

中国北方地区秋季植被变化及对气候变化的响应研究

安佑志^{1,2}, 高 炜^{2,3}, 高志强⁴, 施润和²

(1. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018; 2. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室; 华东师范大学 中国科学院对地观测与数字地球科学中心环境遥感与数据同化联合实验室, 上海 200241; 3. 美国科罗拉多州立大学 自然资源生态实验室 美国 柯林斯堡 80523; 4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘 要: 基于 1982 ~ 2006 年的 AVHRR GIMMS NDVI 数据, 使用一元线性回归和分段线性回归等方法, 通过对中国北方地区植被变化及其与气候因子的关系研究, 揭示该地区近 25 年来在不同时段的植被变化趋势及对气候变化的响应规律, 从而为该地区的生态环境变化研究提供理论依据。研究结果表明: 1) 中国北方地区秋季植被在 25 年时间内整体呈上升趋势。秋季 NDVI 在秋季温度断点之前以上升趋势为主, 秋季 NDVI 在秋季温度断点之后仍以上升趋势为主, 但上升趋势有所放缓。2) 通过分段线性回归方法和相关分析研究得出中国北方地区秋季温度是秋季 NDVI 变化的主要驱动力。在秋季温度断点之后, 秋季温度仍呈上升趋势而降水呈显著减少的面积增多, 从而在温度和降水双重影响下的干旱胁迫导致植被下降; 当秋季温度下降而秋季降水增多时干旱发生概率变小, 从而使秋季 NDVI 呈上升趋势。

关键词: 中国北方地区; 秋季; 植被; 温度; 降水; 干旱

中图分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 5867(2016) 11 - 0025 - 05

Autumn Vegetation Change and Response on Climate Change in Northern China

AN You - zhi^{1,2}, GAO Wei^{2,3}, GAO Zhi - qiang⁴, SHI Run - he²

(1. School of Geography and Tourism, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Joint Laboratory for Environmental Remote Sensing and Data Assimilation, ECNU & CEODE, CAS, Shanghai 200241, China; 3. Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins CO 80523, USA; 4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Based on the AVHRR GIMMS NDVI data from 1982 to 2006, using linear regression and piecewise linear regression method, the relationship between China northern vegetation change and climate factors to reveal the last 25 years of vegetation in the area at different times trends and the response of climate change, so as to provide a theoretical basis for the ecological changes in the region. The results showed that: (1) Northern China in 25 years autumn vegetation period overall upward trend. Before the fall of autumn NDVI temperature breakpoint on the rise mainly in autumn NDVI after the fall of temperature breakpoint is still upward trend in the main, but the upward trend has slowed down; (2) By piecewise linear regression and correlation analysis results in North China, the change in temperature in autumn is the main driving force for autumn NDVI. After the fall of temperature breakpoint autumn still increasing temperature and precipitation showed a significant reduction in the area increased, so the drought in temperature and precipitation of the double impact of stress leads to decreased vegetation; probability when the temperature drops in autumn and autumn drought will increase water change small, so that the autumn NDVI rise.

Key words: Northern China; autumn; vegetation; temperature; precipitation; drought

收稿日期: 2016 - 05 - 09

基金项目: 地理信息科学教育部重点实验室开放研究基金项目(KLGIS2015A03) 资助

作者简介: 安佑志(1984 -) 男, 山东沂水人, 副教授, 博士, 2014 年毕业于华东师范大学地图学与地理信息系统专业, 主要从事植被生态遥感研究工作。

0 引言

植被生长与温度、降水等气象因子密切相关,同时对气候变化具有积极的反馈作用,因此,植被与气候变化的关系研究已经成为全球变化研究的重要内容^[1-4]。植被对气候变化的空间差异明显,而遥感数据可以在大的时空尺度上较为客观地反映植被变化的空间差异,因此,卫星遥感技术又是植被变化监测的重要手段^[5-8]。归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)由于对植被变化敏感且具有较长的时间序列,所以被广泛地应用于植被覆盖度变化^[5,9-11]、植被生产力^[12]、碳循环^[1]、干旱^[13]等研究。目前常用的遥感数据有 AVHRR GIMMS NDVI、Terra MODIS NDVI、SPOT VGT NDVI、Land-sat TM/ETM+等^[14-15]。

近年来,有学者对北方地区或其他部分地区的秋季植被进行了研究,如朴世龙等^[16]利用 GIMMS NDVI (1982~1999年)数据研究表明:秋季植被增加速率最大的地区主要分布在大兴安岭的北端、天山北坡的部分地区、阿尔泰山地区和青海湖周边地区等,而植被增加是由于这些地区的温度上升所引起的生长季延长导致的。李月臣等^[17]基于 GIMMS NDVI (1982~1999年)数据对北方 13 省的植被动态变化进行分析表明:秋季植被像元 NDVI 增长幅度大,面积广,且与气温有着显著的相关性。孙艳玲和郭鹏^[18]利用 GIMMS NDVI (1982~2006年)数据对华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系研究表明:秋季植被 NDVI 增加趋势显著,秋季植被生长与气温的关系与降水的关系密切。张学珍等^[19]利用 GIMMS NDVI (1982~2006年)数据对中国东部秋季植被覆盖变化的研究表明植被变化具有阶段性。Piao 等^[20]利用 GIMMS NDVI (1982~2006年)数据将亚欧大陆的秋季植被分为两个阶段研究(1982~1997和1997~2006)表明:在中国北方地区秋季植被呈现先增后减的变化特点。Peng 等^[21]利用 GIMMS NDVI (1982~2010年)数据对中国地区的植被变化研究表明:在中国北方地区秋季植被整体上呈上升趋势,阶段性变化明显呈现先增后减的变化特点,与秋季温度的变化密切相关。在 25 年的时间尺度上研究植被变化将进一步深化我们对植被变化及其对气候变化响应的理解。在全球变暖的气候背景下,相关研究表明秋季温度增加会减少碳汇^[22],而生长季延长是秋季延迟导致的^[23-24],所以,具有针对性地研究中国北方地区秋季植被对气候变化的响应变得很有必要。

中国北方地区地处干旱半干旱地区,生态环境脆弱,在全球变暖的气候背景下研究秋季植被的变化具有重要的意义。本研究基于 1982~2006 年的 AVHRR GIMMS NDVI 数据,使用一元线性回归和分段线性回归等方法,通过对中国北方地区植被变化及其与气候因子的关系研究,揭示该地区近 25 年来在不同时段的植被变化趋势及对气候变化的响应规律,从而为该地区的生态环境变化研究提供理论依据。

1 研究数据

AVHRR GIMMSNDVI (1982~2006) 数据已经过辐射校正、几何校正、大气校正等处理,数据下载于马里兰大学网站(www.landcover.org)。温度和降水数据下载自英国东英吉利亚大学网站(<http://badc.nerc.ac.uk/home/index.html>)。干旱指数数据(PDSI)下载自 NCAR 网站(<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/pdsi.html>)^[25]。选取 AVHRR GIMMS NDVI (1982~2006) 数据对应时间段的温度、降水和 PDSI 数据用于后续的分析。为了与 AVHRR GIMMS NDVI 数据空间分辨率相统一,使用最近邻方法将温度、降水、干旱指数数据(PDSI)重采样为 8 km × 8 km。本研究中秋季是指 9 月和 10 月,分别计算秋季 NDVI、秋季温度、秋季降水、秋季 PDSI 的均值,以用于后面的计算。

2 研究方法

一元线性回归方法已经广泛地应用于植被、温度等时间序列数据的趋势分析中^[20,26]。本研究使用一元线性回归方法计算整个研究时段内植被或温度的整体变化趋势。

$$y = a + bt + \varepsilon \quad (1)$$

式中 y 表示的 NDVI 或气候因子变量, t 是指年时间序列, a 和 b 是系数, ε 是拟合的残差。

分段线性回归算法(Piecewise linear regression algorithm)是一个有用的工具来解决时间序列的趋势变化问题^[27]。分段线性回归方法已用于研究植被或温度的时空变化趋势^[20,26]。由于所研究的时间序列较短,所以在本研究中只考虑一个转折点的情况。

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon & (t \leq \alpha) \\ \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 (t - \alpha) + \varepsilon & (t > \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中 t 指年时间序列, y 指春季温度, α 是春季温度的转折点, β_0 、 β_1 和 β_2 是回归系数, ε 是拟合的残差, β_1 指春季温度断点之前的斜率, $\beta_1 + \beta_2$ 指春季温度断点之后的斜率; α 是由最小二乘法确定的; α 的取值限制在 1986~2002 年之间避免回归的数据较少;使用 t 检验,在 10% ($P < 0.1$) 的显著性水平对趋势计算结果做统计分析。

采用空间相关分析方法(公式 3)分析两个要素之间的关系,相关系数取值在 $[-1, 1]$ 之间;并对相关性结果进行显著性检验统计分析($P < 0.1$)。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中 n 为研究时段年数; x 、 y 为相关分析的两个变量, x_i 、 y_i 分别为他们的样本值。

3 结果与分析

3.1 趋势分析

从图 1(a) 来看, 25 年来大部分地区秋季 NDVI 发生

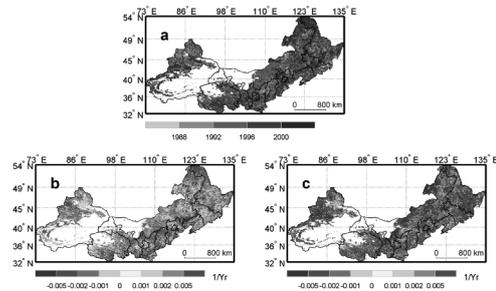
变化的转折点在 21 世纪初(25.8%)和 20 世纪 90 年代中期(25.2%),有 23.1% 的地区转折点在 20 世纪 90 年代末。从图 1(b) 来看,秋季 NDVI 在秋季 NDVI 断点之前总体上呈上升趋势($> 0.73.5%$;其中 19.7% 显著增加);但也有部分地区($< 0.26.5%$;其中 4.3% 显著减少)呈下降趋势,主要分布在黑龙江南部地区、内蒙古自治区北部地区和陕西南部地区。其中,59.4% 的面积上升较快(> 0.001),16.7% 的面积下降较快(< -0.001),但是有 23.9% 的面积变化较微弱($-0.001 \sim 0.001$)。从图 1(c) 来看,秋季 NDVI 在秋季 NDVI 断点之后部分地区仍然呈上升趋势($> 0.47.1%$;其中 14.2% 显著增加),主要分布在东北部分地区、黄土高原和青海省;呈下降趋势的地区增多($< 0.52.9%$;其中 9.8% 显著减少),主要分布在华北地区 and 新疆地区。其中,40.6% 的面积上升较快(> 0.001),44.9% 的面积下降较快(< -0.001),但是有 14.6% 的面积变化较微弱($-0.001 \sim 0.001$)。这表明秋季 NDVI 在秋季 NDVI 断点前后都以上升趋势为主,秋季 NDVI 在秋季 NDVI 断点之后呈下降趋势的面积扩大,而变化较微弱的面积在减少,如图 1(b) 和图 1(c) 所示。

为了进一步分析秋季 NDVI 变化的驱动力,以秋季 NDVI 断点为准,分别计算了秋季 NDVI 断点前后的秋季温度、秋季降水和秋季 PDSI 指数,如图 2 所示。从图 2 来看,秋季温度、秋季降水和秋季 PDSI 在秋季 NDVI 断点前后差异加大。其中,秋季温度在秋季 NDVI 断点前大部分地区呈上升趋势($> 0.74%$;其中 25.1% 显著增加),但局部地区也呈现出下降趋势($< 0.26%$;其中 8.4% 显著减少);秋季温度在秋季 NDVI 断点后呈下降趋势地区减少($< 0.12.5%$;其中 1.5% 显著减少),呈上升趋势的面积呈增加趋势($> 0.87.5%$;其中 32% 显著增加),主要分布在华北、东北的大部分地区和新疆地区,如图 2(a)、图 2(b) 所示。秋季降水在秋季 NDVI 断点前主要以下降趋势为主($< 0.57.4%$;其中 2.9% 显著减少),在秋季 NDVI 断点后仍然呈下降趋势($> 0.57.3%$;其中 4.8% 显著增加),如图 2(c)、图 2(d),但分布地区发生了变化,秋季降水在秋季 NDVI 断点前下降趋势的地区主要分布在黄体高原,之后主要分布在东北和华北大部分地区。秋季 PDSI 指数在秋季 NDVI 断点前以下降趋势为主($< 0.61.4%$;其中 19.1% 显著减少),之后仍以下降趋势为主($< 0.59.8%$;其中 15.6% 显著减少)。

结合图 1 和图 2 及统计结果分析来看,可得出初步结论即秋季 NDVI 断点前后的变化在不同地区分别与基于秋季 NDVI 断点的秋季温度和降水前后的变化具有相似的变化趋势。因此,为了验证初步得出结论的准确性,需要进一步分别计算基于温度和降水断点的秋季 NDVI 的变化趋势及相关分析。

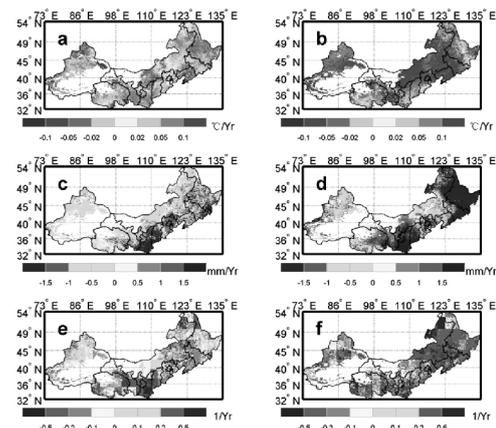
3.2 秋季 NDVI 的主导气候因素分析

图 3 描述了秋季温度变化的趋势。如图 3(a) 所示,基于一元线性回归方法计算的结果表明:25 年来秋季温度总体呈上升趋势($> 0.99.4%$;其中 66.9% 显著增加)。如图 3(b) 所示,大部分地区秋季温度转折点发生在 21 世



(a) 秋季 NDVI 断点图; (b) 秋季 NDVI 在秋季 NDVI 断点之前; (c) 秋季 NDVI 在秋季 NDVI 断点之后的趋势空间分布
图 1 秋季 NDVI 趋势图

Fig. 1 Trend maps of the study area for autumn NDVI time series



(a) 秋季温度在秋季 NDVI 之前; (b) 秋季温度在秋季 NDVI 之后的趋势图; (c) 秋季降水在秋季 NDVI 之前; (d) 秋季降水在秋季 NDVI 之后的趋势图; (e) 秋季 PDSI 在秋季 NDVI 之前; (f) 秋季 PDSI 在秋季 NDVI 之后的趋势图

图 2 秋季温度、秋季降水和秋季 PDSI 趋势图(以 NDVI 为主)

Fig. 2 Trend maps of the study area for autumn temperature, autumn precipitation, and autumn PDSI time series. Autumn temperature trend

纪初(35.9%)其次是 20 世纪末(18.9%)和 20 世纪 80 年代末 90 年代初(24.8%)。如图 3(c) 所示,秋季温度在秋季温度断点之前以上升趋势为主($> 0.66.2%$;其中 21% 显著增加),局部地区呈下降趋势($< 0.33.8%$;其中 7.2% 显著减少);如图 3(d) 所示,秋季温度在秋季温度断点之后仍以上升趋势为主($> 0.82.5%$;其中 26% 显著增加),局部地区呈下降趋势($< 0.17.5%$;其中 2.2% 显著减少),秋季温度下降地区主要分布在青海省东部和甘肃省南部。

如图 4(a) 来看,基于一元线性回归方法计算的中国北方地区秋季 NDVI 总体上呈上升趋势($> 0.71.4%$;其中 31.2% 显著增加),局部下降地区($< 0.28.6%$;其中 3.6% 显著减少)主要分布在内蒙古自治区中部和呼伦贝尔草原及黑龙江省南部。如图 4(b)、图 4(c) 所示,秋季 NDVI 在秋季温度断点之前($> 0.72.4%$;其中 20.6% 显著增加; $< 0.27.6%$;其中 4.4% 显著减少)和之后

(> 0 , 53.8% ; 其中 16.1% 显著增加 ; < 0 , 46.2% ; 其中 8.8% 显著减少) 仍以上升趋势为主。对比图 4 (b) 和图 4 (c) , 可以发现大部分地区秋季 *NDVI* 在秋季温度断点前后变化趋势发生了逆转。而这与图 3 (c) 和图 3 (d) 秋季温度在秋季温度断点前后变化规律不太一致。同样的 , 对比图 1 (b) 和图 1 (c) 及图 2 (a) 和 (b) 也可以发现类似的规律。这表明秋季温度是秋季 *NDVI* 变化的重要驱动力 , 但是温度的增高同时也需要增加降水 , 否则就会发生干旱导致植被下降 , 如陕西南部地区 (图 3 (c) , 图 4 (b) , 图 5 (a) , 图 5 (c)) 和内蒙古自治区中部 (图 3 (d) , 图 4 (c) , 图 5 (b) , 图 5 (d)) ; 当温度和降水同时增加但不协调 (温度增加较快而降水增加较慢) 时也会发生轻度干旱导致植被下降 , 如黑龙江省 (图 3 (c) , 图 4 (b) , 图 5 (a)) ; 当温度下降而降水增多时植被呈上升趋势 (图 3 (d) , 图 4 (c) , 图 5 (b) , 图 5 (d)) 。

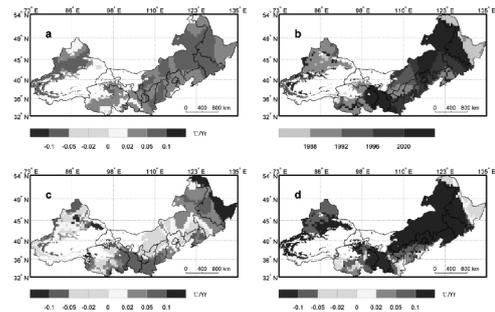
如图 6 所示 秋季 *NDVI* 与秋季温度在大部分地区具有较好的相关性 (> 0 , 55.6% ; 其中 10.9% 显著正相关) , 秋季 *NDVI* 与秋季降水也具相关性相对较差 (> 0 , 43.1% ; 其中 3.4% 显著正相关) 。秋季 *NDVI* 与秋季 *PDSI* 也具有相对较好的相关性 (> 0 , 60% ; 其中 18.9% 显著正相关) 。

基于一元线性回归方法得出的 1982 ~ 2006 年的秋季植被变化趋势如图 4 (a) 所示与 piao 等^[20]的研究结果相似。研究区部分地区的秋季植被研究也得出类似的结论 , 如华北地区^[18]、新疆地区^[28]和东北地区^[19]。对比图 1 (a) 及图 4 (b) 和图 4 (c) 发现 : 北方地区不同地区秋季 *NDVI* 发生转折的时间不一致 , 且秋季 *NDVI* 除在部分地区呈持续增加或减少趋势外 , 大部分地区变化并不持续 , 呈现先增加后减少或先减少后增加的变化特点 , 这与张学珍等^[19]使用聚类分析方法在东北地区和华北部分地区得出的结论类似。其中 , 由于有 23.1% 的地区秋季 *NDVI* 转折点发生在 20 世纪 90 年代末 , 所以秋季 *NDVI* 在秋季温度断点之前的变化趋势 (图 4 (b)) 与 piao 等人 (1982 ~ 1997)^[20]和李月臣等^[17] (1982 ~ 1999) 的研究结果相似 , 即整体呈增加趋势 , 局部呈下降趋势。

秋季温度断点之后的秋季降水增加的地区主要分布在青海东南部和陕西南部地区 , 这与郭江勇等^[29]和刘抗等^[30]的研究结果结论一致。但仅在局部地区秋季降水增加与秋季 *NDVI* 呈正相关。对比图 3 (a) 和图 4 (a) 发现秋季 *NDVI* 与秋季温度的总体趋势没有很好的对应关系 , 但是基于秋季温度断点计算的秋季 *NDVI* 在大部分区域与秋季温度具有较好的关联性 , 而与秋季降水和秋季 *PDSI* 在局部地区具有较好的相关性。尽管秋季 *NDVI* 与秋季温度和秋季降水的相关性相对较弱 , 但秋季温度对秋季 *NDVI* 的影响相对大一些 , 前人的研究也表明 : 秋季 *NDVI* 与秋季温度具有相对较好的相关性^[20-21] , 不同的水热组合对秋季 *NDVI* 的影响各异。

研究表明 : 秋季 *NDVI* 总体上呈上升趋势 , 在秋季温度断点之前上升较快 , 在秋季温度断点之后上升变缓。这是因为在秋季温度断点之后秋季温度仍呈上升趋势而降水呈显著减少的面积增多 , 从而在温度和降水双重影

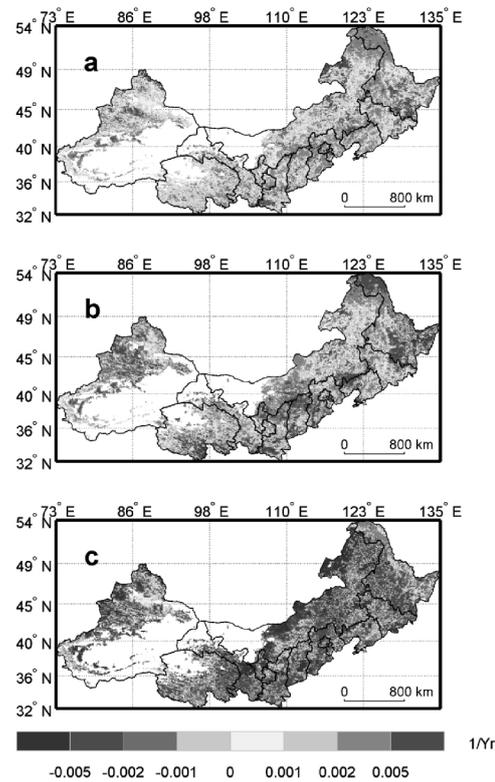
响下的干旱胁迫导致植被下降 , 如内蒙古中部地区 ; 当秋季温度下降而秋季降水增多时干旱发生概率变小 , 从而使秋季 *NDVI* 呈上升趋势 , 如黄土高原地区。



(a) 基于一元线性回归方法的秋季温度变化趋势图 (1982 ~ 2006) ;
(b) 秋季温度断点图 ; (c) 秋季温度在秋季温度断点之前 ;
(d) 秋季温度在秋季温度断点之后的趋势分布图

图 3 秋季温度变化趋势图

Fig. 3 Trend maps of the study area for autumn temperature time series



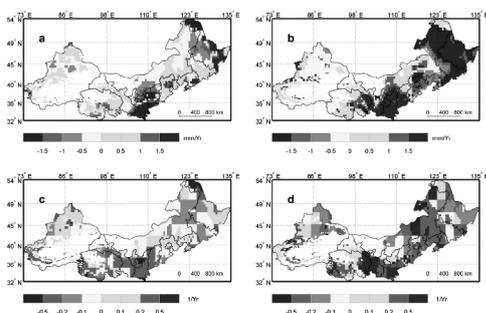
(a) 基于一元线性回归方法的秋季 *NDVI* 变化趋势图 (1982 - 2006) ;
(b) 秋季 *NDVI* 在秋季温度断点之前 ; (c) 秋季 *NDVI* 在秋季温度断点之后的趋势分布图

图 4 秋季 *NDVI* 变化趋势图 (基于温度断点)

Fig. 4 Trend maps of the study area for autumn *NDVI* time series

4 结束语

通过对中国北方地区 25 年来的植被指数和温度、降水等气象因子的分析 , 可以得出如下主要结论 : 25 年来 , 中国北方地区秋季植被整体上呈上升趋势。秋季 *NDVI* 在秋季温度断点之前以上升趋势为主 , 秋季 *NDVI* 在秋季



(a) 秋季降水在秋季温度断点之前; (b) 秋季降水在秋季温度断点之后的趋势图; (c) 秋季 PDSI 在秋季温度断点之前; (d) 秋季 PDSI 在秋季温度断点之后的趋势图

图 5 基于秋季温度断点的秋季降水与 PDSI 指数的趋势图

Fig. 5 Trend maps of the study area for autumn precipitation, and autumn PDSI time series

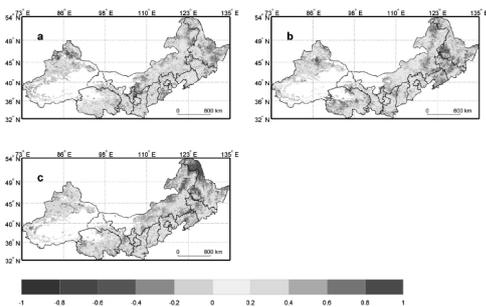


图 6 秋季 NDVI 与秋季温度、秋季降水和秋季 PDSI 等气象因子的相关系数图(1982~2006)

Fig. 6 Spatial patterns of correlations analysis between autumn NDVI and autumn temperature, autumn precipitation, autumn PDSI from 1982 to 2006

温度断点之后仍以上升趋势为主,但上升趋势有所放缓。在秋季温度断点之后秋季温度仍呈上升趋势而降水呈显著减少的面积增多,从而在温度和降水双重影响下的干旱胁迫导致植被下降,如内蒙古中部地区;当秋季温度下降而秋季降水增多时干旱发生概率变小,从而使秋季 NDVI 呈上升趋势,如黄土高原地区。

参考文献:

[1] Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300 (5625): 1 560 - 1 563.

[2] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学* 2007, 37(11): 1 504 - 1 514.

[3] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 653 - 661.

[4] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 等. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 589 - 598.

[5] Loarie, S. R., Lobell, D. B., Asner, G. P., et al. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil [J]. *Nature Climate Change* 2011, 1(2): 105 - 109.

[6] Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981 - 2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers [J]. *Remote sensing of Environment*, 2012(121): 144 - 158.

[7] 李敏敏, 延军平. 华北段农牧交错带气候变化特征及其响应[J]. *干旱区资源与环境* 2013, 27(5): 100 - 106.

[8] 张靓, 曾辉. 基于 MODIS 数据的内蒙古土地利用/覆被变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(1): 31 - 36.

[9] 邱海军, 曹明明. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国植被覆盖时空变化分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(2): 335 - 340.

[10] 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): 1 923 - 1 927.

[11] Xu, X., Piao, S., Wang, X., et al. Spatio-temporal patterns of the area experiencing negative vegetation growth anomalies in China over the last three decades [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 35 701 - 35 709.

[12] Gais, P., Reichstein, M., Viogy, N., et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 [J]. *Nature*, 2005, 437(7058): 529 - 533.

[13] Mohammad, A., Wang, X., Xu, X., et al. Drought and spring cooling induced recent decrease in vegetation growth in Inner Asia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013(178 - 179): 21 - 30.

[14] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 166 - 174.

[15] 赵健赞, 彭军还. 基于 MODISNDVI 的青海高原植被覆盖时空变化特征分析[J]. *干旱区资源与环境* 2016, 30(4): 67 - 73.

[16] 朴世龙, 方精云. 1982 - 1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 119 - 125.

[17] 李月臣, 宫鹏, 刘春霞, 等. 北方 13 省 1982 - 1999 年植被变化及其与气候因子的关系[J]. *资源科学* 2006, 28(2): 109 - 117.

[18] 孙艳玲, 郭鹏. 1982 - 2006 年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 7 - 12.

[19] 张学珍, 郑景云, 何凡能, 等. 1982 - 2006 年中国东部秋季植被覆盖变化过程的区域差异[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 28 - 37.

(下转第 35 页)

型企业普遍、大量存在于城市之中,企业的业务特点相同或相似,均以网点出租或自营的方式来盈利,因此,网点资产经营管理相关系统的开发应考虑到软件复用的问题,不能采用“一个企业、一套系统”的传统开发模式。

本文认为需要对商业网点企业的业务模式及其管理平台的可复用开发予以关注,并使用领域工程方法对商业网点管理进行领域分析、设计与实现。在基于 FODA 方法的领域分析过程中,产生了商业网点管理领域的场景模型、特征模型、信息模型和操作模型;在领域设计过程中,产生领域的一般体系框架、可复用构件组织关系;在领域实现过程中,使用 C#.NET 实现了可复用构件。将商业网点管理领域的业务特点映射到信息化平台开发当中,能够为此类型平台的构建提供框架级别和代码级别的复用产品。所开发的构件定义明确、使用灵活、业务逻辑抽象、较为合理,能够保证较大粒度的服务复用,从而节省了大量的开发时间和开发成本。在产生领域工程产品的基础上,本文实施了基于领域工程产品的应用工程并取得了良好的效果,应用平台在 KL 集团等多个商业网点企业中得以普及,证明了网点管理领域工程产品的可行性。同时,在构件开发过程中,采用将地理信息系统与管理信息系统相结合的方式,充分发挥 GIS 在空间数据表达方面的优势,在优化系统可视化效果、提高对数据的直观表达能力、简化查询和统计等方面做出了尝试。

参考文献:

- [1] 李克勤, 陈兆良. 领域工程概述 [J]. 计算机科学, 1999, 26(5): 21-25.
- [2] 孙建鹤, 丁鹏飞, 李山, 等. 面向商铺网点管理企业的 GIS 应用研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(12A): 84-85.
- [3] 唐建荣. 网点资源信息化管理的探索与实践 [J]. 商业企业, 2008(6): 33-36.
- [4] 王远飞, 刘黎明, 杨琴芝, 等. 上海市商业网点管理地理信息系统设计与实现 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2007(6): 29-36.
- [5] 张世琨, 张文娟, 常欣, 等. 基于软件体系结构的可复用构件制作和组装 [J]. 软件学报, 2001, 12(9): 1351-1359.
- [6] 张伟, 梅宏. 一种面向特征的领域模型及其建模过程 [J]. 软件学报, 2003, 14(8): 1345-1356.
- [7] Lisboa LB, Garcia VC, Lucrédio D, et al. A systematic review of domain analysis tools [J]. Information and Software Technology, 2010, 52(1): 1-13.
- [8] Mili H, Mili A, Yacoub S, et al. Reuse-based software engineering: techniques, organization, and controls [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2001.
- [9] Osis J. Model-driven domain analysis and software development: Architectures and functions: Architectures and functions [M]. Hershey: IGI Global, 2010.
- [10] Thüm T, Kästner C, Benduhn F, et al. FeatureIDE: An extensible framework for feature-oriented software development [J]. Science of Computer Programming, 2014(79): 70-85.
- [11] Turner CR, Fuggetta A, Lavazza L, et al. A conceptual basis for feature engineering [J]. Journal of Systems and Software, 1999, 49(1): 3-15.
- [12] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. Global Change Biology, 2011, 17(10): 228-239.
- [13] Peng S, Chen A, Xu L, et al. Recent change of vegetation growth trend in China [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): 027-039.
- [14] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming [J]. Nature, 2008, 451(7174): 49-52.
- [15] Dragoni D, & Rahman A. F. Trends in fall phenology across the deciduous forests of the Eastern USA [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012(157): 96-105.
- [16] Zhu W, Tian H, Xu X, et al. Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982-2006 [J]. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21(2): 260-271.
- [17] Dai A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2011, 116(D12): D19112.
- [18] Wang X, Piao S, Ciais P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [19] Toms J. D., Lesperance M. L. Piecewise Regression: A Tool for Identifying Ecological Thresholds [J]. Ecology, 2003, 84(8): 2034-2041.
- [20] 赵霞, 谭琨, 方精云. 1982-2006 年新疆植被活动的年际变化及其季节差异 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 10-16.
- [21] 郭江勇, 林纾, 万莉莉. 500 hPa 高度场对西北地区秋季降水的影响分析 [J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1749-1754.
- [22] 刘抗, 李照荣, 张宇. 1971-2010 年中国西北地区秋季降水变化特征 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 1-9.

[编辑: 刘莉鑫]

[编辑: 任亚茹]

(上接第 29 页)