

2001-2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析

赵舒怡^{1,2,3,4}, 官兆宁^{1,2,3,4}, 刘旭颖⁵

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 水资源安全北京实验室, 北京 100048;
3. 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 4. 资源环境与地理信息系统北京市
重点实验室, 北京 100048; 5. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 基于MODIS-NDVI遥感数据以及地表气象数据, 计算了2001-2013年华北地区的修正Palmer干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)和植被覆盖度, 总结出植被覆盖度以及PDSI的年际变化规律, 从华北地区生态分区的角度分析了二者的相关关系。结果表明: ①华北平原的植被覆盖度呈南高北低、中部高四周低的分布特点, 最低为内蒙古高原草原生态区的0.61, 最高为淮阳丘陵地区的0.84; ②2001-2013年, 华北平原整体植被覆盖度主要呈上升趋势, 其中华北的北部、西部、南部山区及丘陵地带植被覆盖度主要呈上升趋势, 而华北平原农业区以及京津唐城郊地带植被覆盖度呈下降趋势; ③华北地区的东北部有变潮湿的趋势, 南部则有变干旱的趋势, 其他地区干旱条件变化不明显; ④华北地区植被覆盖度与气候干旱程度的平均相关系数为0.20, 73.37%的地区相关系数为正, 正相关关系最为明显的地区为华北地区的西北部, 而北京、天津、以及河北省与河南省一级、二级城市的城郊地区相关系数多为负值。⑤在华北大部分地区, 夏季和秋季的气候干旱条件对植被覆盖度的影响最为明显。

关键词: 华北地区; 植被覆盖度; PDSI; 生态区; 相关分析

DOI: 10.11821/dlxb201505004

1 引言

植被覆盖度反映了植物进行光合作用面积的大小以及植被生长的茂盛程度, 能够在一定程度上代表植被的生长状态和生长趋势^[1], 是刻画植被在大气圈、水圈、岩石圈之间相互作用的一个重要参量。在研究全球气候变化对生态系统的影响时, 常将植被覆盖度被作为评价区域生态系统健康程度的重要指标。

干旱是水分持续亏缺的一种异常气象现象, 是所有气候因子作用于生态环境中的综合反映。常利用表征气候干湿条件的综合参量来评价气候条件的干旱程度, 一般将这种参量称为干旱指数。

植被覆盖变化与气候干旱条件之间的关系一直以来是研究的热点。在对大区域植被覆盖度的研究中, 不少学者利用中低分辨率数据分析植被覆盖度的历年变化趋势^[2-7]或不同气候因子与植被覆盖度之间的相关关系^[8-10]。穆少杰等^[2]基于MODIS-NDVI遥感数据获取了内蒙古地区地表植被覆盖度数据, 结合研究区同期降雨量和温度数据, 从不同时空尺度上分析了研究区植被覆盖度对气候变化的响应。

收稿日期: 2015-01-14; 修订日期: 2015-04-01

基金项目: 国家国际科技合作专项资助(2014DFA21620); 国家留学基金项目 [Foundation: International Science & Technology Cooperation Program of China, No.2014DFA21620; China Scholarship Foundation]

作者简介: 赵舒怡(1990-), 女, 湖北人, 在读硕士, 从事内陆湿地遥感方面的研究。E-mail: syzhao90@foxmail.com

通讯作者: 官兆宁(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要从事湿地遥感监测研究。E-mail: gongzhn@163.com

在对大区域的研究中,地表生态环境的差异使地表生态环境对于干旱气候的响应程度也有所不同。因此,需要从更细致的角度分析大区域内部各类型生态系统的气候变化及植被分布特性。根据生态系统分区的准则,可通过地表自然地貌、水热条件、植被覆盖类型的区别,将大区域分类为不同的生态区,从而能够以生态区的角度分析气候条件对生态环境的影响。

华北地区的大部分区域地处暖温带半湿润半干旱季风气候区,在过去60年中,气候变化和人类活动对植被的生长产生了巨大影响。本文基于生态分区,首先使用2001-2013年MODIS的植被指数产品获取华北地区的植被覆盖情况,并结合由同期华北地区气象数据得到的干旱指数,从时空上分析不同生态区植被覆盖变化对气候变化的响应,探讨气候条件对华北地区区域生态系统变化的驱动作用。

2 数据与方法

2.1 研究区地理概况

本文中所取的华北地区研究区以行政区划为界,包括北京、天津、河北、河南和山东五个省(市)^[11-13](图1)。

华北地区北部地势波状起伏,由南向北倾斜,海拔大多在1000 m以上,年均温 $-0.3\sim 3.5^{\circ}\text{C}$,年降水量340~450 mm。中部的华北平原地区属于暖温带大陆性季风气候,年均温 $5\sim 13^{\circ}\text{C}$,年降水量500~800 mm。东部地区胶东半岛以低山丘陵为主,海拔500~1000 m,年均温 $10\sim 13^{\circ}\text{C}$,年降水量600~900 mm;鲁南山地丘陵区域山地较多、热量充沛;鲁东丘陵区包括整个胶东半岛并向南延伸到省界的东南部,受海洋气候影响,冬暖夏凉、雨量充沛。西部地区主要包括太行山脉东麓,年均温 $3\sim 18^{\circ}\text{C}$,年降水量400~800 mm,水热条件优越;冀西山海拔1000 m以上,豫北山地山间多分布小型盆地,海拔300~400 m。西南部地区的豫西山由秦岭东延的崤山、熊耳山、伏牛山等组成,海拔1500~2000 m,年均温 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$,降水量800~1000 mm。南部地区的山地由桐柏山、大别山组成,海拔800 m左右,年均温 $13\sim 15^{\circ}\text{C}$,年降水量1000~1300 mm,是华北地区水热资源最为丰富的地区。

研究区内包括了四类气候区^[11, 14]及三类植被地带^[15]。华北地区气候分区主要包括:内蒙古高原东部的中温带半干旱区,辽东山地丘陵的暖温带湿润区,燕山山脉、华北平原及鲁东山地所在的暖温带半湿润区,大别山及秦巴山地的北亚热带湿润区。植被地带分区主要包括:临接内蒙古高原的冀北高原和冀北山地的温带草原地带,位于华北平原、西部太行山脉东麓及秦岭东延山地的暖温带落叶阔叶林地带,南部豫西、豫南山地区域的北亚热带常绿落叶阔叶混交林地带。

2.2 研究区生态区划分

根据中国生态区的分类标准^[16],可将研究区划分为七个生态区(图2),从北到南依

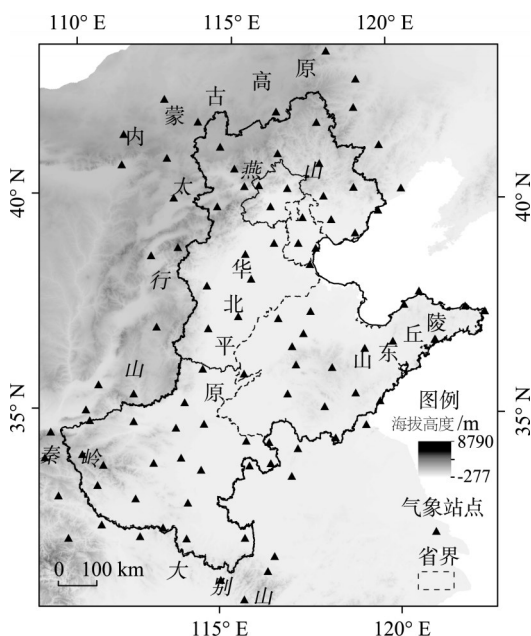


图1 华北地区研究区位置及气象站点分布

Fig. 1 The location of North China and the distribution of meteorological stations

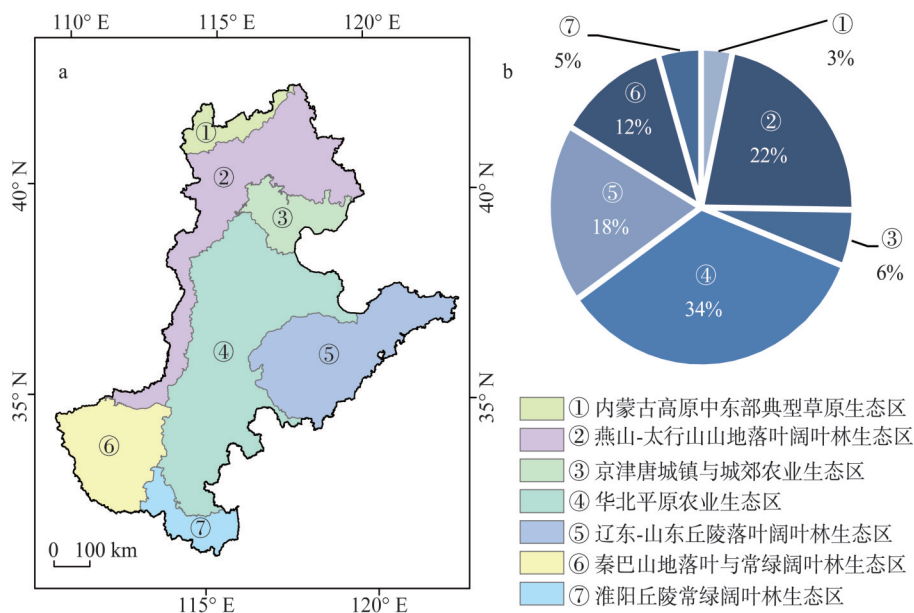


图2 华北地区的生态区划分及各生态区面积比例(据中国生态区的分类标准^[18]绘制)

Fig. 2 The ecoregions regionalization map and the area proportion of each ecoregion in North China

次称为: 内蒙古高原中东部典型草原生态区、燕山—太行山山地落叶阔叶林生态区、京津唐城镇与城郊农业生态区、华北平原农业生态区、辽东—山东丘陵落叶阔叶林生态区、秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区、淮阳丘陵常绿阔叶林生态区。其中, 华北平原农业生态区的面积所占的比例最大, 达34%; 而最北部的内蒙古高原中东部典型草原生态区仅占3%。

2.3 数据来源与预处理

本文使用了空间分辨率为250 m的MODIS NDVI 16日数据产品, 研究区域在全球正弦投影系统中编号为h26v04、h26v05、h27v04和h27v05。为排除一年内多季农作物的影响, 本文主要讨论生长期在5-10月的植被, 因此选取2001-2013年中时相为5月1日-10月31日的数据。在ENVI中使用最大值合成法(Maximum Synthesis Method, MVC)处理历年NDVI数据, 去除云、大气和太阳高度角产生的影响^[17-18], 得到13年中用于计算植被覆盖度的NDVI值。使用研究区范围矢量图截取得到华北地区及各生态区的年际NDVI数据。

气象基础数据来自中国气象科学数据共享服务网^[19]。根据MODIS数据时相、数据质量以及气象站地理位置, 共选用1964-2013年华北地区及其周边地区共100个气象站点(图1)的平均气温、气压、相对湿度、风速、日照时数的日数据和月数据。

华北地区生态区的矢量数据来自中国生态系统评估与生态安全数据库^[16]。中国生态区的划分标准, 主要基于城市与区域国家重点实验室前期在中国生态功能区划研究的基础数据, 并参照了国家环境保护总局发布的《生态功能区划(暂行)规程》。

2.4 植被覆盖度的计算

混合像元分解模型是计算植被覆盖度的常用方法, 它假设遥感影像的一个像元由植被和土壤两部分构成, 像元信息包含纯植被成分信息及纯土壤成分信息, 而混合像元的NDVI值即为这两部分信息的植被指数值的加权平均和^[8]。

计算NDVI的表达式为:

$$NDVI = f_v \cdot NDVI_{veg} + (1 - f_v) \cdot NDVI_{soil} \quad (1)$$

式中： $NDVI$ 为混合像元的植被指数值； $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的植被指数值； $NDVI_{soil}$ 为纯土壤像元的植被指数值； f_v 为植被覆盖度。

因此可求得植被覆盖度的计算公式：

$$f_v = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中： $NDVI_{soil}$ 为纯土壤像元的最小值，理论上接近于0； $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的最大值，理论上接近于1。实际上由于气象条件、植被类型及分布、季节变化等因素的影响，不同影像的 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 会发生一定程度的变异。

采用预处理得到的 $NDVI$ 数据作为混合像元植被指数值；选用每年植被生长最旺盛的季节（6-8月）的 $NDVI$ 影像采用最大值合成法得到 $NDVI$ 值，并分别采用0.5%置信度截取 $NDVI$ 的上下阈值。将 $NDVI$ 数值最大的0.5%区域作平均值，得到 $NDVI_{veg}$ ，将 $NDVI$ 数值最小的0.5%区域作平均值，得到 $NDVI_{soil}$ 。最后，通过公式（2）即可得到历年植被覆盖度。

2.5 干旱指数的计算

面对气象学中多种干旱指数的取舍，卫捷等^[20-21]及韩海涛等^[22]比较了PDSI、地表湿润指数、降水距平百分率、标准化降水指数在中国地区的适用情况，认为PDSI指标虽然受到台站数目、地表结构和资料水平的限制，但能够合理描述干旱特征，且考虑了前期天气条件对干旱程度的影响，具有较好的时空比较性^[23]。因此，本文中使用的PDSI来代表研究区气候的干旱程度。

PDSI由Palmer提出并定义^[24]，在美国的干旱数据分析、干旱序列重建以及干旱的监测上应用广泛^[23]。安顺清等根据中国的气候特征及地表环境特点，修正了Palmer旱度模式中的蒸散模型、土壤常数，构建了适用于中国地区的修正PDSI基本模式^[23, 25-27]。

$$x_i = 0.9331x_{i-1} + z_i / 125.99 \quad (3)$$

式中： x_i 为第*i*个月的干旱指数； z_i 为第*i*个月的水分距平指数。

在公式（4）基础上，使用其他地区站点的气象数据进行校正，修正权重因子：

$$K' = 1.2815 \lg \left(\frac{\overline{PE} + \overline{R} + \overline{RO}}{(\overline{P} + \overline{L})\overline{D}} \right) + 3.3027 \quad (4)$$

$$K = \frac{581.391}{\sum_{i=1}^{12} DK'} K' \quad (5)$$

式中： \overline{PE} 、 \overline{R} 、 \overline{RO} 、 \overline{P} 、 \overline{L} 分别为潜在蒸散量、补水量、径流量、降水量、失水量的平均年值； \overline{D} 为水分距平的绝对值平均值； K 与 K' 为气候特征值的估计值。

最终计算得到的PDSI大小在-10~10之间，其中PDSI大于1时认为气候湿润，PDSI小于-1时认为气候干旱，当PDSI位于-1与1之间时，认为气候处于比较正常的状态（表1）。

根据修正的Palmer旱度模式，本文使用了分布于北京、天津、河北、河南、山东、山西、陕西、内蒙古、辽宁、江苏、安徽、湖北共12个省市自治区的共100个站点1964-2013年的气象数据，得到华北地区及周边区域的PDSI的离散分布情况。

使用ArcGIS地统计分析工具中的Kriging空间插值方法得到历年的PDSI栅格数据。转换空间坐标系，并根据研究区矢量范围裁取与植被覆盖度数据匹配的PDSI数据。

表1 PDSI干湿等级

Tab. 1 Palmer Drought Severity Index ranges and classes

干旱指数值	等级	干旱指数值	等级
≥ 4.00	极端湿润	-1.99~-1.00	轻微干旱
3.00~3.99	严重湿润	-2.99~-2.00	中等
2.00~2.99	中等湿润	-3.99~-3.00	严重干旱
1.00~1.99	轻微湿润	≤ -4.00	极端干旱
-0.99~-0.99	正常		

2.6 植被覆盖度与PDSI的趋势分析及相关性计算

Theil-Sen斜率估计是一种非参数估计方法, 常用于植被覆盖度的长时间序列趋势变化分析。本文采用Theil-Sen斜率估计的方法, 分别获取研究区2001-2013年植被覆盖度和PDSI的趋势变化情况。

Theil-Sen斜率的计算公式:

$$TS_{\text{slope}} = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \right) \quad (6)$$

式中: median 表示中位数函数; x_i 、 x_j 为序列数据, 表示不同年份的植被覆盖度或PDSI; t_i 、 t_j 为与序列数据对应的时间序列数据; 序列长度为 n , 有 $i < j \leq n$ 。

本文基于像元尺度进行植被覆盖度与PDSI的相关分析, 运用植被覆盖度与PDSI的栅格数据, 有效分析华北地区植被覆盖度与PDSI的相关关系。

植被覆盖度与PDSI的相关系数计算公式:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: R 为 x 、 y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年的植被覆盖度; y_i 为第 i 年的年平均PDSI。

3 结果与分析

3.1 各生态区多年平均植被覆盖度的空间分布

根据2001-2013年植被覆盖度数据, 得到华北地区各生态区的植被覆盖度分布情况(图3)。内蒙古高原中东部典型草原生态区的为温带草原地带, 主要分布禾本科草原植物, 13年的平均植被覆盖度为0.61, 植被覆盖度偏低。

围绕着华北平原的北、西、南方向山脉主要为暖温带落叶阔叶林区, 植被覆盖度较高。北部的燕山—太行山生态区和西南部的秦巴山地生态区平均植被覆盖度分别为0.77和0.82。冀北山地以白桦、山杨、栎林占优势, 燕山山地的西部分布有松栎林带; 冀西北山间盆地暖温带落叶阔叶林地带向温带干草原过渡, 广泛分布灌木草原; 太行山脉东麓分布有疏生落叶阔叶林和灌草丛^[28]; 豫西山地除了华北常见植被, 还包括一些华中、华西区特征^[29]。

华北平原地区的农业生态区、辽东—山东丘陵落叶阔叶林生态区、京津唐城镇与城郊农业生态区的平均植被覆盖度分别为0.80、0.77和0.70。华北农业区农作物密度高, 植被覆盖度最高; 京津唐地区地表植被主要为人工园林, 植被覆盖程度较低。

淮阳丘陵常绿阔叶林生态区地处北亚热带常绿落叶阔叶混交林地带, 平均植被覆盖度为0.84, 为整个华北地区植被覆盖度最高的区域, 主要包括落叶阔叶林以及常绿针叶林: 豫西山地及南阳盆地地区植被多为栎林、山杨、桦木, 低海拔山地包括少量常绿树种和经济林木; 豫南山地森林植被以落叶栎林为主^[30]。

3.2 植被覆盖度与PDSI多年变化趋势

以年为单位, 本文估算了2001-2013年植被覆盖度数据以及PDSI数据的变化趋势。根据植被覆盖程度的变化情况(图4a), 研究区中变化趋势为正和为负的地区分别占地约 $2.99 \times 10^5 \text{ km}^2$ 及 $2.43 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。植被覆盖度有所增长的区域主要包括: 燕山—太行山脉的大部分区域、淮阳丘陵常绿阔叶林生态区、辽东—山东丘陵的西部区域、秦巴山地生态

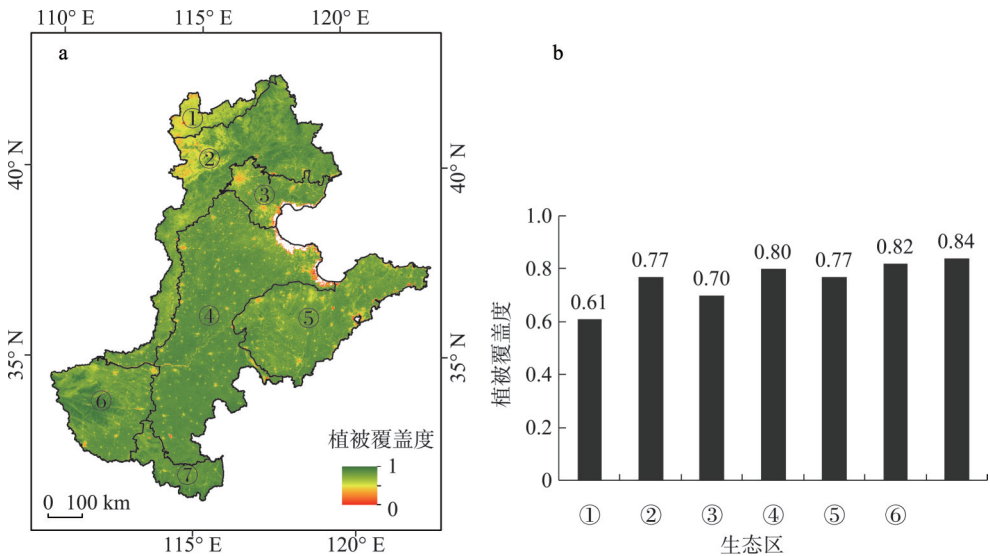


图3 2001-2013年华北地区各生态区的平均植被覆盖度分布情况

Fig. 3 The average vegetation coverage of each ecoregion in North China during 2001-2013

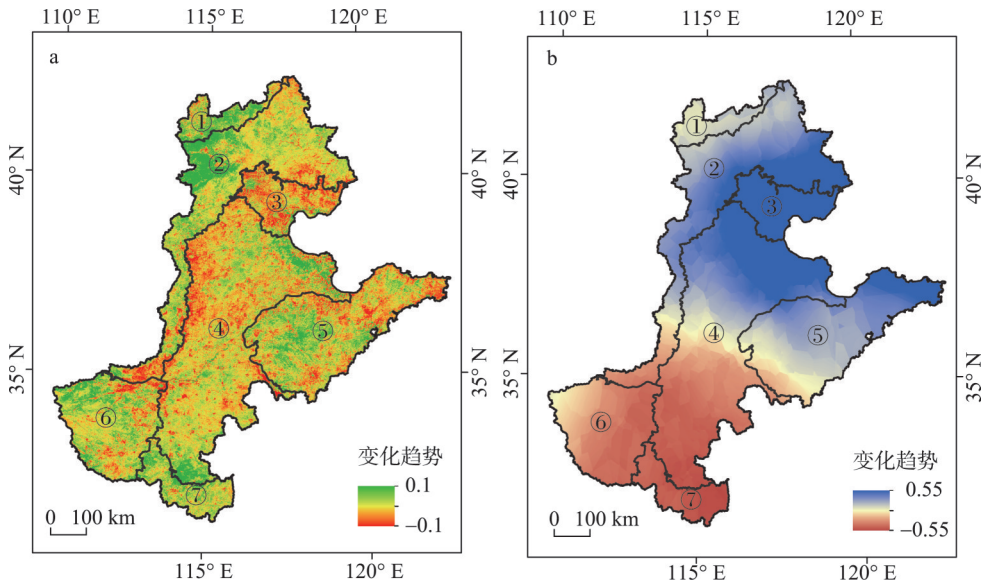


图4 2001-2013年华北地区植被覆盖度(a)与PDSI(b)的变化趋势

Fig. 4 The changing trend of annual vegetation coverage (a) and annual PDSI (b) in North China during 2001-2013

区的西部区域、内蒙古草原生态区的中部地区。而京津唐城镇与城郊农业生态区域、华北农业生态区的西部区域, 植被覆盖度有显著的下降趋势。

除了内蒙古草原生态区及京津唐城市区, 其他地区的植被覆盖度在这13年中变化平稳、趋势类似, 植被覆盖度的低值出现在2002年、2006年及2009年(图5)。13年中内蒙古草原生态区植被覆盖度整体为增加趋势, 由2001年的0.57上升到2013年的0.69, 其中2005-2007年植被覆盖度呈先增加后减少的趋势, 而2008-2010年波动幅度较大, 呈先降低后急剧增加的趋势。京津唐城市区的植被覆盖度呈持续的下降趋势, 由2001年的0.74下降为2013年的0.66。

根据PDSI的变化情况(图4b),燕山山脉区域、京津唐城镇与城郊区域、华北平原农业区的北部地区以及鲁东丘陵区,其PDSI增加趋势最为明显,说明气象干旱条件有所缓解。华北平原农业区的南部地区、豫南山脉和豫西山脉丘陵地区,PDSI都处于降低的趋势,说明区域干旱程度有所增强。

各生态区13年中PDSI变化曲线相差较大,但是除了秦巴山地生态区与淮阳丘陵生态区,其他地区的PDSI都处于明显的上升趋势(图6)。华北地区PDSI的第一个低值出现在2002年,2002-2004年大部分地区的PDSI处于上升阶段,而在2006-2007年出现第二个低值区,另一个比较统一的低值位于2009年。PDSI增长的区域中,内蒙古草原地区和燕山一太行山区域由2001年的中等干旱变化为2013年的轻微湿润,京津唐区域由2001年的严重干旱变化为2013年的严重湿润。淮阳丘陵常绿阔叶林生态区从2003年开始PDSI一直处于下降趋势,最小值出现在2011年,相对北部其他生态区有明显的滞后表现。其他PDSI增长的区域气候干旱条件变化不大,干旱程度处于正常水平。

根据华北地区各生态区植被覆盖度与PDSI的变化趋势分析,在13年变化中二者出现了较为统一的突变点,即2002年、2006年及2009年。因此,认为华北地区植被覆盖度与PDSI存在一定程度的相关关系。

3.3 华北地区PDSI与植被覆盖度的相关关系

3.3.1 华北地区年平均PDSI与植被覆盖度的相关性分析 使用公式(7)对2001-2013年植被覆盖度数据以及年平均PDSI数据进行基于像元的相关分析,结果如图7所示。其中橙色部分表示华北地区的植被覆盖度与PDSI呈正相关关系,蓝色部分表示华北地区的植被覆盖度与PDSI呈负相关关系。

整个研究区的平均相关系数为0.20,区域相关系数为正和为负的区域分别占73.37%和26.63%。在正相关区域中,分别有21.60%和10.06%的区域通过了 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 检验;负相关区域中,分别有8.60%和2.78%通过了 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 检验。这说明气候干旱条件与植被覆盖度之间存在一定的联系。各生态区的相关系数特点差异巨大,需要将不同地区分开讨论。

内蒙古高原中东部典型草原生态区绝大部分地区植被覆盖度与PDSI都呈正相关关系,正相关系数所占区域为整个区域的94.30%,区域平均相关系数为0.41。此区域内植被覆盖度与年平均PDSI呈现明显的正相关关系。

燕山一太行山山地落叶阔叶林生态区的大部分地区植被覆盖度与PDSI呈正相关关

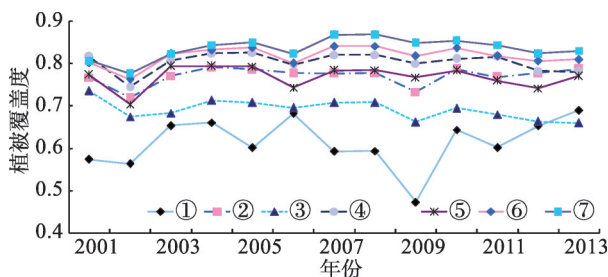


图5 2001-2013年华北地区各生态区植被覆盖度的变化曲线

Fig. 5 The inter-annual change of each ecoregion's vegetation coverage in North China during 2001-2013

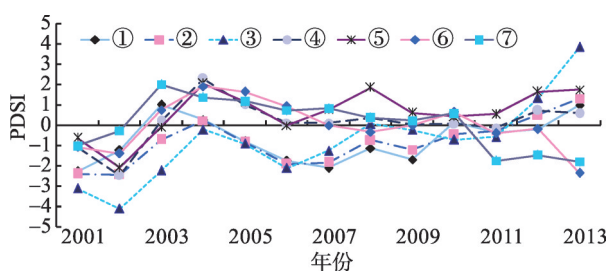


图6 2001-2013年华北地区各生态区PDSI的变化曲线

Fig. 6 The inter-annual change of each ecoregion's PDSI in North China during 2001-2013

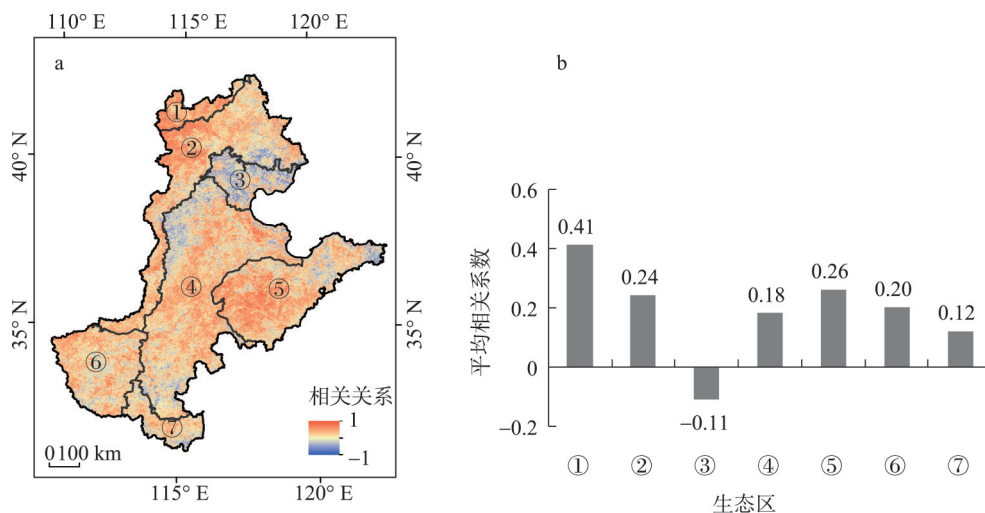


图7 2001-2013年华北地区各生态区植被覆盖度与PDSI的相关关系

Fig. 7 Correlation between vegetation coverage and PDSI in North China during 2001-2013

系,整体区域的平均相关系数为0.24;其中正相关的地区占79.05%,通过 $P < 0.05$ 检验的区域占生态区的18.26%。13年中燕山—太行山山地区域的气候干旱程度稍有变潮湿的趋势,但是并不显著,植被覆盖度也没有明显的变化。稳定的气候和地形条件使这个地区植被覆盖程度变化并不大。

华北平原农业生态区内,植被覆盖度与PDSI相关系数的数值跨越较大,正相关系数占总体的71.60%,负相关系数所占区域占总体区域的28.40%,区域平均相关系数为0.18,其中正趋势区域的平均相关系数为0.33。从分析结果认为气候干旱程度对地表植被覆盖度有着比较大的影响,主要呈正相关关系。负相关系数地区主要集中于太行山脉东麓相接的南北向条状区域,与京津唐城镇与城郊农业生态区相连。

京津唐城镇与城郊农业生态区平均相关系数为-0.11,呈负相关关系的区域占此生态区的63.54%,其中19.18%通过了 $P < 0.05$ 检验。与京津唐地区相互连接并呈类似负相关特征的地区还包括河北省的保定、石家庄、邢台、邯郸,河南省的许昌、漯河、驻马店等城市的城郊地区。北京、天津地区的气候干旱程度与十几年前相比稍有改善;北京、天津等城市的城区内部植被覆盖度呈上升趋势,但城区周边及郊区植被覆盖度在13年内迅速下降。城郊地区植被覆盖度与PDSI呈负相关,城区内部植被覆盖度与PDSI呈正相关,但相关性皆不显著。认为此生态区受城市扩张等人工扰动严重,相关性较低。

辽东—山东丘陵落叶阔叶林生态区平均相关系数为0.26。正相关系数区域占生态区总面积的78.00%,其中25.63%的区域通过了 $P < 0.05$ 检验,可见植被覆盖度与PDSI相关联系比较紧密,大部分区域呈现了明显的正相关关系。13年中,鲁东区域干旱程度逐渐减轻,而鲁南区域干旱程度变化并不明显。随着鲁东地区干旱程度降低,胶东半岛的西部以及东部沿海地区植被覆盖度减小。呈正相关系数的区域地处鲁南山地丘陵区,也属于华北地区农业地带;负相关区域多位于胶东半岛并向南延伸到省界东南部,分布着繁华的沿海城市。

秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区和淮阳丘陵常绿阔叶林生态区是整个华北地区植被覆盖程度最高的区域。秦巴山地生态区平均相关系数为0.20,正相关系数占75.50%;淮阳丘陵生态区平均相关系数为0.12,正相关系数占65.77%,认为这两个区域的植被覆

盖度与PDSI的正相关与负相关关系都不是非常紧密。

3.3.2 华北地区年各季节PDSI与植被覆盖度的相关性分析 从季节的角度分析各季PDSI变化对整体植被覆盖度的影响，将一年的四个季节分别设为：冬季（前一年12月-2月），春季（3-5月），夏季（6-8月），秋季（9-11月）。相关分析结果如图8所示。

根据各生态区相关分析数据（图9），华北地区大部分区域的夏季和秋季干旱程度对植被覆盖度的影响较为明显。

内蒙古高原中东部典型草原生态区和燕山—太行山山地落叶阔叶林生态区的植被覆盖度对夏季和秋季的干旱指数反应最为明显，分别高达0.45和0.42、0.25和0.24，且呈

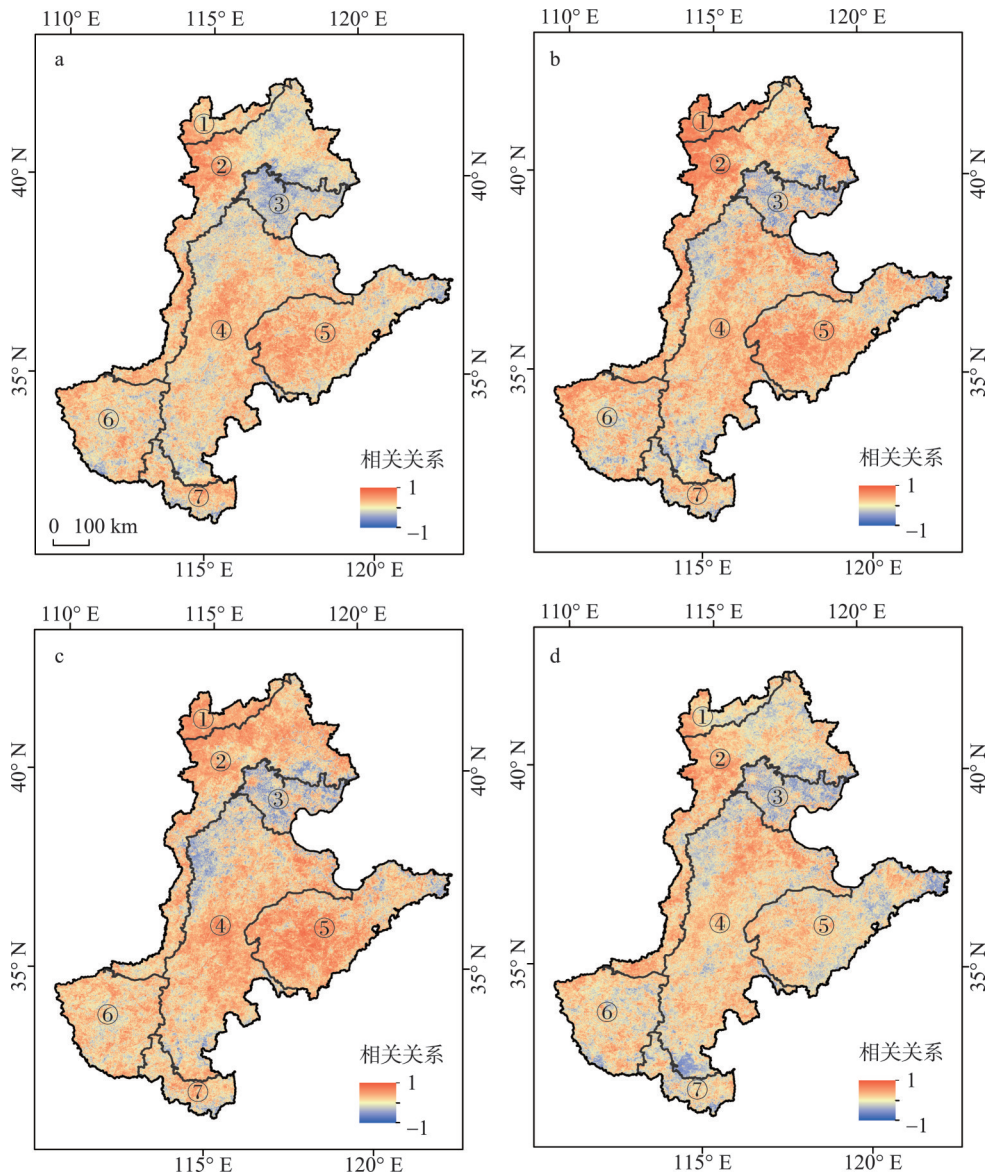


图8 2001-2013年华北地区各生态区不同季节植被覆盖度与PDSI的相关关系(a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季)

Fig. 8 Correlation between vegetation coverage and PDSI in North China in different seasons during 2001-2013 (a. spring; b. summer; c. autumn; d. winter)

负相关的地区大小不超过5%和20%。

华北平原农业生态区、辽东—山东丘陵落叶阔叶林生态区、秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区和淮阳丘陵常绿阔叶林生态区这四个生态区中,春、夏、秋三个季节的干旱程度对年内植被覆盖度皆有影响,相关性系数比较接近。前三个生态区春季的干旱程度相比于夏季和秋季对植被覆盖度的影响更低一些;其中,华北平原农业生态区中春、夏、秋的相关系数相差并不大,这一定程度上印证了华北平原春旱对农作物的影响力。淮阳丘陵常绿阔叶林生态区的计算结果表明,春季干旱程度对植被覆盖度影响最大,其次是秋季和夏季相关系数。

京津唐城镇与城郊农业生态区四个季节的平均相关性系数皆为负且平均值都偏小,负相关系数分布范围占此生态区约62%~69%的区域。这类地区中人类活动影响过大,与自然环境干旱条件的相关性并不明显。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 华北平原的植被覆盖度总体呈南高北低、中间高四周低的分布特点。其中,植被覆盖程度最高的区域为淮阳丘陵常绿阔叶林生态区,最低的区域为内蒙古高原中东部典型草原生态区。

(2) 2001-2013年,华北平原的植被覆盖度变化总体上呈上升趋势。围绕华北平原的北、西、南部山区及丘陵地带主要植被覆盖度呈上升趋势,而华北平原农业区、京津唐城郊地带和山东省沿海地区植被覆盖度呈下降趋势。北京、天津等城区内部植被覆盖度呈上升趋势。

(3) 2001-2013年,华北地区的东北部有变潮湿的趋势,南部有变干旱的趋势。内蒙古典型草原地区、华北平原中部、辽东—山东丘陵地区西南部的干旱条件变化不明显。

(4) 从年际分析的结果可看出,华北地区植被覆盖度与气候干旱程度主要呈正相关关系,最为明显的地区为华北西北部,包括内蒙古典型草原区、华北平原中部的农业区以及辽东—山东山地区域的西南部。华北地区一级、二级城市聚集的区域相关系数多为负值,该地区受人类活动扰动严重,植被覆盖度与气候干旱条件相关性较弱。

(5) 在华北大部分区域中,夏季和秋季干旱程度对植被覆盖度的影响最为明显。植被覆盖度对春季干旱的响应程度相对夏季和秋季而言较低,但在华北平原农业区以及华北地区的东南部,春季与夏季和秋季的相关系数相差不大。

4.2 讨论

考虑到只有在植被生长月份植被覆盖度才会与干旱条件表现出明显的线性关系^[2],本文并未对植被覆盖度与PDSI做月际的相关关系分析。

本研究从生态区的角度分析了华北地区植被覆盖度对气候干旱条件的响应程度。在自然条件下,研究区整体偏干旱,大部分地区植被覆盖度与干旱程度呈正相关变化。而

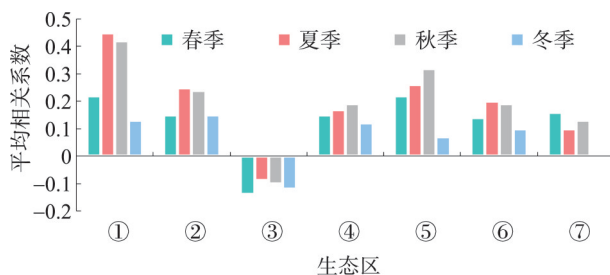


图9 华北地区各生态区不同季节植被覆盖度与PDSI的平均相关系数

Fig. 9 Average correlation between vegetation coverage and PDSI in different seasons in North China

相关关系与地表植被覆盖类型有很大的联系。典型草原地带对于干旱条件的反应最为强烈,其次为北部森林区域,再次为农田,最后为南部森林地区。

内蒙古草原生态区平均温度低、降水量较少且多集中于夏季、春旱频发、田间持水量低、热量充足,降水量是左右此类型区域气候干旱程度的主要因子^[2],在此地区PDSI能比较好地估算干旱条件。

华北平原农业区的地表干旱主要依靠夏季降水和人为引水来改善。本研究主要针对生长期位于5-10月的农作物,华北农业区5-10月是棉花的生长季节,6-9月是夏玉米等夏播植物的生长期,这个时期降水量充沛、气温升高,潜在蒸散量亦是全年中最高^[13],潜在蒸散量很可能大于降水量。农业区的PDSI虽因人类频繁的灌溉活动不能完全表现地表干旱程度,但大量农作物的生长状态与降水量和潜在蒸散量存在必然的相关关系。

人类活动对植被覆盖度以及地表干旱条件造成了较大影响。从数据上看,13年内城市以及城郊地区与PDSI普遍呈负相关。由于城市扩张速度加剧、城市边界逐渐模糊、农田大量转化为建筑用地,城郊地区植被覆盖度迅速下降。与此相反的是,因为城市绿化环境程度加快,城市城区内植被覆盖比例呈上升趋势^[31]。在人类地表建筑活动较为活跃的区域中,干旱条件对植被生长状态的影响大大减弱,影响植被覆盖度的主导因子已不是干旱条件了。因此在今后对华北地区的植被覆盖分析中,应考虑人类活动对植被覆盖以及植被变化趋势的影响。

海拔、地形等因素也影响着植被对于干旱条件的响应情况。在植被覆盖度较高、降水充沛、气候温暖的秦巴山地生态区和淮阳丘陵生态区,短时期的干旱条件变化对植被生长影响并不大,平均相关系数较小。但是在这两个生态区内,海拔较高的山地区域,例如豫西山地,其植被覆盖度与PDSI大多呈正相关。海拔、地形等因素对华北地区植被覆盖度的影响还有待研究。

参考文献(References)

- [1] Gan Chunying, Wang Xizhi, Li Baosheng, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024. [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. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.]
- [2] Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255-1268. [穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001-2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [3] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [4] Fu G, Shen Z X, Zhang X Z, et al. Modeling gross primary productivity of alpine meadow in the northern Tibet Plateau by using MODIS images and climate data. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 264-269.
- [5] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 106-115.
- [6] Hou X Y, Wu T, Yu L G et al. Characteristics of multi-temporal scale variation of vegetation coverage in the Circum Bohai Bay Region, 1999-2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 297-304.
- [7] Sun Yanling, Guo Peng. Spatiotemporal variation of vegetation coverage index in North China during the Period from 1982 to 2006. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 187-193. [孙艳玲, 郭鹏. 1982-2006年华北植被指数时空变化特征. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 187-193.]
- [8] Li Dengke, Fan Jianzhong, Wang Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2896-2903. [李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2896-2903.]
- [9] Chen Xiaoguang, Li Jianping, Han Yingjuan, et al. Vegetation coverage and its relationships with temperature and precipitation in Ningxia in 1981-2004. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1375-1383. [陈晓光, 李剑萍, 韩颖娟,

- 等. 宁夏近20年来植被覆盖度及其与气温降水的关系. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1375-1383.]
- [10] Omuto C T, Vargas R R, Alim M S, et al. Mixed-effects modelling of time series NDVI-rainfall relationship for detecting human-induced loss of vegetation cover in drylands. *Journal of Arid Environments*, 2010, (11): 1552-1563.
- [11] Gu Tingmin, Zhu Ruizhao, Lin Zhiguang, et al. *Climate of North China Plain*. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 1-2. [顾庭敏, 朱瑞兆, 林之光, 等. 华北平原气候. 北京: 气象出版社, 1991: 1-2.]
- [12] Zhang Yichi, Wu Kai, Yu Jingjie, et al. Characteristics of precipitation and air temperature variation during 1951-2009 in North China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1930-1941. [张一驰, 吴凯, 于静洁, 等. 华北地区1951-2009年气温、降水变化特征. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1930-1941.]
- [13] Liu Yuan, Wang Ying, Yang Xiaoguang. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*. 2010, 30(4): 923-932. [刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素. 生态学报, 2010, 30(4): 923-932.]
- [14] Zheng Jingyun, Ying Yunhe, Li Bingyuan, et al. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12. [郑景云, 尹云鹤, 李炳元, 等. 中国气候区划新方案. 地理学报, 2010, 65(1): 3-12.]
- [15] Sun Shizhou. Concerning the Vegetation Chinese Regionalization Map as a part of in the Natural Geographical Atlas of the Peoples Republic of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1998, 22(6): 523-537. [孙世洲. 关于中国国家自然地图集中的中国植被区划图. 植物生态学报, 1998, 22(6): 523-537.]
- [16] Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences. China ecosystem assessment and ecological security database. <http://www.ecosystem.csdb.cn/>. [中国科学院生态环境研究中心. 中国生态系统评估与生态安全数据库. <http://www.ecosystem.csdb.cn/>]
- [17] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1471-1434.
- [18] Piao S L, Fang J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 294-302.
- [19] Meteorological Reference Room, National Meteorological Information Center. China Meteorological Data Sharing Service System. <http://cdc.cma.gov.cn/>. [国家气象信息中心气象资料室. 中国气象科学数据共享服务网. <http://cdc.cma.gov.cn/>]
- [20] Wei Jie, Tao Shiyan, Zhang Qingyun. Analysis of drought in northern China based on the Palmer Severity Drought Index. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(Suppl.1): 91-99. [卫捷, 陶诗言, 张庆云. Palmer干旱指数在华北干旱分析中的应用. 地理学报, 2003, 58(增刊1): 91-99.]
- [21] Wei Jie, Ma Zhuguo. Comparison of Palmer Drought Severity Index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(Suppl.1): 117-124. [卫捷, 马柱国. Palmer干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. 地理学报, 2003, 58(增刊1): 117-124.]
- [22] Han Haitao, Hu Wenchao, Chen Xuejun, et al. Application and comparison of three meteorological drought indices. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 237-241, 247. [韩海涛, 胡文超, 陈学君, 等. 三种气象干旱指标的应用比较研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 237-241, 247.]
- [23] Liu Weiwei, An Shunqing, Liu Gengshan, et al. The Farther Modification of Palmer Drought Severity Model. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(2): 207-216. [刘巍巍, 安顺清, 刘庚山, 等. 帕默尔旱度模式的进一步修正. 应用气象学报, 2004, 15(2): 207-216.]
- [24] Palmer W C. *Meteorological Drought*. Research Paper No.45. Washington DC: U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- [25] An Shunqing, Xing Jiuxing. A modified Palmer's Drought Index. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1986(1): 75-82. [安顺清, 邢久星. 帕默尔旱度模式的修正. 应用气象学报, 1986(1): 75-82.]
- [26] Ma Zongjin, Fang Weiqing, Gao Qinghua, et al. *Major Natural Disasters and Countermeasures of Disaster Release in China (Theory)*. Beijing: Science Press, 1993. [马宗晋, 方蔚青, 高庆华, 等. 中国重大自然灾害及减灾对策(分论). 北京: 科学出版社, 1993.]
- [27] Liu Yu, Cai Lingen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(6): 28-34. [刘钰, 蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法对比. 水利学报, 1997(6): 28-34.]
- [28] Wu Zhengyi, Wang Xianpu, Liu Fangxun, et al. *Vegetation in China*. Beijing: Science Press, 1980. [吴征镒, 王献溥, 刘昉勋, 等. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.]
- [29] Liu Lian, Zhang Yumin, Wang Shouyi, et al. *Vegetation in Hebei*. Beijing: Science Press, 1996. [刘廉, 张裕民, 王守一,

等. 河北植被. 北京: 科学出版社, 1996.]

- [30] Kuang Shengshun. The horizontal zonation distribution of vegetation in Henan. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1991(2): 153-160. [邝生舜. 河南植被水平地带性的分布规律. *武汉植物学研究*, 1991(2): 153-160.]
- [31] Yang J, Huang C, Zhang Z, et al. The temporal trend of urban green coverage in major Chinese cities between 1990 and 2010. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(1): 19-27.

Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013

ZHAO Shuyi^{1,2,3,4}, GONG Zhaoning^{1,2,3,4}, LIU Xuying⁵

(1. College of Resource Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Beijing 100048, China;

3. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry, Beijing 100048, China;

4. Beijing Municipal Key Lab of Resources Environment and GIS, Beijing 100048, China;

5. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on previous studies, the climate drought index can be used to assess the evolution trend of ecological environment under various arid climatic conditions. It is necessary for us to further explore the relationship between vegetation coverage (index) and climate drought conditions. Therefore, in this study, based on MODIS-NDVI products and meteorological observation data, the Palmer Drought Severity Index (PDSI) and vegetation coverage in North China were first calculated. Then the interannual variation of PDSI and vegetation coverage over 2001-2013 was analyzed by using a Theil-Sen slope estimator. Finally in an ecoregion perspective the correlation between them was discussed. The experimental results demonstrated that PDSI index and vegetation coverage value varied over different ecoregions. During the period 2001-2013, vegetation coverage increased in southern and northern mountains in North China, while it showed a decreasing trend in Beijing-Tianjin-Tangshan City Circle area and suburban agricultural zone. During the 13 years, the climate of the northeastern part of North China became more humid, while in the southern part of North China, it tended to be dry. According to the correlation analysis results, 73.37% of North China had a positive correlation between the vegetation coverage and climate drought index. A negative correlation was observed mainly in urban and periurban areas of Beijing, Tianjin, Hebei Province and Henan Province. In most parts of North China, drought conditions in summer and autumn had more influence on vegetation coverage.

Key words: North China; vegetation coverage; PDSI; ecoregion; correlation analysis