江苏省植被覆盖动态变化及其与气候因子的关系

徐 勇, 奚砚涛

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221000)

摘 要: [目的] 研究 2000—2013 年江苏省植被覆盖状况的时空分布特征,并从年际和季节尺度上分析植被覆盖的空间变化特征以及 NDVI 与气温、降水量的相关关系和滞后性,以期为区域生态环境监测、生态环境保护和植被可持续发展提供参考。[方法] 运用美国国家航空航天局(NASA)发布的 2000—2013 年 MODIS 13Q1 级产品(归一化植被指数)和江苏省 1999—2013 年各气象站点气象资料,采用最大值合成法、趋势线分析法、Person 相关分析法和偏相关分析法。[结果] (1) 14 a 来,江苏省植被 NDVI 整体上呈下降趋势,且在时间和空间尺度上有所差异; (2) 由于气温、降水量、厄尔尼诺和拉尼娜等事件的影响,NDVI 在年际和季节间呈波动性变化; (3) NDVI 对降水变化响应的滞后期为 1 个月,NDVI 基本同步于相应气温的变化,仅夏季滞后期为 1 月。[结论] 从时间尺度上看,年际、秋季,NDVI 呈下降趋势,而春夏季,NDVI 呈上升趋势;从空间尺度上看,江苏省西部的植被覆盖程度明显优于东部沿海和长江中下游平原。NDVI 在年际和季节尺度上与气候因子的相关性显著,且与气温的相关性最好。

关键词: 气候因子; 趋势线分析法; 厄尔尼诺; NDVI; 江苏省

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2015)04-0195-07 **中图分类号**: Q948

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.037

Change of Vegetation Coverage in Jiangsu Province and Its Relation with Climatic Factors

XU Yong, XI Yantao

(*School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu* 221000, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial distribution of vegetation on both annual and seasonal scale was illustrated, and the correlations between NDVI and climate factors, including air temperature, precipitation and the lag of NDVI were analyzed. Upon these, we aimed to provide some references for the monitoring and protection of eco-environment and sustainable development of vegetation. [Methods] MODIS13Q1 data published by NASA in 2000—2013 and the meteorological data monitored by sites of Jiangsu Province in 1999—2013 were used. Methods of maximum value synthesis, trend line analysis and Pearson correlation analysis on seasonal and annual scale were applied. [Results] (1) As a whole, vegetation NDVI in the 14 year long interval in Jiangsu Province showed a declining tendency on different tempo-spatial scales. (2) Due to the influence of the climate events, like El Nino or La Nina events and so on, NDVI fluctuated on seasonal and annual scale. (3) NDVI showed a one-month lag of response to precipitation change, while the changes of NDVI and temperature synchronized largely, only a 1-month lag was observed in summer. [Conclusion] From temporal scale, decreasing tendencies of NDVI were observed on the annual scale and in the seasonal periode of autumn. while on the seasonal scale of spring and summer it tended to go high. From the spatial scales, the vegetation coverage in the west of Jiangsu Province was significantly better than those in the eastern coastal plain and in the middle and lower reaches of the Yangtze River. NDVI showed significant correlations with climate factors on the seasonal and annual scale, especially with air temperature.

Keywords: climatic factors; trend line analysis; El Nino; NDVI; Jiangsu Province

收稿日期:2014-09-07 **修回日期**:2014-11-23

资助项目:国家自然科学基金项目"面向流域的城市化水文效应与城市可持续发展研究"(41201166); 国家国际科技合作专项(2012DFG22140)

第一作者:徐勇(1988—),男(汉族),湖南省益阳市人,硕士研究生,研究方向为资源环境遥感。E-mal:xuyongjiangsu@163.com。

通信作者:奚砚涛(1973—),男(汉族),江苏省徐州市人,博士,副教授,硕士生导师。主要从事遥感与地理信息系统研究。E-mail:xyt556@163.com。

植被覆盖变化及其与气候变化相互关系的研究是近年来全球变化研究的一个重要课题[1-2]。植被的空间分布及其变化特征是植被对气候长期适应的结果。一方面,气候决定着植被的空间分布,每种气候类型都有对应的植被类型;另一方面,不同的植被类型通过影响与大气间的物质和能量相互作用对气候产生影响[3]。遥感数据因其具备时间和空间上的连续性,常被用来监测全球和区域植被变化趋势[4],也是植被—气候关系研究中非常有效的数据源。利用MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据,能实现植被覆盖变化趋势空间差异的直观表达,从而更加直观地了解自然因素和人为活动对植被覆盖变化趋势的影响。不同时相的植被指数可以用来监测某一地区的植被覆盖变化趋势[5]、植被的生长状况[6]、叶面积指数[7]、植被生产力[8]等。许多学者利用NDVI数据对植被覆盖变化趋势及其与气候因子之间的相互关系做了大量研究[7-9],也取得了一系列成果。已有的研究成果表明,不同地区、不同植被类型植被覆盖变化趋势表现出较大的差异[10],同一地区植被覆盖变化趋势在年际和季节尺度上也表现出不同的变化趋势[11]。气温和降水是与植被生长息息相关的两个气候因子,其在时空上的变化对区域植被活动和植被覆盖状况有显著影响[12]。渠翠平等[13]及吴丽丽等[14]的研究表明,植被对气温和降水的响应存在一定的时滞性。近年来全国范围内植被覆盖以改善为主,但由于快速城市化的影响,珠江三角洲和长江三角洲地区成为植被覆盖下降最明显的地区[15]。近年来,随着江苏省经济的飞速发展,城市化水平呈现快速增长的态势。由附图4可知,2000—2010年江苏省城市化率由41.5%提高到60.6%。江苏省城市化水平由北往南梯度递增,2010年江苏省城市化水平居全国第7位,苏南地区城市化率最高,苏中地区次之,苏北地区最低。截止到2010年底,苏南、苏中、苏北地区城市化率分别为70.3%,56.0%和51.5%。农业结构的调整和非农业建设占用等导致1999—2007年江苏省耕地减少了35 300 hm^2,并有持续减少的趋势[16]。随着城市化进程的加快,江苏省范围内植被覆盖率有下降的趋势,尤其在长江下游地区太湖平原地区,城市面积不断扩大,农作物种植面积不断减少,该地区已成为江苏省植被覆盖率最低的地区[15]。在以往的研究中,对流域尺度和大区域尺度的植被覆盖变化趋势研究较多,而对江苏省植被覆盖变化趋势的研究较少。因此,本研究利用MODIS NDVI数据和气象数据,在年际和季节尺度上分析2000—2013年江苏省植被覆盖时空变化趋势。此外,由于江苏省地势平缓,平原面积在70%以上,该省植被覆盖以农用地为主,林地、草地和灌木所占比例很少,而农用地对降水、温度等因子的变化较为敏感[17],为进一步了解江苏省植被覆盖变化与气候变化相互关系,将探讨分析降水、气温2个气候因子变化对NDVI变化的相关性以及NDVI对气候、降水响应的时滞性规律。研究结果可为江苏省生态环境监测、生态环境保护和植被可持续发展提供参考。

1 数据处理与研究方法

1.1 NDVI资料与处理

研究中使用的MODIS数据能够准确的反映植被的变化情况,数据来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的MOD13Q1产品,时间跨度为2000年2月至2013年12月,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,全年共23个时相,经过了几何精校正、辐射校正、最大值合成等处理。利用MRT投影转换工具和Cygwin软件对MODIS数据进行投影和格式转化批处理,在ENVI中利用江苏省行政区划矢量数据进行对重投影后的MODIS数据集进行批量裁剪,裁剪出研究区的NDVI数据集。

利用ENVI和ArcGIS对研究区NDVI数据进行统计和分析。采用目前国际上通用的最大化合成法(maximum value composites, MVC)合成月最大NDVI数据。该处理可以减少大气中云、颗粒以及太阳高度角的影响。由于2000年1月MODIS NDVI数据的缺失,为了保证MODIS NDVI时间序列的完整性,取2001—2013年1月NDVI平均值为2000年1月NDVI值。从年际和季节尺度分析植被NDVI值的变化特征。根据气象学方法划分为4季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至翌年2月为冬季。使用均值法合成2000—2013年各年NDVI平均值和春夏秋季的NDVI平均值。江苏省植被覆盖类型以农业植被和落叶林为主,冬季温度较低,植被基本停止生长或已经枯萎,因此不对冬季的NDVI值进行分析。

1.2 气象资料与处理

采用由中国气象局和国家信息中心提供的降水和气温数据。数据可从中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do)下载。采用江苏省1999—2008年13个和2009—2013年22个基本、基准地面气象观测站及自动站《中国地面气候

资料月值数据集》,包括气温和降水量数据,时间分辨率为月,气温精度为 0.1 ℃,降水量精度为 0.1 mm,数据经过精度控制,质量良好。考虑到 NDVI 对于气候因子变化的响应有滞后期[9],所以对年际和季节 NDVI 分别与 4 个时滞期气候因子进行相关分析,求出年际和季节 NDVI 分别与 4 个滞后期气候因子的相关系数,并根据相关系数分析年际和季节 NDVI 对各气候因子的响应特征,以及最大相关系数所对应的滞后期。所有气候因子数据均为同期江苏省各站点气象数据均值。以春季 NDVI 与 4 个时滞期气候因子的为例,4 个滞后期分别为:(1) 滞后 0 月,降水量为 3—5 月累积降水量,温度为 3—5 月平均温度;(2) 滞后 1 月,降水量为 2—4 月累积降水量,气温为 2—4 月平均温度;(3) 滞后 2 月,降水量为 1—3 月累积降水量,气温为 1—3 月平均温度;(4) 滞后 3 月,降水量为前年 12—2 月累积降水量,气温为前年 12—2 月平均温度。年际、夏季和秋季气候因子的处理方式与春季气候因子的处理方式相同。

1.3　趋势线分析法

趋势线分析法是对一组随时间变化的变量进行一元线性回归分析,从而预测其未来的变化趋势[4]。为了研究 2000—2013 年江苏省植被覆盖变化的空间分布特征,采用一元线性回归分析的方法,分析每个像元的 NDVI 变化趋势,计算数据集中所有像元的 NDVI 与时间的回归斜率。趋势线的斜率 slope>0,说明 NDVI 值在 n 年间有增加的趋势;若 slope<0,则呈减少趋势;slope 绝对值越大,说明植被覆盖状况变化越明显。根据 slope 值的范围及江苏省实际情况,去除超出阈值的异常值,定义[10]严重退化(slope<−0.009),中度退化(−0.009<slope<−0.003),基本不变(−0.003<slope<0.003),中度改善(0.003<slope<0.009),明显改善(slope>0.009)5 个变化区间,最终得到 2000—2013 年江苏省植被趋势变化图,并统计每个区间的面积和面积百分比。本文在 ENVI 中利用 IDL 编程,从年、季 2 个尺度对每个像元进行趋势线分析,求出每个像元近 14 a 的变化趋势,并将趋势分析结果转为 ArcGIS 中的 Grid 格式以直观反映植被覆盖在空间上的变化趋势。

1.4　相关分析

利用 SPSS 19.0 软件,采用相关分析和偏相关分析法进行植被覆盖变化对 4 个不同滞后期气候因子的响应分析[18]。通过计算 NDVI 与各气候因子的偏相关系数,在消除其他变量影响的条件下,得出其与各气候因子的相关程度。偏相关系数越大,表明气候因子与 NDVI 值之间的相关性越好,该气候因子对植被生长状况的影响越大,反之则相关性越差,对植被生长状况的影响越小。对相关系数和偏相关系数计算结果,采用 t 检验法进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　NDVI 时空格局及变化趋势

2.1.1　**江苏省 NDVI 时空分布格局**　通过计算 2000—2013 年年平均 NDVI 和季节平均 NDVI 来反应江苏省近 14 a 来的植被覆盖状况,并划分等级[5]。由附图 5 可知,江苏省植被覆盖状况呈现出明显的区域差异和季节差异。江苏省多年平均植被覆盖程度良好,仅各城市中心区和东部沿海滩涂覆盖程度较低。江苏省植被覆盖程度表现为:夏季>春季>秋季。夏季,江苏省范围内植被覆盖程度最好,空间分布较为一致,无明显差异,仅太湖平原地区和东部沿海盐碱地区植被覆盖较低。春季,植被覆盖程度较夏季弱,且空间差异明显,呈现出由东南往西北梯度递增的趋势,江苏省里下河平原区和苏北地区植被覆盖程度明显好于江苏省东南部太湖平原地区、江苏省西南部丘陵区和江苏省东部沿海地区。秋季,该省范围内植被覆盖程度都较低,但西南部较高,该区 NDVI 值在0.6左右,这是由于该区为丘陵,分布有大量的森林。江苏省里下河平原区和苏北地区为主要的农业区,春季和夏季 NDVI 值较高,这是由于长时间进行制约化经营,追求作物高产导致投入增加,从而使植被覆盖程度增高。江苏省快速的城市化和工业化使得各城市中心区面积不断扩大,植被覆盖程度较低附图 5 所示,NDVI 值均在 0.4 以下,占该省面积的 6.38%。

2.1.2　**江苏省 NDVI 空间分布变化趋势**　根据江苏省 NDVI 变化趋势斜率值,将江苏省 NDVI 变化情况划分为严重退化、中度退化、基本不变、中度改善、明显改善 5 类,其空间分布情况如附图 6 所示。

从年际尺度来看(表 1,附图 6),江苏省植被明显改善和中度改善区域面积共为 3.93×10^4 km^2,占总面积的 38.29%,主要分布在江苏省东南部的长江中下游的太湖平原、江苏省西南部的丘陵区和江苏省腹地的里下河区;3.47×10^4 km^2 的区域植被覆盖基本不变;植被覆盖严重退化和中度退化的区域为 2.86×10^4 km^2,占总面积的 27.85%,主要分布在江苏省各市中心城区、江苏省东部沿河沿海的滨江平原及以北区域和苏北地区。因城市有环湖、沿江、沿海发展的特点,故在太湖、高邮湖、洪泽湖、骆马湖、长江及沿海区域植被覆盖状态恶化尤为严重。

从季节尺度来看(表 1,附图 6),春季,江苏省植被覆盖情况较为稳定,基本不变区域面积为

6.241×10⁴ km²，占总面积的60.83%；中度改善区域面积为1.336×10⁴ km²，占总面积的13.02%，主要分布于江苏省西南部丘陵和平原地区，该区水热条件丰沛，是森林资源分布最多的区域；退化区域面积为2.640×10⁴ km²，占总面积的25.73%，主要分布在东部沿海和各城市中心区。夏季，江苏省植被覆盖状况明显改善，明显改善和中度改善区域面积共为4.037×10⁴ km²，占总面积的39.35%，主要分布在江苏省西南部的丘陵区、江苏省腹地里下河区和苏北连云港及盐城部分区域；退化面积较少，仅占区域总面积的4.86%，主要分布在东部沿海和各城市中心区。秋季，江苏省植被覆盖状况恶化最为严重，退化区域面积为4.487×10⁴ km²，占区域总面积的43.74%，主要分布在江苏省腹地的里下河区和苏北地区，其它地区零星分布；植被状况改善的区域面积为1.128×10⁴ km²，仅占区域总面积的10.99%，零星分布于江苏省南部和东部各区。春季，夏季为植被生长季，江苏省沿海地区和各城市中心区植被呈退化趋势，主要是由于近年来快速城市化、耕地面积缩减和人类活动所产生的负面影响；秋季植被退化区域主要集中在里下河平原和各农业区，作物的收割是引起这一现象的根本原因。

表1 江苏省NDVI变化统计

NDVI斜率	变化趋势	年际变化		春季变化		夏季变化		秋季变化	
		面积/10⁴ km²	比例/%	面积/10⁴ km²	比例/%	面积/10⁴ km²	比例/%	面积/10⁴ km²	比例/%
<−0.009	严重退化	0.053	0.51	0.051	0.50	0.039	0.38	0.050	0.49
−0.009～−0.003	中度退化	2.805	27.34	2.589	25.23	0.460	4.48	4.437	43.25
−0.003～0.003	基本不变	3.474	33.86	6.241	60.83	5.724	55.79	4.645	45.27
0.003～0.009	中度改善	3.249	31.67	1.336	13.02	4.016	39.14	1.098	10.70
>0.009	明显改善	0.679	6.62	0.043	0.42	0.021	0.21	0.030	0.29

2.2 NDVI对气候因子的响应

2.2.1 江苏省NDVI年际、季节变化对降水、气温的响应 由图1可以看出，2000—2013年，江苏省多年平均气温为15.72 ℃，气温的季节性差异表现为：夏季>秋季>春季，夏季气温最高，多年夏季平均气温为26.72 ℃。气温在年际、春季、秋季均呈下降趋势，下降速率分别为0.040，0.044，0.028 ℃/a，夏季呈上升趋势，上升速率为0.034 ℃/a。2000—2013年，江苏省多年平均降水量为1 015.3 mm，降水量的季节性差异表现为：夏季>春季>秋季，夏季降水量最为丰沛，多年夏季平均降水量为533.5 mm。降水量在年际，春季、夏季均呈下降趋势，下降速率分别为6.984，0.703，3.529 mm/a，其中，年际下降最为明显。秋季，降水量呈上升趋势，上升速率为1.913 mm/a。

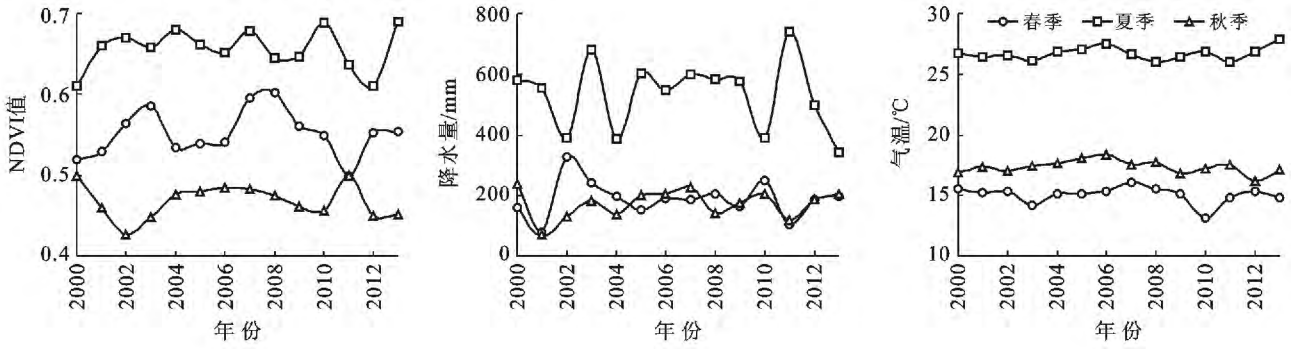


图1 江苏省2000－2013年NDVI值和气候因子年际、季节变化

2000—2013年江苏省年平均NDVI总体上呈轻微减少的趋势，递减率为0.000 8/a，其变化大致可分为3个阶段：2000—2007年交替上升期，2007—2009年，和2010—2012年的持续递减期。由图2可知，植被NDVI的异常在时间上与温度和降水量存在较明显的耦合关系。江苏省NDVI在季节上呈现出不同的变化趋势，春季，夏季呈上升趋势，夏季上升趋势明显，为0.002 1/a，秋季NDVI呈下降趋势，下降速率为0.001 6/a。采用均值法求取2000—2013年春季，夏季，秋季多年平均NDVI值。NDVI值在季节上表现出较大的差异。夏季NDVI值最高，为0.656 2，秋季NDVI最低，仅0.468 1。由此可见，NDVI的季节性

变化与降水量的关系更为一致,过多或过少的降水量会在一定程度上影响 NDVI 的高低,NDVI 与气温的关系在春季和秋季存在一定差别。这与唐海萍等[19]在季节变化上植被生长与降水量关系密切这一结论相符。

由图 1 可知,在年际和季节尺度上,NDVI 异常受极端气候条件的影响较大,与气温和降水量表现出明显的耦合关系。2002,2004,2006 和 2010 年由于受厄尔尼诺事件的影响,江苏省降水量低于往年平均水平,夏季气温急剧上升,出现大面积高温,过高的温度加快土壤水分的蒸发和植被的蒸腾作用,土壤湿度和空气湿度减小,植被的光合作用能力减弱,植被指数降低[20]。2003 年 7 月淮河流域和江苏北部出现暴雨和大暴雨,2003 年夏季降水量达 680.0 mm,淮河流域遭遇大洪水,损失大面积农作物[21]。2011 年为厄尔尼诺事件向拉尼娜事件转换年,2011 上半年受厄尔尼诺事件的影响春季降水量较少,温度升高,全省范围内出现近 50 a 来的历史高温和严重干旱,抑制植被生长,7 月受拉尼娜事件的影响,江苏省出现暴雨,2011 年夏季降水量为 739.9 mm,为近 14 a 夏季最高,致使大面积农作物遭受洪涝而减产,NDVI 降低[20]。

2.2.2　江苏省 NDVI 对降水、气温响应的时间相关性　采用均值法,求得多年各月平均 NDVI,气温,降水量值。从图 2 可知,3—5 月为植被的返青期,随着温度的升高,NDVI 呈现快速增长趋势,NDVI 与气温存在有较大相关性。而在这一时期,月降水量在 50 mm 左右,无明显变化。NDVI 年内变化较大,NDVI 值呈现出 2 个波峰,分别为 5 和 8 月,6 月出现一个波谷,这是由于江苏是重要的商品粮基地,地势以平原为主,种植大量的水稻和小麦,6 月正好是农作物换茬,水稻和小麦的收割使得 NDVI 出现短暂的减少。从图 2 可以看出,7 月以后降水量呈下降趋势,而 NDVI 下降趋势明显滞后于 1 个月降水量的下降,NDVI 而与气温变化趋势则更为一致,没有出现明显的滞后期。

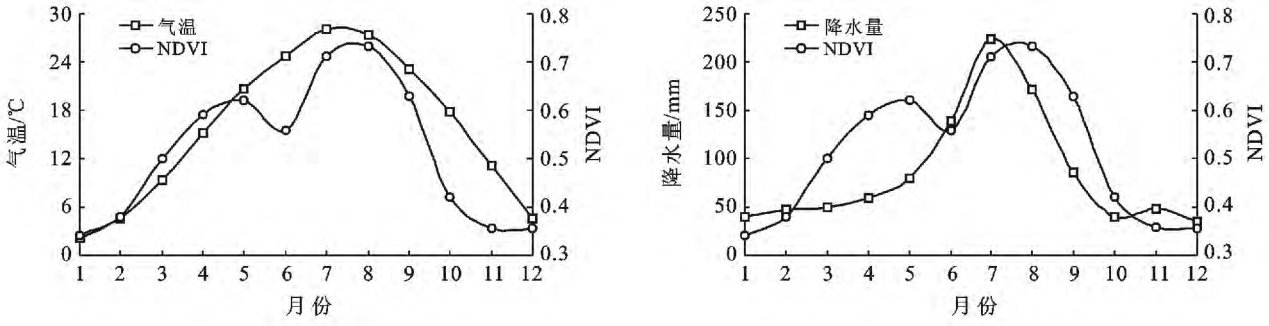


图 2　江苏省 NDVI 与气候因子年内变化

气候因子对植被的生长有着最直接的作用,为了更好地探讨气候因子在年际和季节尺度上对植被覆盖变化的影响,运用 SPSS 软件,选取降水量、温度 2 个气候因子,4 种时滞期与年际和季节 NDVI 进行了相关分析和偏相关分析。相关分析结果显示(表 2),从年际尺度来看,植被 NDVI 与同期气温的相关系数大于与同期降水量的相关系数,NDVI 与气温的相关系数为 0.845,通过了 $p<0.01$ 的显著性检验,NDVI 与降水量的最大相关系数为 0.658,通过了 $p<0.05$ 的显著性检验,表明在年际尺度上,温度与植被 NDVI 有更好的相关性。植被 NDVI 最大响应与当月气候的变化,而滞后一月最大响应与降水量的变化。

从季节尺度来看,植被 NDVI 与同期气温和降水量的相关系数均为正,植被 NDVI 与气温的相关系数在春季通过了 $p<0.05$ 的显著性检验,而在夏季和秋季通过了 $p<0.01$ 的显著性检验。植被 NDVI 在春季,秋季同步响应与当月气温的变化,秋季相关系数最大,为 0.897。夏季 NDVI 滞后 1 月最大响应于气温的变化,最大相关系数为 0.771,植被 NDVI 与气温的最大相关系数在春季,夏季和秋季均通过了 $p<0.01$ 的显著性检验。植被 NDVI 在春季,夏季和秋季均滞后 1 月最大响应于降水量的变化,秋季相关系数最大,为 0.732,通过了 $p<0.01$ 的显著性检验,而在春季和夏季通过了 $p<0.05$ 的显著性检验。为去除气温和降水量的相互影响,本文将植被 NDVI 与气温、降水量进行偏相关分析,偏相关分析结果显示(表 3),在年际和季节 NDVI 对气温变化的响应均大于对同期降水量的响应,植被 NDVI 在年际,春季和秋季最大响应于当月气温的变化,偏相关系数在年际和秋季均通过了 $p<0.01$ 的显著性检验,秋季相关系数最大为 0.886。夏季,最大相关系数为 0.668,植被 NDVI 滞后 1 月最大响应于气温的变化,偏相关系数在夏季通过了 $p<0.05$ 的显著性检验。植被 NDVI 与降水量的最大量相关系数在年际,春季和秋季均未通过 $p<0.05$ 的显著性检验,仅夏季植被 NDVI 与前一月降水量的偏相关系数在春季通过了 $p<0.05$ 的显

著性检验，相关系数为 0.636，这与陈云浩等[22]利用偏相关分析，得出在中国东部气温是植被变化的主要驱动因子结论相符，说明在江苏省生态系统中，热量条件对植被的生长起决定性作用。

表 2 江苏省 NDVI 与气候因子的相关关系

NDVI	气温				降水量			
	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月
年际	0.845**	0.610*	0.206	−0.232	0.658*	0.662*	0.301	−0.164
春季	0.586*	0.367	0.332	−0.342	0.525	0.650*	0.192	0.166
夏季	0.693**	0.771**	0.760**	0.498	0.292	0.584*	0.526	0.306
秋季	0.897**	0.884**	0.722**	−0.219	0.489	0.732**	0.600*	−0.308

注：** 表示 0.01 水平的显著性；* 表示 0.05 水平的显著性。下同。

表 3 江苏省 NDVI 与气候因子的偏相关关系

NDVI	气温				降水量			
	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月
年际	0.728**	0.312	0.012	−0.167	0.259	0.438	0.225	−0.016
春季	0.535	0.328	0.313	−0.359	0.461	0.636*	0.155	0.201
夏季	0.642*	0.668*	0.602*	0.440	0.215	0.270	0.229	0.200
秋季	0.886**	0.767**	0.603*	−0.186	0.353	0.403	0.387	−0.268

植被 NDVI 与气温的偏相关系数在夏季和秋季明显高于春季。这与江苏省种植作物生长规律有关，春季为返青期和生长季，温度的回升有利于植被进行光合作用，增加植被指数，但江苏省种植大量的冬小麦，5 月为冬小麦成熟的季节，植被 NDVI 并不能随温度的升高而增加。夏季植被 NDVI 与气温的最大相关系数低于秋季，一方面是由于江苏省种植有大量的水稻和小麦，6 月为作物收割换茬的时期，这一时期植被 NDVI 明显下降，温度的升高不能对植被 NDVI的影响不大，另一方面是夏季温度较高，较高的温度反而会加快水分的蒸发速度，使得植被的蒸腾作用加快，土壤相对湿度下降，土壤含蓄水分的能力降低，在一定程度上会抑制作物的生长。植被 NDVI 与降水量的偏相关系数春秋季较高，夏季最低。夏季植被 NDVI 与降水量的响应较弱，一方面是由于植被生长进入稳定期，植被受降水的影响较小，另一方面是由于江苏省东部沿海，南部有长江和太湖，苏北有灌溉总渠，灌溉沟渠纵横，水网密布，加之夏季降水量充足，灌溉和降水能够满足植被生长的需要，降水对植被生长状况影响就会减弱。通过对年际、春季、夏季和秋季 NDVI 与气候因子变化响应 4 种时滞期的对比分析。在年际尺度上，植被 NDVI 同步响应与当月气温的变化，从当月至前 3 月相关系数呈递减趋势，在前 3 月出现负相关。从年内季节尺度来看，春季，秋季植被 NDVI 同步响应与当月的气温变化，夏季植被 NDVI 滞后 1 月响应于气温的变化，这与崔林丽等[23]的研究结果一致，江苏省种植大量的冬小麦，5—6 月为冬小麦成熟的季节，植被 NDVI 下降，而从 NDVI 下降到新种植的农田作物恢复到较高 NDVI 水平需要较长时间，因而在夏季植被 NDVI 对气温增加滞后期较长。春季，夏季，秋季植被 NDVI 均滞后 1 月响应于降水量的变化，从当月至前 3 月相关系数有先增大后减少的趋势，秋季植被 NDVI 与降水量的相关系数在前 3 月出现负值。植被 NDVI 对气温的响应主要是由于适宜的温度能够促进植被进行光合作用，产生叶绿体和叶绿素，从而增加植被指数，故能在较短的时间内影响植被指数。夏季温度过高，植被的生长也已进入稳定期，温度的升高对植被指数的增加无明显效果。降水的滞后响应是由于植被生长所需的水分直接来自于土壤，土壤的水分含量多少直接影响植被生长发育，而土壤水分的获得主要通过大气的降水量，降水可以增加土壤湿度，植被通过根茎吸收土壤水分运输到叶部进行光合作用，增加了叶绿素从而反映到植被指数上。

3 结 论

（1）江苏省 2000—2013 年植被覆盖分布状况在年际和季节尺度上呈现出明显的时空差异。春季 NDVI 呈现出由东南往西北梯度递增的趋势；夏季平均 NDVI 在该省范围都较高；秋季平均 NDVI 较春季和夏季有明显的下降，江苏省西南部为丘陵，分布有大量的森林，故秋季西南部 NDVI 较高，在 0.6 左右。

（2）2000—2013 年江苏省植被覆盖长期变化趋势在年际和季节尺度上呈现出明显的空间差异。植

被 NDVI 在年际和秋季呈下降趋势,但秋季下降趋势更为明显,下降面积占总面积的 43.74%。夏季呈上升趋势,且上升趋势明显。年际、春季和秋季植被覆盖中度退化的面积分别为 2.810×10^4,2.589×10^4,4.437×10^4 km^2,退化区域主要集中在江苏省东南部的长江中下游平原、江苏省东部沿海及以北区域和苏北地区。夏季植被改善面积为 4.037×10^4 km^2,占总面积的 39.35%,改善区域主要集中在江苏省西南部的丘陵区和腹地的里下河平原区。春季植被覆盖最为稳定,基本不变区域占 60.83%,其次依次为夏季、秋季、年际。

(3) 江苏省 2000—2013 年植被覆盖状况在年际和季节尺度上呈现出明显的时间差异。江苏省 14 a 来植被覆盖状况呈下降趋势。由于受气候因子,厄尔尼诺和拉尼娜等事件的影响,NDVI 在年际和季节呈波动性变化。

(4) 植被 NDVI 与气温和降水量的最大相关系数在年际和季节尺度上均为正,且气温的相关性强于与降水量的相关性。植被 NDVI 与气温的最大相关系数为:秋季>夏季>春季,与降水量的相关系数为:秋季>春季>夏季。植被 NDVI 基本同步响应与当月气温的变化,仅夏季滞后期为 1 个月;植被 NDVI 在年际和季节均滞后 1 月最大响应于降水量的变化。

[参 考 文 献]

[1] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, et al. Relationship between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 52-68.

[2] Roerink G J, Menenti M, Soepboer W, et al. Assessment of climate impact on vegatation dynamics by using remote sensing[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(1): 103-109.

[3] 周峰,许有鹏,吕慧华. 基于 MODIS-EVI 数据的长江三角洲地区植被变化的特征[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(11):1363-1369.

[4] 徐浩杰,杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. 自然资源学报,2014,29(3):398-409.

[5] 侯西勇,应兰兰,高猛,等. 1998—2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J]. 地理科学,2010,30(5):735-741.

[6] 江东,王乃斌,杨小唤,等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. 生态学报,2002,22(2):247-252.

[7] 丹利,季劲钧,马柱国. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应[J]. 生态学报,2007,27(9):3582-3592.

[8] 陈卓奇,邵全琴,刘纪远,等. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(3):402-410.

[9] 徐勇,奚砚涛,许伟,等. 归一化植被指数对江苏省气温、降水变化的时空响应特征[J]. 湖北农业科学,2015,54(3):599-604.

[10] 杨尚武,张勃. 基于 SPOTNDVI 的甘肃河东植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学杂志,2014,33(2):455-461.

[11] Piao, Shilong, Mohammat A, Fang Jingyun, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate change in China [J]. Global Environmental Change, 2006,16(4):340-348.

[12] 张禹舜,武正丽,贾文雄. 近 10 a 来祁连山植被覆盖变化研究[J]. 干旱区研究,2014,31(1):80-87.

[13] 渠翠平,关德新,王安志,等. 科尔沁草甸草地归一化植被指数与气象因子的关系[J]. 应用生态学报,2009,20(1):58-64.

[14] 吴丽丽,任志远,张翀. 陕北地区植被指数对水热条件变化的响应及其时滞分析[J]. 中国农业气象,2014(01):103-108.

[15] 朴世龙,方精. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究,2001,21(4):294-302.

[16] 顾芗,周生路,张红富. 江苏沿海耕地压力分区分析[J]. 中国农业资源与区划,2009,30(5):32-38.

[17] 王宗明,国志兴,宋开山,等. 中国东北地区植被 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2009,28(6):1041-1048.

[18] 张戈丽,徐兴良,周才平,等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报,2011,66(1):47-58.

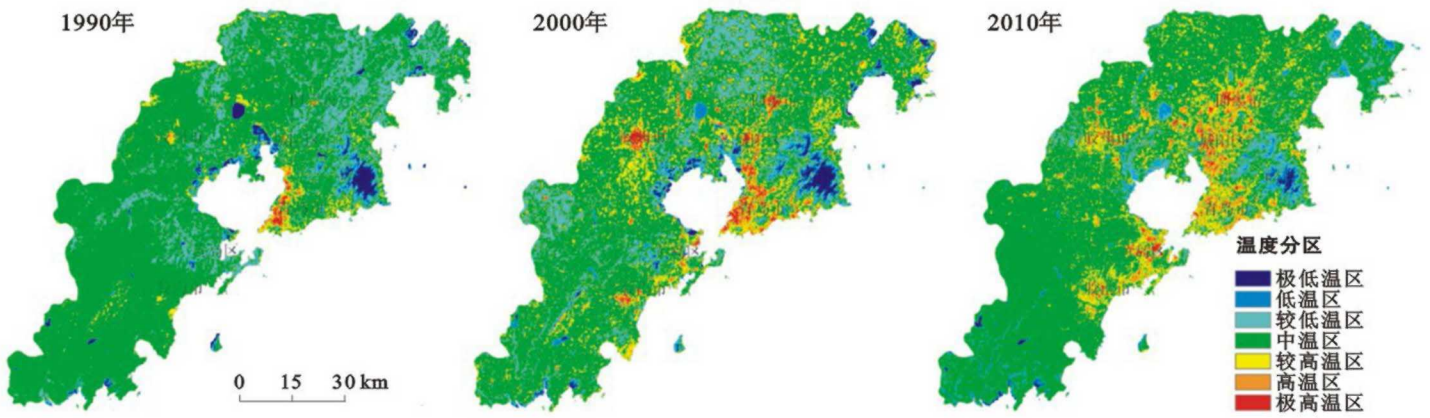
[19] 唐海萍,陈玉福. 中国东北样带 NDVI 的季节变化及其与气候因子的关系[J]. 第四纪研究,2003,23(3):318-325.

[20] 张冲,赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对长江流域气候的影响研究[J]. 水土保持通报,2011,31(3):1-6.

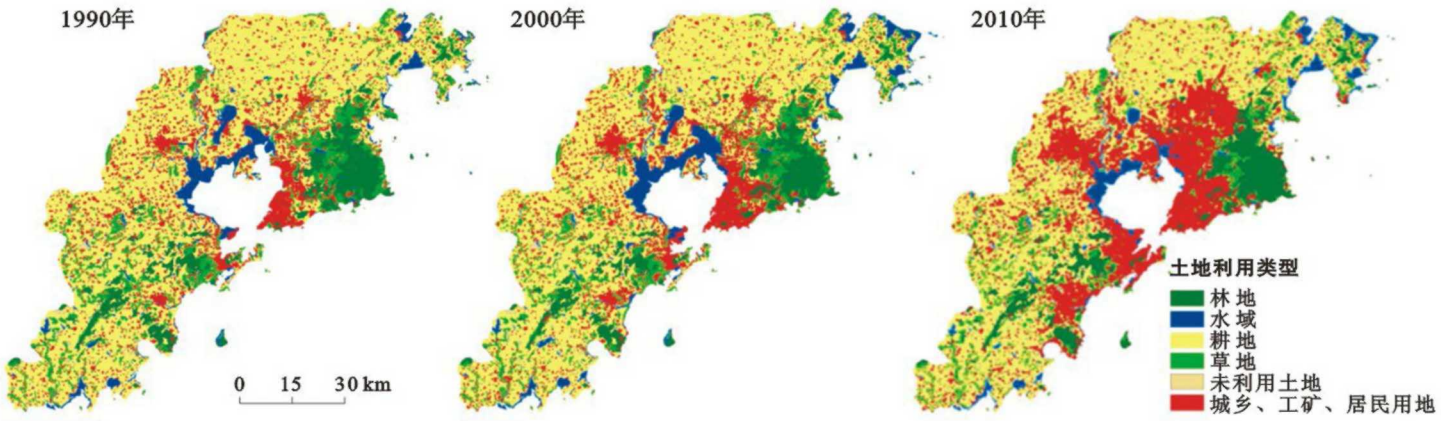
[21] 陈洪滨,刁丽军. 2003 年的极端天气和气候事件及其他相关事件[J]. 气候与环境研究,2004,9(1):218-223.

[22] 陈云浩,李晓兵,史培军. 1983—1992 年中国陆地NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报,2001,25(6):716-720.

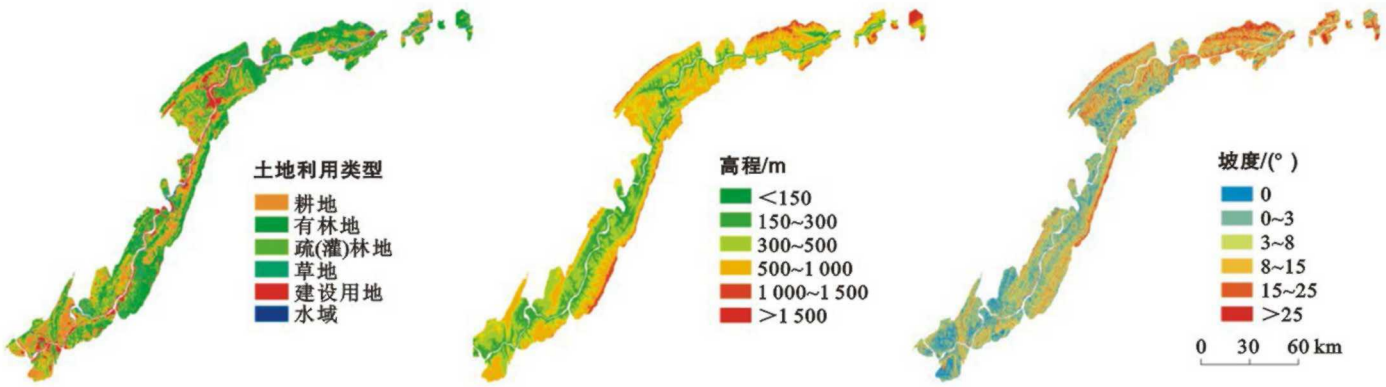
[23] 崔林丽,史军. 中国华东及其周边地区 NDVI 对气温和降水的季节响应[J]. 资源科学,2012,34(1):81-90.



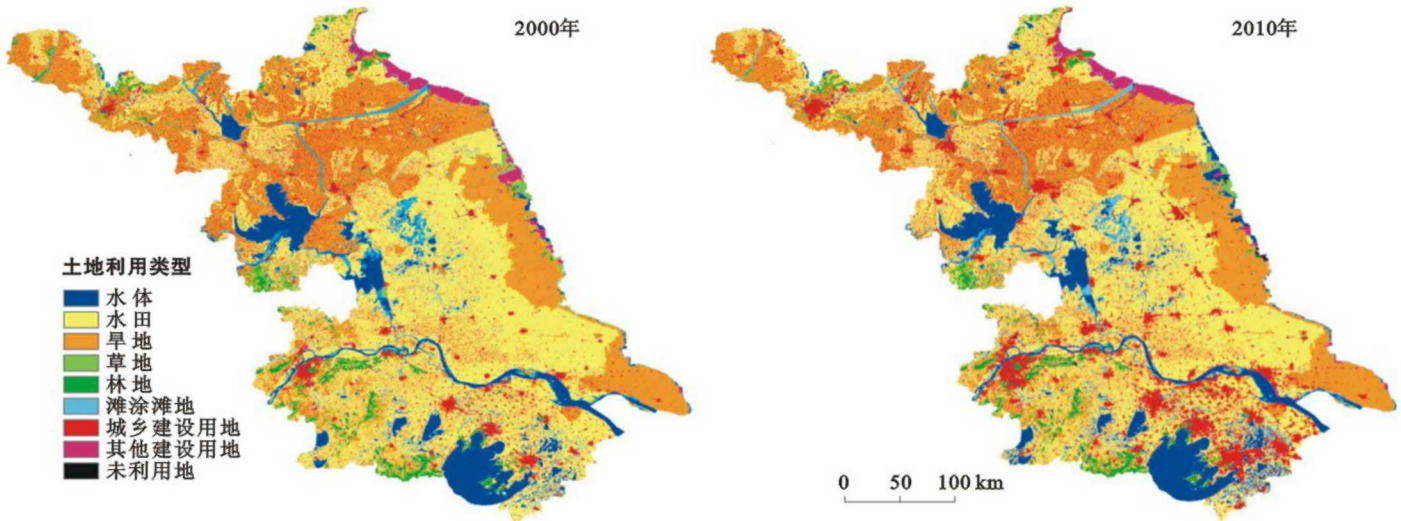
附图1　青岛市1990—2010年地表温度分布



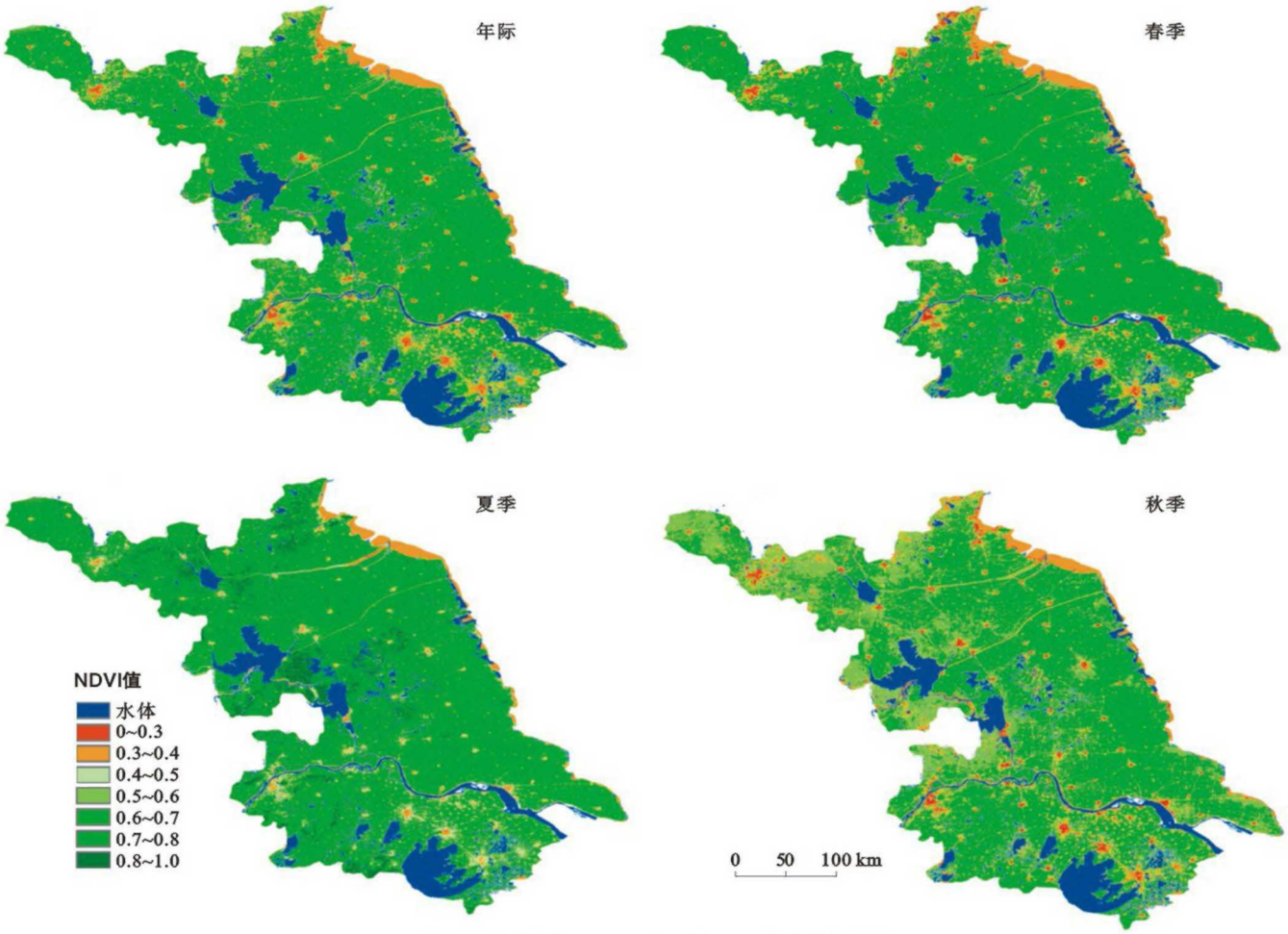
附图2　青岛市1990—2010年土地利用类型



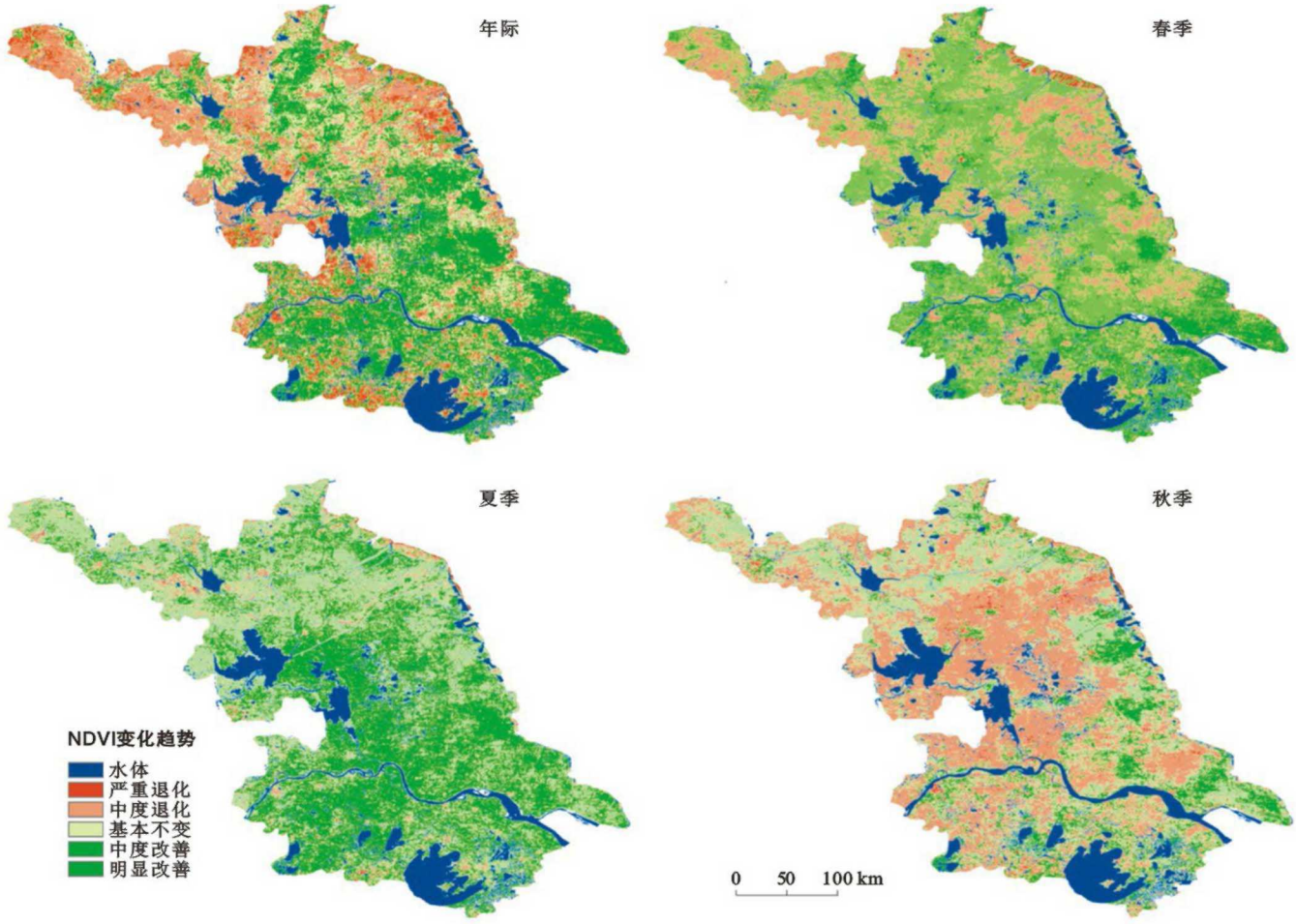
附图3　三峡库区生态屏障带生态风险土地利用类型、高程和坡度



附图4　江苏省2000和2010年1:10万土地利用类型图



附图5　江苏省2000—2013年NDVI均值空间分布



附图6　江苏省2000—2013年NDVI变化趋势空间分布