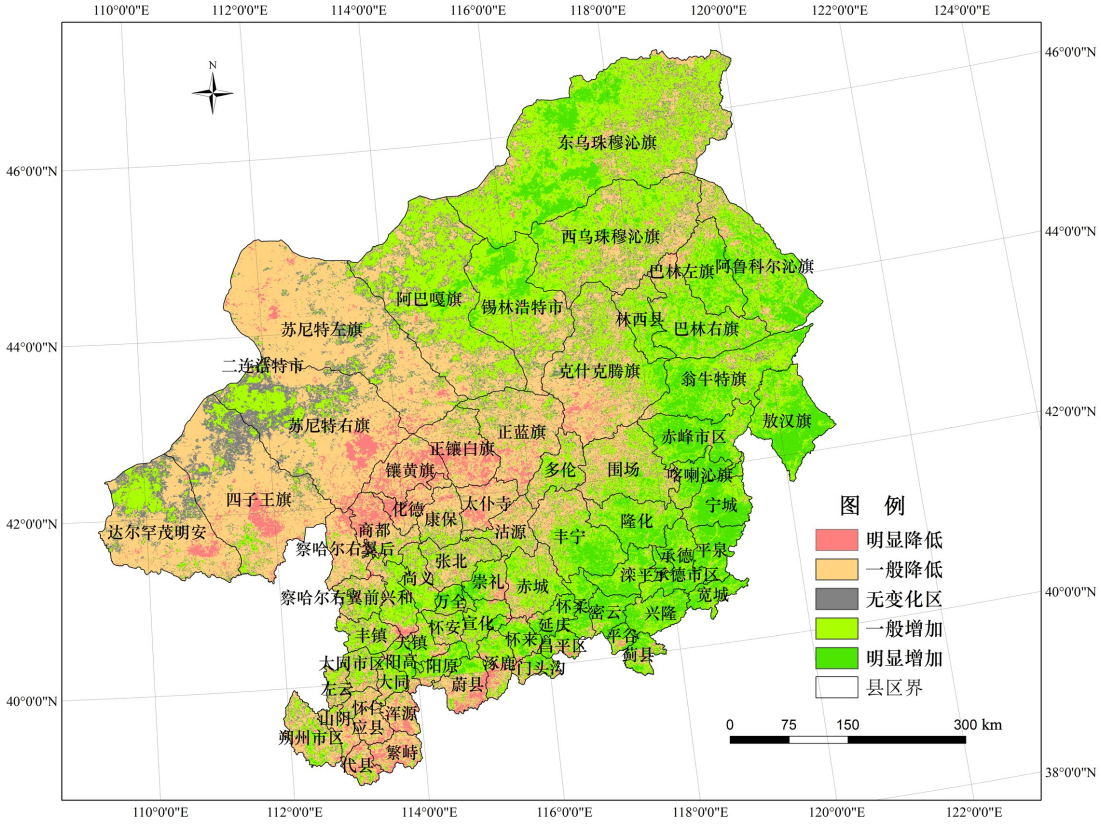


图 5 京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖变化区

Fig.5 District wise vegetation coverage changes in the Beijing－Tianjin sandstorm source region between 2000 and 2015

4　讨论

土地沙化是我国目前所面临最严重的生态问题之一，不仅恶化区域生态环境，而且破坏农牧业生产条件，加剧沙区贫困。我国防沙治沙工作虽然取得了一定的成绩，但土地沙化形势依然十分严峻[3]。从2000年开始试点且2002年全面启动的京津风沙源治理工程的主要目标是遏制沙化土地的扩张趋势，改善生态环境，促进区域经济社会协调发展。作为一项投入巨大的重大林业生态工程，京津风沙源治理效果一直是社会公众与政府决策者重点关注的事情[28-29]。该研究基于京津风沙源区长期遥感影像数据，采用GIS空间分析技术测算发现，京津风沙源区2000—2015年植被覆盖度整体呈波动增加趋势，这与滑永春等[9]、严恩萍等[10]及吴丹等[11]的研究结果一致。不过由于评估年份、研究区域与植被覆盖指标分级的不同，植被覆盖度数值与面积变化存在一定差异。相关研究表明，植被覆盖变化受自然因素和人类活动的共同影响[10,17,30-31]。为进一步探讨京津风沙源区植被覆盖变化与气候因素的关系，采用京津风沙源区26个气象站点降水数据[32]，借助SPSS软件计算了2000—2015年植被覆盖度与年降水的相关特征(图6)。结果显示，2000—2015年京津风沙源区降水量呈增加趋势，植被覆盖度与年降水的相关系数为0.64，且 $P=0.007<0.05$，因而二者呈显著相关。这说明京津风沙源区降水对植被生长有着重要的积极影响。此外，京津风沙源区荒山荒地造林、退耕还林(草)、小流域及草地治理、禁牧舍饲以及生态移民等工程措施的实施对植被覆盖度的增加也起到了明显的促进作用。

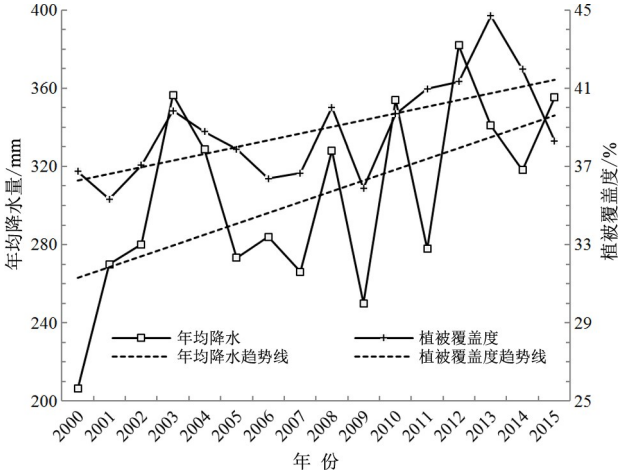


图6　京津风沙源区2000—2015年降水与植被覆盖度相关性

Fig.6　Correlation of vegetation cover and annual precipitation in the Beijing－Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2015

5　结论

本研究结果表明，2000—2015年京津风沙源区植被覆盖度变化范围为35%～45%，且总体呈增加趋势，年均增速为0.4%($P<0.05$)，生态治理工程取得一定程度植被恢复成效。8个治理分区植被覆盖均有所增加，但区域差异明显，晋北山地丘陵亚区和燕山丘陵山地水源保护亚区植被覆盖度年均增速超过0.6%，浑善达克沙地亚区与荒漠草原亚区植被覆盖度年均增速不及0.2%，这与区域地表组成和气候背景有关。从地市来看，北京、天津和承德植被覆盖度较高，但朔州、张家口和大同植被覆盖度增速明显，而乌兰察布和包头的植被覆盖度年均增速不及0.1%。相比2000年，2015年京津风沙源区有51%的区域植被覆盖度增加，49%区域植被覆盖度未变或降低，主要集中在京津风沙源区的中部和西部县市(旗)，因此，在京津风沙源治理二期工程中应重点关注上述地区。此外，在快速城市化背景下，风沙源内的城市附近植被覆盖度下降趋势较明显，因此在重视恢复非城市地区植被覆盖度的同时，也应注重城市周边地区植被保护与恢复建设。

参考文献

[1] 张克峰，李宪文，张定祥，等. 中国土地资源退化时空变化分析[J]. 环境科学，2006，27(6)：1244-1251.

[2] 中华人民共和国环境保护部. 2016中国环境状况公报[R]. 北京：中华人民共和国环境保护部，2016.

[3] 沈国舫，吴斌，张守攻，等. 新时期国家生态保护和建设研究[M]. 北京：科学出版社，2017.

[4] 京津风沙源治理工程二期规划思路研究项目组. 京津风沙源治理工程二期规划思路研究[M]. 北京：中国林业出版社，2013.

[5] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and human well-being：synthesis[M]. Washington，DC：Island Press，2003.

[6] 张力小. 关于重大生态建设工程系统整合的思考[J]. 中国人口·资源与环境，2011，21(12)：73-77.

[7] 赵建辉，王明玉，李致宇，等. 一种基于MPI的河流生态修复模拟并行算法[J]. 地学前缘，2014，21(4)：115-123.

[8] 石莎，邹学勇，张春来，等. 京津风沙源治理工程区植被恢复

效果调查[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 86-92.

[9] 滑永春, 彭道黎, 陈鹏飞. 基于 MODIS NDVI 的京津风沙源工程治理区荒漠化动态监测[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(6): 210-215.

[10] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 等. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖度时空演变特征[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.

[11] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 等. 京津风沙源治理工程生态效应评估[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123.

[12] 高尚玉, 邹学勇, 张春来, 等. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[13] 石莎, 冯金朝, 周芸芸. 京津风沙源治理工程区植被地上生物量与净第一性生产力生产力动态[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 886-894.

[14] 王强, 张勃, 戴声佩, 等. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1613-1620.

[15] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)综合研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 295-306.

[16] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 1019-1024.

[17] 刘宪锋, 杨勇, 任志远, 等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1244-1249.

[18] 陈婷, 梁四海, 钱开铸, 等. 近 22 年长江源区植被覆盖变化规律与成因[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 323-331.

[19] 金晓媚, 胡光成, 李文梅. 中国西北地区额济纳绿洲植被盖度与黑河流量的滞后效应研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 198-203.

[20] 刘宇, 朱源. 20 世纪 80 年代以来长江流域植被变化的速度和格局[J]. 三峡生态环境监测, 2016, 1(2): 39-43.

[21] 吴凯, 王晓琳, 刘培, 等. 三峡库区生态系统时空分布及其演替特征[J]. 三峡生态环境监测, 2017, 2(4): 1-9, 16.

[22] 周李磊, 官东杰. 三峡库区(重庆段)植被时空变化与生态屏障建设研究[J]. 三峡生态环境监测, 2017, 2(3): 69-74.

[23] ZENG X B, DICKINSON R E, WALKER A, et al. Derivation and evaluation of global 1 km fractional vegetation cover data for land modeling[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(6): 826-839.

[24] 王智, 常顺利, 师庆东, 等. 基于 FVC 指数的中国西北干旱区植被覆盖变化 Markov 过程[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1129-1136.

[25] 国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.

[26] 安佑志, 刘朝顺, 施润和, 等. 基于 MODIS 时序数据的长江三角洲地区植被覆盖时空变化分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 1293-1927.

[27] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[28] 王立群, 王秋菊, 刘小强, 等. 京津风沙源治理生态工程绩效评估研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.

[29] 张良侠, 樊江文, 张文彦, 等. 京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 374-380.

[30] 张岩, 张清春, 刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 268-272.

[31] 金晓媚, 万力, 张幼宽, 等. 银川平原植被生长与地下水关系研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 197-203.

[32] 覃云斌, 信忠保, 易扬, 等. 京津风沙源治理工程区沙尘暴时空变化及其与植被恢复关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 196-204.