

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

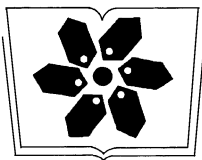
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201107141042

何月,樊高峰,张小伟,柳苗,高大伟.浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应.生态学报,2012,32(14):4352-4362.

He Y, Fan G F, Zhang X W, Liu M, Gao D W. Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4352-4362.

浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应

何 月*, 樊高峰, 张小伟, 柳 苗, 高大伟

(浙江省气候中心, 杭州 310017)

摘要:利用 GIMMS 和 MODIS 两种归一化植被指数(NDVI)资料反演了 1982—2010 年浙江植被覆盖状况,结合同期研究区 63 个气象站点的气温、降水和湿润指数等气候指标,分析了该地区植被年际变化、月际变化及其对气候要素的响应特征。结果表明:(1)研究期间,浙江气候总体呈暖干化趋势,植被覆盖缓慢下降,主要是由于森林植被遭破坏,农业生产活动受抑制影响所致,其中 NDVI 显著减少的地区约占全省陆域面积的 29.1%,主要发生在 6—11 月;(2)降水量及干湿程度对浙江植被 NDVI 年变化起着决定性作用。植被与气候要素年变化相关分析发现,NDVI 与湿润指数关系较降水、气温更为密切,两者相关及偏相关系数均通过 0.05 水平的置信度检验,这表明在年际尺度上,湿度的增加增大了植被的生长势,有利于植被生长;(3)植被与气候要素月变化分析表明冬季的热量供给是影响浙江植被生长的重要因子,而植被变化对夏季降水和干湿程度的最大响应为滞后两个月;(4)农业生产水平的提高使得农作物种植区 NDVI 有所增加,人类活动对浙江植被覆盖的影响不可忽视。

关键词:植被;NDVI;气候变化;湿润指数

Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province

HE Yue*, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, LIU Miao, GAO Dawei

Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China

Abstract: Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) which was derived from MODIS and GIMMS to characterize the vegetation cover in Zhejiang Province, this study has investigated the responses of vegetation cover variation to climate change at yearly and monthly time scales, by integrating NDVI with climate factors (temperature, precipitation and humid index) of sixty-three meteorological sites. The results indicated the following viewpoint. In the past 30 years, the climate of Zhejiang Province presented a process of distinct warming and drying. The vegetation cover had a slowly decreasing trend which mainly results from damaging forest and restraining agriculture activity. The area with NDVI significant decreasing occupied 29.1% of the total land area of Zhejiang. Vegetation cover reducing mainly happened in June to November. Precipitation and dry-wet condition had a crucial effect on NDVI inter-annual variation. The relationship of NDVI and humidity is stronger than that of NDVI with precipitation and temperature, whereas, its coefficient and partial coefficient all passed the confidence test of 0.05 levels. The close relativity between NDVI and humidity indicated that humid increasing could promote vegetation growing. At monthly scale, the response of vegetation variation to climatic factors suggested that temperature is a key factor for impacting vegetation growth in winter, and vegetation variation lag nearly two months responding to precipitation and dry-wet condition in summer. This study also highlighted that human activities influencing on vegetation cover variation should not be ignored because the NDVI value of the crop planting area was

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF2011-20);浙江省气象局创新团队项目(2010TD05)

收稿日期:2011-07-14; **修订日期:**2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heyue0925@163.com

increasing with agricultural production level promoting in Zhejiang Province.

Key Words: vegetation; NDVI; climate change; humid index

当前全球气候正经历以变暖为主要特征的显著变化,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告指出,最近 100a(1906—2005 年)全球平均地表气温升高了 0.74°C ^[1]。植被是陆地生态系统的初级生产者,是联结土壤和大气的自然纽带,对气候有重要的调节作用,在全球变化研究中充当“指示器”的作用^[2-3]。气候变化是植被活动的重要影响因素,温度、降水等作为植物生长发育的必要环境因子,对植被的生长和物候等具有重要影响^[4],气候变化必然影响植物的生长环境,进而影响植物的生长状态^[5],研究植被变化及其与气候因子的关系可为应对全球气候变化提供重要的理论依据,研究植被对气候变化的响应已成为当前全球变化研究的主要内容之一^[6]。

相关研究表明,气候变暖导致全球局部地区植被覆被发生显著变化。北半球中高纬度地区植被活动显著增强^[7-8]。有关植被与气候变化的研究已在全球和区域尺度广泛展开,如李晓兵等^[9]探讨了 1983—1992 年中国主要植被类型 NDVI 的动态变化,并与同期气温、降水变化的关系进行了分析;陈云浩等^[10]分析了中国陆地 NDVI 变化的驱动因子,将中国划分为 14 个三级区;国志兴等^[11]和罗玲等^[12]研究了东北地区不同植被类型 NDVI 与气候因子的相关性,表明温度是影响东北森林植被 NDVI 最主要的气候因子,同一植被受气温影响的程度强于降水;郭锐等^[13]研究发现 1982—2003 年间西北地区 NDVI 与气温和降水均有较好的相关性;张永恒等^[14]和张远东等^[4]对西南地区的研究发现,11—2 月份的植被对超前其 1—2 个月的气温以及夏季的植被对春季气温的敏感性比较大,针叶林、阔叶林、高山植被 NDVI 与年均气温的相关性最大,草丛 NDVI 与年降水量的相关性最大。

由于尺度、对象和方法的差异性,研究结果地区差异较显著,所得研究结论对浙江省指导意义并不大。浙江位于中、低纬度的沿海过渡地带,地形起伏较大,目前对于该地区植被覆盖及其与气候因子的关系研究并不多^[15-16],本文试图用 GIMMS 和 MODIS NDVI 两种归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),反演浙江省 2001—2010 年的植被覆盖状况,结合同期 63 个气象站点的气温、降水和湿润指数等指标,分别从年际变化和月变化角度分析植被变化对气候变化的响应特征,以便更好地理解气候要素变化对植被生长不同阶段的影响机制。

1 研究区概况

浙江省位于 $118^{\circ}01' \text{E}$ — $123^{\circ}08' \text{E}$, $27^{\circ}01' \text{N}$ — $31^{\circ}10' \text{N}$,地处东南沿海、长江三角洲南翼,陆域面积 $10.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,年平均气温 $15.6 \text{—} 18.3^{\circ}\text{C}$,年平均累积辐射量 $4147.4 \text{—} 4670.1 \text{ MJ/m}^2$,无霜期 241—351d;年平均降水量 1092—2029mm,降水季节分布不均,夏季最多,冬季最少^[17]。浙江属于亚热带湿润季风气候,生态系统丰富,气候资源多样,但自然资源相对短缺,人口相对稠密,地势起伏较大,随着经济的迅速发展,生态环境承载压力越来越大,气候适宜的浙江甚至成为全球变化研究的新的敏感区域。全省林地面积约 $5.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,森林覆盖率达 59.4%。根据 1:4000000 矢量化中国植被类型图^①,提取浙江植被类型分布状况(图 1)。

2 数据及预处理

2.1 NDVI 数据及处理

2.1.1 NDVI 数据

GIMMS NDVI 数据集采用美国马里兰大学 GLCF(Global Land Cover Facility)研究组制作的 1982—2006 年 NDVI 半月最大合成数据集,空间分辨率 8km,该数据集误差小、精度较高,是目前最长时间序列的 NDVI 数据,已广泛应用于全球及区域尺度植被变化的研究中^[18-19]。

① 数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc. westgis. ac. cn)

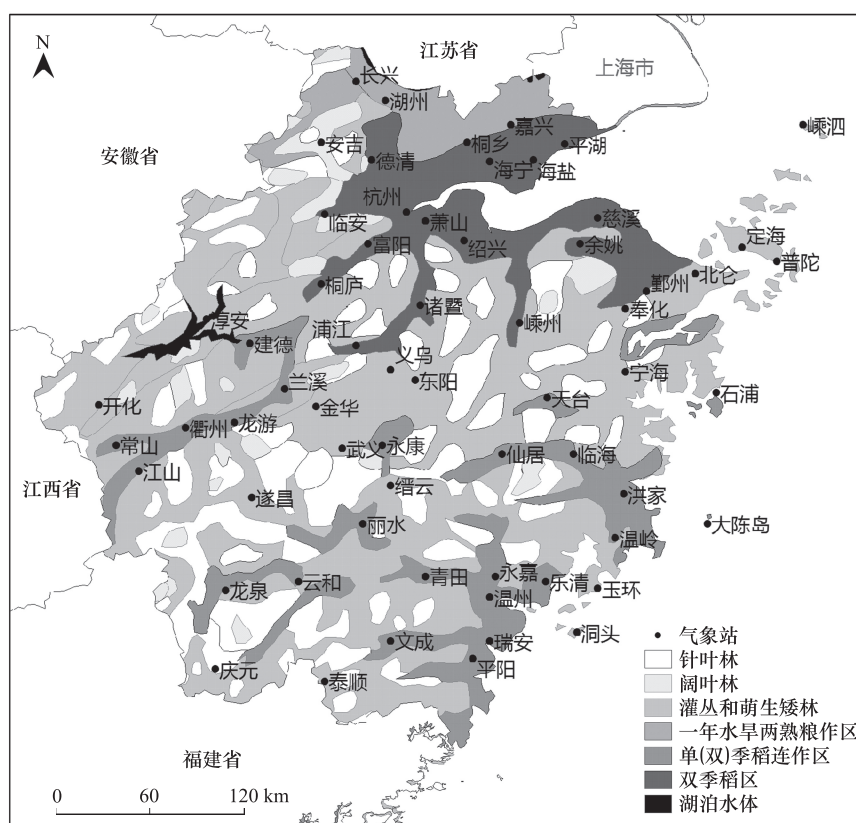


图1 研究区植被类型分布及气象台站位置

Fig. 1 Vegetation types and meteorological stations of study area

MODIS NDVI 数据采用 NASA 提供的 MOD13Q1 级植被指数产品,时间范围为 2001—2010 年,空间分辨率 250m,时间分辨率为 16d。使用 MRT(MODIS Reprojection Tools) 软件将下载的数据批处理进行格式和投影转换,同时完成图像的拼接和裁切。

采用国际通用的最大合成法 MVC 获取月最大和年最大 NDVI。

2.1.2 NDVI 时间序列曲线重构

两类数据集虽都经过严格的噪音剔除,但仍可能存在由云、气溶胶和双向反射效应引起的 NDVI 负向偏移^[20],本文利用改进的 Savitzky-Golay 滤波分别对两类数据集进行平滑降噪^[21-23]。处理时,先按时间先后将时序数据叠合成一个多波段影像文件;然后,内插数据,研究中认为 32d 内 NDVI 大于 0.8 的变化是误差点,这样的增长在自然界是不可能的,用其前后两个时相的平均值代替;最后用 Savitzky-Golay 滤波拟合 NDVI 长期变化趋势,最终得到趋于“真值”的时序曲线。

2.1.3 NDVI 数据的插补

由于两种数据采用不同的传感器,其波段范围存在差异,为使序列具有更好的延续性,需对两种数据进行一致性检验^[24]。首先将 MODIS NDVI 的 250m 高分辨率数据重采样至 8km,并统一投影格式为 Albers 等面积投影,使两者空间上相匹配。两类数据集有 2001—2006 共 6a 的重叠数据,两者各地区年 NDVI 最大合成值相关系数达 0.9565,通过 0.001 的置信度检验,建立线性回归方程 $NDVI_{GIMMS} = 2.3821 \times NDVI_{MODIS} - 1.2621$ ($r=0.9565, n=66, P<0.001$),对 2007—2010 年的 GIMMS NDVI 数据进行插补(表 1),以延长序列的时间长度。

采用同样的方法对 GIMMS 和 MODIS NDVI 逐月数据进行一致性检验发现,两者各月 NDVI 最大合成值相关系数均达 0.85 以上,均通过 0.001 的置信度检验,说明两类数据在月尺度上具有显著的一致性。因此,

对于 2007—2010 年逐月 GIMMS NDVI 数据利用表 2 中回归方程进行数据插补。

表 1 浙江省 2001—2010 年 NDVI 变化
Table 1 Variations of annual NDVI in Zhejiang Province during 1982—2010

NDVI	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
GIMMS	0.606	0.617	0.616	0.576	0.570	0.598	0.596 *	0.608 *	0.593 *	0.601 *
MODIS	0.797	0.789	0.776	0.774	0.778	0.774	0.780	0.785	0.779	0.782

* 标注的数据是基于 MODIS NDVI 数据,利用回归方程对 GIMMS 数据的插补值

表 2 GIMMS 和 MODIS NDVI 逐月线性回归
Table 2 Monthly linear regression of GIMMS and MODIS NDVI

月 Month	回归方程	相关系数
1	$NDVI_{GIMMS} = 1.5274 \times NDVI_{MODIS} - 0.4348$	0.9213
2	$NDVI_{GIMMS} = 1.5288 \times NDVI_{MODIS} - 0.4429$	0.8935
3	$NDVI_{GIMMS} = 1.6792 \times NDVI_{MODIS} - 0.5636$	0.9213
4	$NDVI_{GIMMS} = 1.9016 \times NDVI_{MODIS} - 0.7812$	0.9364
5	$NDVI_{GIMMS} = 2.1318 \times NDVI_{MODIS} - 0.9939$	0.9402
6	$NDVI_{GIMMS} = 2.3384 \times NDVI_{MODIS} - 1.1937$	0.9563
7	$NDVI_{GIMMS} = 2.4295 \times NDVI_{MODIS} - 1.2840$	0.9571
8	$NDVI_{GIMMS} = 2.2907 \times NDVI_{MODIS} - 1.1944$	0.9539
9	$NDVI_{GIMMS} = 2.2734 \times NDVI_{MODIS} - 1.1374$	0.9423
10	$NDVI_{GIMMS} = 2.1399 \times NDVI_{MODIS} - 1.0039$	0.9492
11	$NDVI_{GIMMS} = 1.8318 \times NDVI_{MODIS} - 0.6947$	0.9286
12	$NDVI_{GIMMS} = 1.6337 \times NDVI_{MODIS} - 0.5155$	0.9269

2.2 气象数据

同期气象数据来自浙江省气象局,选取浙江省内 63 个气象站 1982—2010 年逐日气温、降水、气压、风速和相对湿度等要素,气象站点分布见图 1,将各站点日资料合成,建立月均值的气候要素时间序列,再对 63 个站点月数据求平均,作为整个研究区的气候月均值。

3 研究方法

3.1 湿润指数

湿润指数能较客观地反映某一地区的水热平衡状况,因此将其作为新的气候要素参与后期分析,其计算方法为^[25]:

$$K = R/ET \tag{1}$$

式中, R 为降水量(mm), ET 为潜在蒸散量(mm)。

月潜在蒸散量采用下式计算:

$$E_{Ti} = \frac{22d_i(1.6 + U_i^{1/2})W_{oi}(1 - h_i)}{P_i^{1/2}(273.2 + t_i)1/4} \tag{2}$$

式中, i 是月份的编号, P_i 是月平均气压(mb), t_i 是平均气温(℃), d_i 是月的天数, U_i 是在 10—12m 高度处观测的月平均风速(m/s), W_{oi} 是在温度为 t_i 时的饱和水汽压(mmHg),而 h_i 是月平均相对湿度。

3.2 气候要素和植被变化趋势分析

采用最小二乘法拟合 NDVI 和气候要素(气温、降水和湿润指数)随时间的变化速率,即 NDVI 和气候要素 y 随时间 t 变化的线性回归系数,可采用一元一次方程表示,并对相关系数进行显著性检验。

3.3 植被变化对气候变化的响应分析

3.3.1 相关系数的计算与检验

研究两要素间相关程度通常用相关系数来测定,相关系数计算公式为^[26]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (x_{ij} - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中, r_{xy} 为要素 x 与 y 之间的相关系数; x_{ij} 、 y_{ij} 分别为第 i 年第 j 月 NDVI 值和气象要素(月均温、降水、湿润指数); $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为 NDVI 多年月平均值和多年月均温、降水量或湿润指数。

一般情况下,相关系数的检验,是在给定的置信水平下,通过查相关系数检验的临界值表来完成的。

3.3.2 偏相关系数的计算与检验

地理系统是一种多要素的复杂巨系统,其中一个要素的变化必然影响到其它各要素的变化,偏相关分析可以解决这个问题。偏相关系数的计算公式为^[26]:

$$r_{xy.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中, r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为要素 x 与 y 、要素 x 与 z 、要素 y 与 z 之间的相关系数; $r_{xy.z}$ 为将要素 z 固定后要素 x 与 y 篇相关系数。

偏相关系数的显著性检验,采用常用的 t 检验法。

3.3.3 复相关系数的计算与检验

复相关分析法研究几个要素同时与某一要素之间的相关关系。几个要素与某一要素之间的复相关程度,可用复相关系数来测定^[26]。

复相关系数的显著性检验,一般采用 F 检验法。

使用统计分析软件 SPSS 采用 Pearson 相关系数和偏相关系数对 NDVI 与各气象因子进行相关分析。

4 结果与分析

4.1 植被年变化与气候要素变化的关系

4.1.1 植被的年际变化

由 NDVI 年变化曲线(图 3)可以看出,1982—2010 年间浙江植被 NDVI 整体呈缓慢下降趋势,植被覆盖有所减少,这与相关研究结论一致^[27-28],NDVI 在 0.570—0.648 之间波动,减少速率为 0.012/10a,植被生长大致经历了 3 个阶段:①1982—1990 年植被覆盖在波动中缓慢减少,其中 1983 年出现了 NDVI 的最大值 0.648;②1991—2002 年植被覆盖处于相对稳定期;③2003—2010 年植被覆盖在较低水平变化,其中 2003—2004 年出现了突变性的减少,2005 年 NDVI 降为最小值 0.570,随后几年植被覆盖虽有所增加但仍处于较低水平。即浙江植被覆盖在 20 世纪 80 年代减少,90 年代变化平缓,2003 年以来处于较低水平。

利用变化斜率法分析以年为时间尺度的植被长期变化趋势,计算的斜率为负值区,表示其植被覆盖呈减少趋势,相反斜率为正值区,植被覆盖呈增加趋势。趋势显著性检验采用 F 检验。根据各像元 NDVI 变化趋势和显著性水平,将变化趋势分为 4 类:增加显著($P \leq 0.05$),增加不显著($P > 0.05$),减少显著($P \leq 0.05$),减少不显著($P > 0.05$)。图 2 为用相关置信度水平表达的植被覆盖年际变化趋势的空间分布,可以看出研究区内植被覆盖变化趋势空间差异明显,其中显著减少的面积约占全省陆域面积的 29.1%,主要分布于浙江南部的温州、丽水地区以及北部的杭州、湖州等地,位于典型的常绿阔叶林植被类型区,近年来该地区城市化、工业化加速过程中森林植被遭破坏、农业生产活动受抑制是导致 NDVI 降低的主要原因;植被覆盖变化不显著的区域(增加不显著和减少不显著)所占比重较大,占总面积的 69.6%;植被覆盖显著增加的区域不到全省陆域面积的 1.5%,零星分布于金衢盆地、湖州、嘉兴及沿海,这些地区多为作物的集中耕种地。

4.1.2 气候要素的年际变化

由年均气温、降水、湿润指数变化(图 3)可知,研究期间浙江省年平均气温逐渐升高,且上升趋势极显著($r=0.816, P \leq 0.01$),每 10a 达 0.565℃;降水总体呈波动性下降趋势,其变化不明显;湿润指数年际变化呈极

显著的减少趋势($r=-0.565, P\leq 0.01$)。整体来看,浙江气候暖干化趋势明显,这与浙江气候变化的研究结论基本一致^[16,29]。

4.1.3 植被对气候要素年变化的响应特征

由植被 NDVI 的年际变化曲线(图 3)发现,1983 年 NDVI 出现了最大值 0.648,而 2003—2004 年 NDVI 出现了突变性的减少,这些显著变化与气候要素的变化密不可分,1983 年降水量和湿润指数均出现了较高值,而 2003—2004 年间降水量和湿润指数则出现了大幅度的下降。可见,降水量及干湿程度对植被 NDVI 年变化起着决定性作用。

为了进一步定量分析植被对气候要素年变化的响应特征,对 1982—2010 年 NDVI 与各气象要素做了相关、偏相关及复相关分析(表 3),结果表明,NDVI 与气温、降水和湿润指数三要素的复相关水平通过 0.05 水平的显著性检验,表明植被生长受温度、降水、干湿程度等多个因子的共同影响^[4]。NDVI 与湿润指数呈显著正相关,相关系数和偏相关系数均通过 0.05 水平的显著性检验,在不考虑气温和湿润指数的影响下,NDVI 与降水呈显著正相关($P\leq 0.05$),NDVI 与气温的相关和偏相关系数均未达显著水平($P>0.05$)。这进一步表明了年际尺度上,降水量及干湿程度对植被 NDVI 起着决定性作用。湿度的增加增大了植被的生长势,使植被生长迅速。

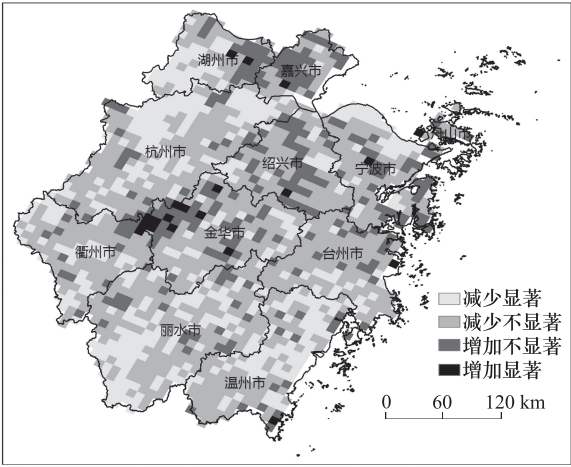


图 2 1982—2010 年浙江省 NDVI 年际变化趋势
Fig. 2 Annual change trend of NDVI in Zhejiang Province from 1982—2010

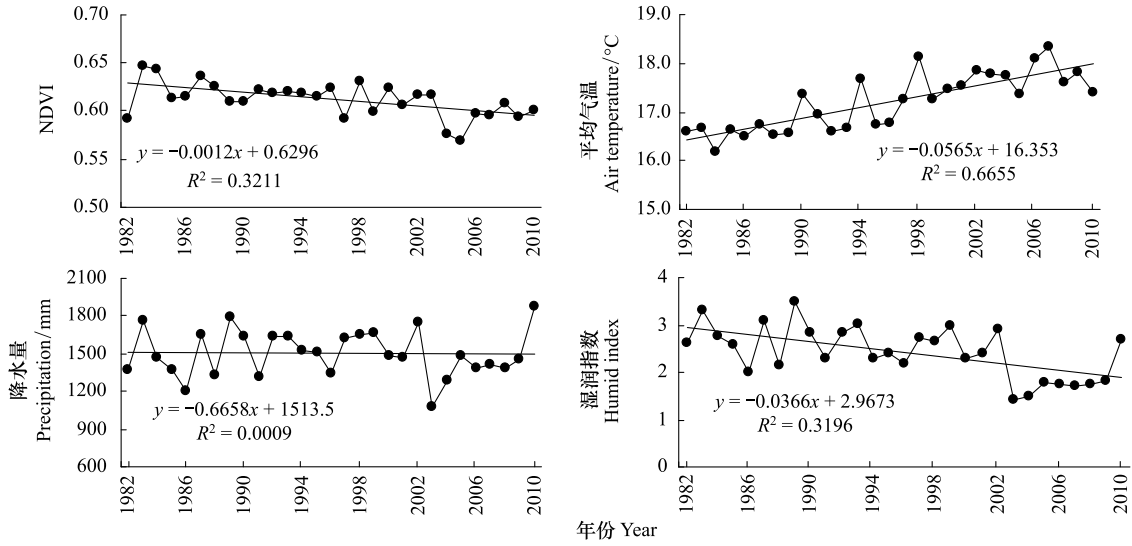


图 3 1982—2010 年浙江省植被 NDVI、年均气温、年降水量和湿润指数的变化

Fig. 3 Change of NDVI, annual average temperature, annual precipitation, and Humid index of Zhejiang Province from 1982 to 2010

表 3 浙江省 NDVI 与气候要素的相关系数(1982—2010)

Table 3 Correlation coefficients between NDVI and climatic elements in Zhejiang Province

NDVI-T		NDVI-P		NDVI-K		NDVI-T、K、P
R_{NDVI-T}	$R_{NDVI-T/P,K}$	$R_{NDVI/P}$	$R_{NDVI-P/T,K}$	R_{NDVI-K}	$R_{NDVI-K/T,P}$	
-0.238	0.028	0.160	0.328 *	0.471 **	0.426 *	0.595 *

T 代表气温;P 代表降水;K 代表湿润指数; * $P\leq 0.05$, ** $P\leq 0.01$; R_{NDVI-T} 和 $R_{NDVI-T/P,K}$ 分别表示 NDVI 与气温的相关系数和偏相关系数;以此类推

4.2 植被月变化与气候要素变化的关系

气象要素的变化时间差异显著,仅通过植被与气候要素在年际尺度上的关系,不足以充分说明该地区植被与气候要素之间的影响关系,以下从月变化作进一步分析。

4.2.1 植被的月变化特征

图4为浙江植被NDVI月变化,可以看出,植被在3—8月NDVI值逐渐增加,主要是因为3月份开始油菜、大小麦等冬种作物处于生长阶段,山区的林地树木也开始抽枝发芽,至8月份,各类植被均处于生长旺盛阶段,NDVI达到一年中的最高值;9月份开始农作物逐渐停止生长,大部分植被落叶,使得植被覆盖减少,NDVI下降,至次年2月降到全年最低值。相关研究表明,全球变暖是造成植被生长在春季提前和秋季推迟的主要原因^[30],由植被NDVI月变化率(图5)可见:12、1、2月和5月浙江植被NDVI呈增加趋势,其余各月NDVI均表现为减少,其中6—11月连续5个月NDVI减少,说明浙江NDVI的减少主要发生在6—11月份。整体看来,冬季植被NDVI变化为正,主要是由于冬季农业生产活动增加所致,5月NDVI的增长可能与植被生长季提前有关^[31-32]。

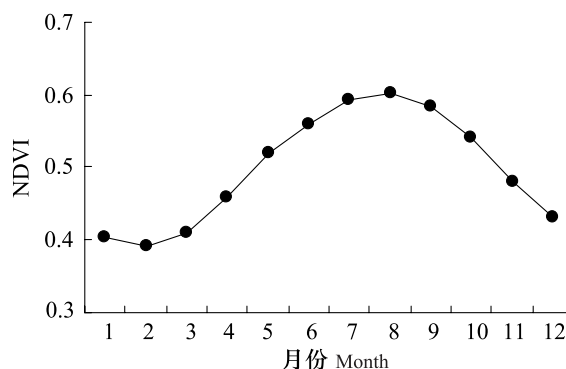


图4 浙江省NDVI月变化曲线

Fig. 4 Monthly variation of NDVI in Zhejiang Province

4.2.2 气候要素的月变化

逐月各气象要素的变化能更清晰地表征植被生长不同阶段水热条件的变化特征。由1982—2010年浙江气温、降水和湿润指数的月变化率(图5)可以看出,各气象要素不同月份的年变化趋势不同。从气温变化来看,逐月气温变化整体呈增温趋势,这与全年气温变化趋势基本一致,除1、5、11月份以外,其余各月增温趋势明显,气温月变化率均通过0.05水平的置信度检验。逐月降水的变化具有明显的季节差异,其中3—7和9—10月份降水呈减少趋势,而8月份降水表现为明显的增加趋势。湿润指数除12和1月表现为微弱的增加以外,其余各月均呈下降趋势,9月下降趋势明显。

4.2.3 植被对气候要素月变化的响应

气候要素对植被生长的影响主要表现在对其季节韵律的控制,分析气候要素月变化与植被生长的关系,能更好地揭示植被生长不同时期与哪个气候要素的关系更为密切。

植被生长对气候的响应存在一定的滞后性^[33],植被生长对气候的最大响应通过植被NDVI变化与气候要素的最大相关系数来反映,如果在时间上有滞后现象,则说明植被对气候要素的变化有时滞性。表4给出了NDVI与当月、前一月和前两月气温、降水及湿润指数的相关系数,从与气温的变化关系来看,除8—10月以外的其余各月植被变化与当月气温的相关系数>前一月>前两月,其中1、2月份与当月气温相关性达到显著,说明1、2月植被对气温的影响最为显著,且无滞后性。从与降水变化关系来看,5、10月植被变化与降水的相关性明显高于其它月份,与前一月和前两月的相关系数通过0.05水平的显著性检验,说明这两个月植被受前期降水影响较为明显。从与湿润指数的变化关系来看,9、10月植被变化与前一月或前两月湿润指数的相关性大于植被与当月湿润指数的相关性,说明9、10月份植被对湿润指数存在滞后性,其中以10月份最为明显。

整体来看,1、2月植被变化受气温影响较明显,且无滞后性;5、10月植被与前一月和前两月降水相关性达到显著;10月植被与前一月和前两月湿润指数的相关性达到显著。说明冬季的热量供给是否充足是制约浙江植被生长的重要因子,同时夏季降水及干湿程度对浙江植被生长的影响较为显著,这与毕晓丽等^[34]的研究结果基本一致。

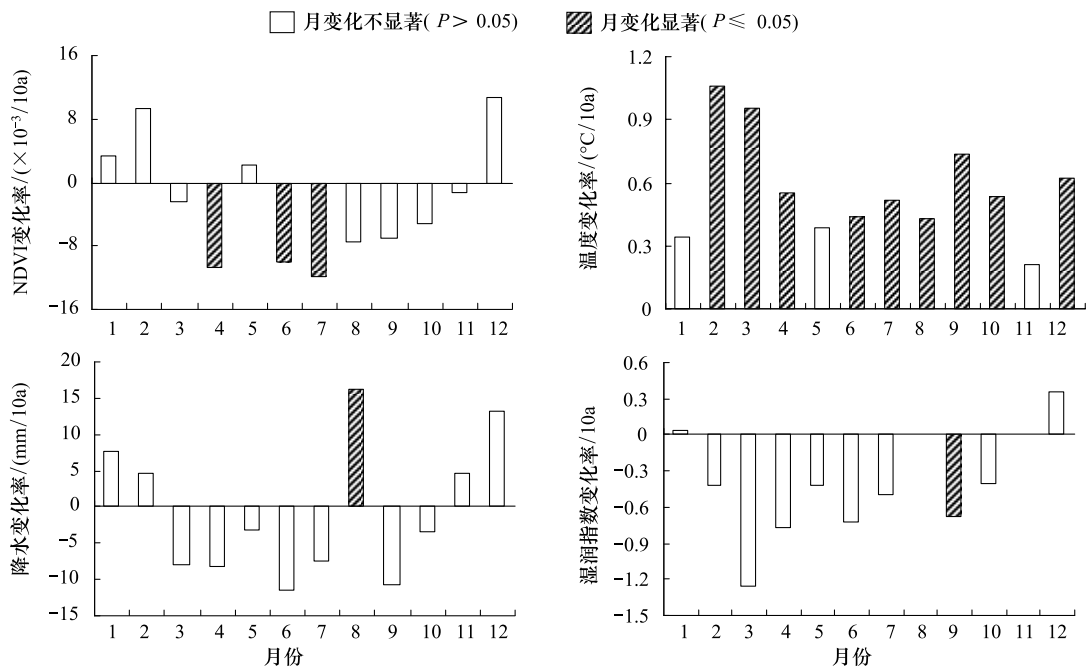


图5 1982—2010 年浙江植被 NDVI、气温、降水量和湿润指数的月变化率

Fig. 5 Variation rates of monthly NDVI, temperature, precipitation, and Humid index of Zhejiang Province from 1982 to 2010

表4 逐月 NDVI 与前 0—2 月气温、降水量和湿润指数的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between NDVI of current month and mean temperature, precipitation and humid index of current month, the month before one, and the month before last of Zhejiang Province during 1982—2010

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
R_{NDVI-T_0}	-0.40 *	0.54 **	0.27	0.13	0.01	0.20	0.27	0.07	0.06	0.02	-0.24	0.17
R_{NDVI-T_1}	0.28	0.07	0.22	0.11	0.19	-0.19	0.04	-0.06	-0.07	0.10	-0.16	-0.15
R_{NDVI-T_2}	-0.02	0.05	0.05	0.05	0.15	-0.01	-0.05	-0.29	-0.24	0.14	-0.01	-0.15
R_{NDVI-P_0}	-0.05	0.05	-0.12	-0.23	-0.04	-0.03	-0.31	-0.42 *	-0.08	0.29	0.17	-0.21
R_{NDVI-P_1}	-0.05	-0.26	0.17	0.24	-0.36 *	-0.15	-0.21	-0.10	-0.14	0.41 *	-0.16	-0.29
R_{NDVI-P_2}	0.02	-0.12	-0.08	0.29	-0.37 *	-0.14	0.10	0.30	0.24	0.36 *	-0.13	-0.38 *
R_{NDVI-K_0}	-0.02	-0.06	-0.06	-0.14	-0.01	-0.06	-0.27	-0.32	-0.12	0.23	0.14	-0.30
R_{NDVI-K_1}	-0.14	-0.27	0.03	0.18	-0.18	-0.20	-0.07	-0.09	-0.21	0.42 *	-0.15	-0.20
R_{NDVI-K_2}	-0.02	-0.26	-0.10	0.16	0.02	-0.09	0.16	0.30	0.36	0.50 *	-0.11	-0.35

R_{NDVI-T_0} 、 R_{NDVI-T_1} 和 R_{NDVI-T_2} 分别表示 NDVI 与当月、前 1 月、前 2 月气温的相关系数;以此类推; * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

5 讨论与结论

5.1 讨论

气候变化是浙江植被覆盖时空变化的重要影响因素,但非气候因素也不容忽视^[35]。已有研究表明,农业生产水平的提高、劳动力转移、经济水平的提高、生活方式的转变都可能影响到植被覆盖的变化^[36-38]。农作物覆盖地区的 NDVI 是农业耕作的直接结果,其 NDVI 变化规律反映了农作物从播种到收获的整个物理过程。草地、灌丛和森林等自然植被在年内完成一个生长过程,而耕地由于受人类活动影响大和多熟种植制度的存在,很多区域耕地在年内完成两个或多个生长周期。由于化肥农药的大量使用,农田灌溉水利设施的建设,农业生产水平的提高,使得农业耕作区 NDVI 有上升趋势。浙江省经济较发达,人类活动对环境的影响内容多样、机制复杂^[9,39],且难以量化,由图 2 分析发现,兰溪市为 NDVI 显著增加的集中区,本文尝试从粮食生产方面探求其植被 NDVI 变化的原因。

分析发现,自 20 世纪 80 年代以来兰溪市粮食单产呈增加趋势,但由于播种面积的不断下降,导致粮食总

产量下降,而同期植被 NDVI 表现为上升趋势,图 6 为兰溪市 NDVI 和粮食产量的年变化趋势,可见 NDVI 与粮食单产变化趋势较为一致,相关分析结果显示,两者呈极显著正相关($r=0.477, P\leq 0.01$),即表明农业区 NDVI 的增加与粮食单产的提高关系密切,这在一定程度上体现了人类活动的影响,使得农业生产水平有所提高,农业区 NDVI 增加。因此,人类活动是农业区植被覆盖变化的重要影响因素之一。

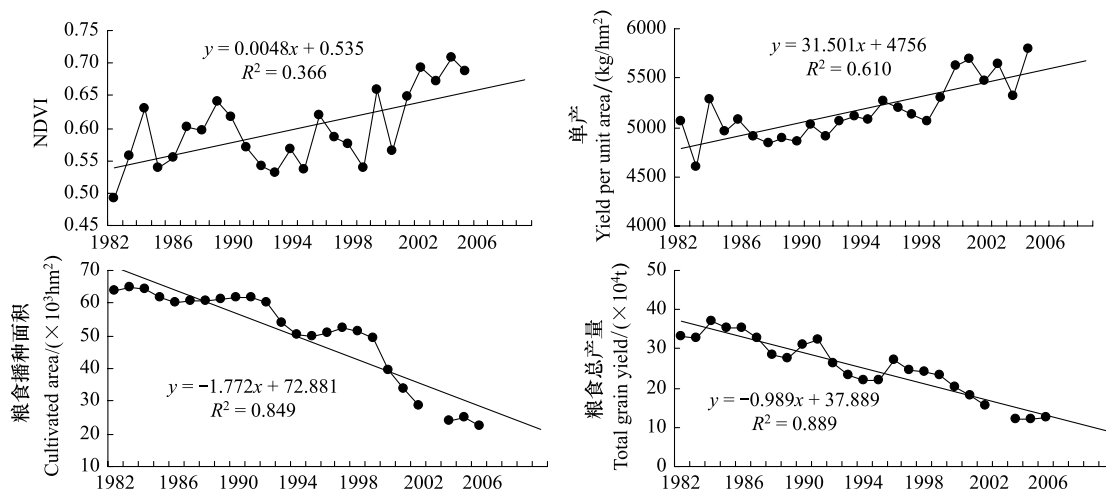


图 6 兰溪市 NDVI 和粮食产量①年变化趋势(1982—2010)

Fig. 6 Variation trend of yearly NDVI grain yield per unit area grain-crop cultivated area and total grain yield in Lan Xi from 1982 to 2010

5.2 结论

逐像元的变化斜率分析发现,1982—2010 年间,浙江植被 NDVI 整体呈缓慢下降趋势,其中显著减少的植被面积约占全省陆域面积的 29.1%,主要分布于典型的常绿阔叶林区。植被覆盖显著增加的区域不到全省陆域面积的 1.5%,多分布于作物的集中耕种地。从植被覆盖月变化来看,冬季植被呈增加趋势,主要是由于冬季农业生产活动增加所致,5 月 NDVI 的增长可能与植被生长季提前有关。

研究期间,浙江气候变化总体呈现明显的暖干化趋势,这与全球气候变化总趋势基本一致;各月气温呈上升趋势,除 1、5、11 月份以外,其余各月增温趋势明显($P\leq 0.05$);各月间降水变化趋势差异较大,其中以 8 月降水的增加最为明显;湿润指数除 12 和 1 月表现为微弱的增加以外,其余各月均呈下降趋势,尤以 9 月下降最为明显。

植被是气候、地貌、土壤和人类活动长期相互作用的结果。从年际尺度分析,NDVI 与湿润指数的关系较降水、气温更为密切,湿度的增加增大了植被的生长势,有利于植被生长;月变化分析表明冬季的热量供给是影响浙江植被生长的重要因子,而植被变化对夏季降水和干湿程度的最大响应为滞后两个月。农业生产水平的提高使得农作物种植区 NDVI 有所增加,气候变化是影响浙江植被覆盖时空变化的重要因素,但人类活动也不容忽视。

致谢:感谢浙江省气候中心李正泉博士对写作的帮助。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [2] Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, Bukhosor, Li B. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 204-210.
- [3] Li X, Li X B, Wang H, Yu F, Yu H J, Yang H. Impact of climate change on temperate grassland in northern china. *Journal of Beijing Normal*

① 粮食产量数据来源于浙江省统计局发布的《浙江省统计年鉴》

- University (Natural Science), 2006, 42(6): 818-823.
- [4] Zhang Y D, Zhang X H, Liu S R. Correlation analysis on normalized difference vegetation index (NDVI) of different vegetations and climatic factors in Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 323-330.
- [5] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Natural*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [6] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [7] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1982-1999. *Journal of Geophysical Research*. 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [8] Mynel R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [9] Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Acta Phytocological Sinica*, 2000, 24(3): 379-382.
- [10] Chen Y H, Li X B, Chen J, Shi P J. The change of NDVI time series based on change vector analysis in China, 1983—1992. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1): 12-18.
- [11] Guo Z X, Wang Z M, Song K S, Zhang B, Li F, Liu D W. Correlations between forest vegetation NDVI and water/thermal condition in Northeast China forest regions in 1982—2003. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 1930-1936.
- [12] Luo L, Wang Z M, Song K S, Zhang B, Liu D W, Ren C Y, Zhang S M. Research on the correlation between NDVI and climatic factors of different vegetations in the Northeast China. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2009, 29(4): 800-808.
- [13] Guo N, Wang X P, Cai D H, Qing J Z. Analyses on the Vegetation index variation and its formation causes in the oases in Northwest China in recent 22 years. *Arid Zone Research*, 2010, 27(1): 75-82.
- [14] Zhang Y H, Fan G Z, Li L P, Zhou D W, Wang Y L, Huang X L. Preliminary analysis on the relationships between NDVI change and temperature and precipitation in Southwest China. *Plateau and Mountain Meteorology Research*. 2009, 29(1): 6-13.
- [15] Peng D L, Huang J F, Wang X Z. Correlation analysis of regional vegetation seasonal fluctuation and climate factors based on MODIS-EVI. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 983-989.
- [16] Gao D W, Zhang X W, Cai J Z, He Y, Lin J Z. Spatiotemporal variations of vegetation cover in Zhejiang Province and their relations to eco-climatic indices. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1518-1522.
- [17] Wang S R, Miao C M. Climate resource and its variation in Zhejiang Province. Beijing: China Meteorological Press. 2008.
- [18] Goetz S J, Fiske G J, Bunn A G. Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(3): 352-365.
- [19] Kobayashi H, Dye D G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(4): 519-525.
- [20] Jin Ch en, Jönsson Per, Masayuki Tamurab, et al. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series dataset based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91: 332-344.
- [21] Gu X H, Song G B, Han L J, Xu C, Pan Y Z. Monitoring of growth changes of winter wheat based on change vector analysis. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 159-166.
- [22] Ren J Q, Chen Z X, Tang H J. Region scale remote sensing-based yield estimation of winter wheat by using MODIS-NDVI data: A case study of Jining City in Shandong Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2371-2375.
- [23] Jönsson Per, Lars Eklundh. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1824-1932.
- [24] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Effects of climate change and human activities on the changes of vegetation coverage in Loess Plateau. *Science in China (Earth Sciences)*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [25] China Meteorological Administration. Meteorological assessment methods of Ecological qualities, 2007.
- [26] Xu J H. Mathematical Methods in Contemporary geography. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [27] Piao S L, Fang J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 294-302.
- [28] Han X Z, Li S M, Luo J N, Ji X. Study On Spatiotemporal Change Of Vegetation in China since 20 years. *Arid Zone Research*, 2008, 25(6): 753-759.
- [29] Mao Y D, Su G L, Li D F, Wu Y X. Impact of climate change on plant climate productivity in Zhejiang Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 273-278.
- [30] Xu X K, Chen H, Zhang F. Correlation analysis between meteorological factors and the ratio of vegetation cover. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 221-230.
- [31] Zheng J Y, Ge Q S, Zhao H X. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(1): 28-32.
- [32] Piao S L, Fang J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982—1999. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119-125.

- [33] Cui L L, Shi J, Yang Y M, Fan W Y. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in Eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 850-860.
- [34] Bi X L, Wang H, Ge J P. Wave-type time series variation of the correlation between NDVI and climatic factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 284-288.
- [35] Song F Q, Xing K X, Liu Y, Liu Z C, Kang M Y. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 0354-0363.
- [36] Vicente-Serrano S M, Lasanta T, Romo Alfredo. Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish central pyrenees; role of human management. *Environ Management*, 2005, 34(6): 802-818.
- [37] Madelene Ostwald, Chen D L. Land-use change; impacts of climate variations and policies among small-scale farmers in the Loess Plateau China. *Land Use Policy*, 2006, 23(4): 361-371.
- [38] Xu J X. Effect of the changing rural socio-economic factors on sediment yield of the Jialiniang river basin. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(4): 385-394.
- [39] Wang L X, Yang Y L, He Y H, Zheng Y F. Discussion of research methods Oil relationship between climate change and plant. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1): 43-48.

参考文献:

- [2] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [3] 李霞, 李晓兵, 王宏, 喻锋, 余弘婧, 杨华. 气候变化对中国北方温带草原植被的影响. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(6): 618-623.
- [4] 张远东, 张笑鹤, 刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 323-330.
- [9] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.
- [10] 陈云浩, 李晓兵, 陈晋, 史培军. 1982—1992 年中国陆地植被 NDVI 演变特征的变化矢量分析. *遥感学报*, 2002, 6(1): 12-18.
- [11] 国志兴, 王宗明, 宋开山, 张柏, 李方, 刘殿伟. 1982—2003 年东北森林植被 NDVI 与水热条件的相关分析. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 1930-1936.
- [12] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 张柏, 刘殿伟, 任春颖, 张素梅. 1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究. *西北植物学报*, 2009, 29(4): 800-808.
- [13] 郭锐, 王小平, 蔡迪花, 倾继祖. 近 20 多年来西北绿洲植被指数的变化及其成因. *干旱区研究*, 2010, 27(1): 75-82.
- [14] 张永恒, 范广洲, 李腊平, 周定文, 王永立, 黄先伦. 西南地区植被变化与气温及降水关系的初步分析. *高原山地气象研究*, 2009, 29(1): 6-13.
- [15] 彭代亮, 黄敬峰, 王秀珍. 基于 MODIS-EVI 区域植被季节变化与气象因子的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 983-989.
- [16] 高大伟, 张小伟, 蔡菊珍, 何月, 林建忠. 浙江省植被覆盖时空动态及其与生态气候指标的关系. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1518-1522.
- [17] 王守荣, 苗长明. 浙江省气候资源环境及其变化. 北京: 气象出版社. 2008.
- [24] 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. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [25] 中国气象局. 生态质量气象评价规范, 2007.
- [26] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [27] 朴世龙, 方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 294-302.
- [28] 韩秀珍, 李三妹, 罗敬宁, 姬翔. 近 20 年中国植被时空变化研究. *干旱区地理*, 2008, 25(6): 753-759.
- [29] 毛裕定, 苏高利, 李发东, 吴尧祥. 气候变化对浙江省植物气候生产力的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(2): 273-278.
- [30] 徐兴奎, 陈红, 张凤. 气象因子与地表植被生长相关性分析. *生态学报*, 2003, 23(2): 221-230.
- [31] 郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 28-32.
- [32] 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. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.
- [33] 崔林丽, 史军, 杨引明, 范文义. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征. *地理学报*, 2009, 64(7): 850-860.
- [34] 毕晓丽, 王辉, 葛剑平. 植被归一化指数(NDVI)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 284-288.
- [35] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 刘志超, 康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 0354-0363.
- [38] 许炯心. 农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响. *山地学报*, 2006, 24(4): 385-394.
- [39] 王连喜, 杨有林, 何雨红, 郑有飞. 气候变化和植被关系研究方法探讨. *生态学杂志*, 2003, 22(1): 43-48.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元