

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

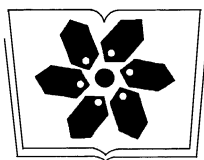
中国生态学会2011年学术年会专辑



第31卷 第19期 Vol.31 No.19 **2011**

中国生态学会  
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 31 卷 第 19 期 2011 年 10 月 (半月刊)

## 目 次

|                                           |                      |
|-------------------------------------------|----------------------|
| 卷首语 .....                                 | 本刊编辑部 ( I )          |
| 我国生态学研究及其对社会发展的贡献 .....                   | 李文华 (5421)           |
| 生态学的现任务——要在混乱和创新中前进 .....                 | 蒋有绪 (5429)           |
| 发展的生态观:弹性思维 .....                         | 彭少麟 (5433)           |
| 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 .....                 | 刘世荣,王 晖,栾军伟 (5437)   |
| 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展 .....             | 于贵瑞,方华军,伏玉玲,等 (5449) |
| 流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展 .....               | 刘丽娟,李小玉,何兴元 (5460)   |
| 中国珍稀濒危孑遗植物珙桐种群的保护 .....                   | 陈 艳,苏智先 (5466)       |
| 水资源投入产出方法研究进展 .....                       | 肖 强,胡 聃,郭 振,等 (5475) |
| 我国害鼠不育控制研究进展 .....                        | 刘汉武,王荣欣,张凤琴,等 (5484) |
| 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究 .....   | 李辉霞,刘国华,傅伯杰 (5495)   |
| 毛乌素沙地克隆植物对风蚀坑的修复 .....                    | 叶学华,董 鸣 (5505)       |
| 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征 .....                | 王麒麟,范晓辉,王孟本 (5512)   |
| 森林资源可持续状况评价方法 .....                       | 崔国发,邢韶华,姬文元,等 (5524) |
| 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较 .....     | 王计平,杨 磊,卫 伟,等 (5531) |
| 未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响 .....          | 俄有浩,施 茜,马玉平,等 (5542) |
| 山东近海生态资本价值评估——近海生物资源现存量价值 .....           | 杜国英,陈 尚,夏 涛,等 (5553) |
| 山东近海生态资本价值评估——供给服务价值 .....                | 王 敏,陈 尚,夏 涛,等 (5561) |
| 特大冰冻灾害后大明山常绿阔叶林结构及物种多样性动态 .....           | 朱宏光,李燕群,温远光,等 (5571) |
| 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响 .....            | 乔振江,蔡昆争,骆世明 (5578)   |
| 中国环保模范城市生态效率评价 .....                      | 尹 科,王如松,姚 亮,等 (5588) |
| 污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用——以太湖流域上游湖州市为例 .....  | 焦雯珺,闵庆文,成升魁,等 (5599) |
| 近二十年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益 .....              | 凌焕然,王 伟,樊正球,等 (5607) |
| 城市社区尺度的生态交通评价指标 .....                     | 戴 欣,周传斌,王如松,等 (5616) |
| 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例 .....     | 李 锋,叶亚平,宋博文,等 (5623) |
| 中国居民消费隐含的碳排放量变化的驱动因素 .....                | 姚 亮,刘晶茹,王如松 (5632)   |
| 煤矿固废资源化利用的生态效率与碳减排——以淮北市为例 .....          | 张海涛,王如松,胡 聃,等 (5638) |
| 城市遮阴环境变化对大叶黄杨光合过程的影响 .....                | 于盈盈,胡 聃,郭二辉,等 (5646) |
| 广东永汉传统农村的聚落生态观 .....                      | 姜雪婷,严力蛟,后德仟 (5654)   |
| 长江三峡库区昆虫丰富度的海拔梯度格局——气候、土地覆盖及采样效应的影响 ..... | 刘 晔,沈泽昊 (5663)       |
| 东南太平洋智利竹筴鱼资源和渔场的时空变化 .....                | 化成君,张 衡,樊 伟 (5676)   |
| 豚草入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响 .....               | 谢俊芳,全国明,章家恩,等 (5682) |

|                                                      |                         |
|------------------------------------------------------|-------------------------|
| 我国烟粉虱早春发生与秋季消退·····                                  | 陈春丽, 鄧军锐, 戈 峰, 等 (5691) |
| 变叶海棠及其伴生植物峨眉小檗的水分利用策略 ·····                          | 徐 庆, 王海英, 刘世荣 (5702)    |
| 杉木人工林不同深度土壤 CO <sub>2</sub> 通量·····                  | 王 超, 黄群斌, 杨智杰, 等 (5711) |
| 不同浓度下四种除草剂对福寿螺和坑螺的生态毒理效应·····                        | 赵 兰, 骆世明, 黎华寿, 等 (5720) |
| 短期寒潮天气对福州市绿地土壤呼吸及组分的影响·····                          | 李熙波, 曾文静, 李金全, 等 (5728) |
| 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平·····                 | 王计平, 杨 磊, 卫 伟, 等 (5739) |
| 气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图——以油松为例·····               | 张 雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等 (5749) |
| 北亚热带马尾松年轮宽度与 NDVI 的关系 ·····                          | 王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等 (5762) |
| 物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响·····                          | 余开亮, 陈 宁, 余四胜, 等 (5771) |
| 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能 ·····                             | 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等 (5780) |
| 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性·····                       | 刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (5789) |
| 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响 ·····                         | 符利勇, 曾伟生, 唐守正 (5797)    |
| 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响·····                         | 张 喜, 朱 军, 崔迎春, 等 (5809) |
| 不同培育时间侧柏种基盘苗根系生长和分布·····                             | 杨喜田, 董娜琳, 闫东锋, 等 (5818) |
| Cd <sup>2+</sup> 与 CTAB 复合污染对枫香幼苗生长与生理生化特征的影响 ·····  | 章 芹, 薛建辉, 刘成刚 (5824)    |
| 3 种入侵植物叶片挥发物对早稻幼苗根的影响 ·····                          | 张凤娟, 徐兴友, 郭艾英, 等 (5832) |
| 米槠-木荷林优势种群的年龄结构及其更新策略 ·····                          | 宋 坤, 孙 文, 达良俊 (5839)    |
| 褐菖鲉肝 CYP 1A 作为生物标志物监测厦门海域石油污染状况 ·····                | 张玉生, 郑榕辉, 陈清福 (5851)    |
| 基于输入-输出流分析的生态网络 $\varphi$ 模式能流 $\rho$ 模式能流测度方法 ····· | 李中才, 席旭东, 高 勤, 等 (5860) |

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 444 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 50 \* 2011-10



**封面图说:** 胡杨是我国西北干旱沙漠地区原生的极其难得的高大乔木, 树高 15—30 米, 能忍受荒漠中的干旱环境, 对盐碱有极强的忍耐力。为适应干旱气候一树多态叶, 因此胡杨又称“异叶杨”。它对于稳定荒漠河流地带的生态平衡, 防风固沙, 调节绿洲气候和形成肥沃的森林土壤具有十分重要的作用。秋天的胡杨林一片金光灿烂。

**彩图提供:** 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com



李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. 生态学报, 2011, 31 (19): 5495-5504.

Li H X, Liu G H, Fu B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (19): 5495-5504.

## 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化 和人类活动的响应研究

李辉霞<sup>1,2</sup>, 刘国华<sup>1</sup>, 傅伯杰<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 佛山大学 资源环境系, 佛山 528000)

**摘要:**采用 Spot VEGETATION 逐旬 NDVI 数据、1:100 万植被类型图和气象站资料,在掌握近 10a 三江源地区植被变化趋势基础上,分不同植被类型探讨植被生长对气候变化的响应机制,并通过分离气候要素与人类活动对 NDVI 的贡献,定量评估生态保护与建设工程的实施效果。结果表明,区域尺度上,三江源地区 2001—2010 年植被生长呈好转趋势,植被增长从东南向西北递减;在 10a 时间尺度上,气候变化是影响植被生长的决定性因素,但人类活动可在短期内加快植被变化速率,气候要素和人类活动对植被生长的贡献分别为 79.32% 和 20.68%;降水和气温对植被生长的影响程度相当,其中受春季和秋季的降水和气温影响最大,尤其是植被生长季前后一个月(4 月份和 10 月份)的气候条件;与林地和灌丛相比,高寒草地受气候条件的抑制作用更为明显,其中高寒草甸受气候变化的影响最大,NDVI 与降水和气温均具有较高相关性,高寒草原受气温的影响比较大,而高山植被受降水的抑制作用更为明显;在气候条件利于植被生长的趋势下,2001—2010 年三江源地区的人类活动对生态环境表现出正影响,实测 NDVI<sub>max</sub> 与模拟 NDVI<sub>max</sub> 之间的残差为 0.0863,表明生态保护与建设行动取得初步成效,其中黄河源区东部和长江源区通天河两侧的生态恢复效益最为明显,而在唐古拉山、昆仑山、布青山、阿尼玛卿山等山脉的周边地区,人类活动对生态环境仍表现为负影响;时间尺度上人类活动对植被的正影响呈现出下降趋势,2001—2010 年 NDVI<sub>max</sub> 残差的回归斜率为 -0.0039,表明生态项目实施的短期行为严重,生态建设的效果缺乏长效性。

**关键词:**NDVI; 植被变化; 气候变化; 人类活动; 三江源

## Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region

LI Huixia<sup>1,2</sup>, LIU Guohua<sup>1</sup>, FU Bojie<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Department of Resource and Environmental Science, Foshan University, Foshan 528000, China

**Abstract:** Vegetation change trends and the response of different types of vegetation to climate change were analyzed using spot vegetation Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data from 1998 to 2010, vegetation maps at a scale of 1:1000000 and climate data obtained from 16 weather stations in or near to the Three-River Headwaters region. The effectiveness of ecological conservation and construction was also assessed by separating the contribution of human activity from climate factors to vegetation growth. Results show that vegetation in the study area increased in density between 2001 to 2010 at a regional scale and vegetation growth decreased from the southeast to the northwest of the study area. The contribution of climate change and human activity to vegetation growth was calculated at 79.32% and 20.68%, respectively, indicating that change in vegetation is mostly influenced by climate change and enhanced by human activity.

**基金项目:**国家“十一五”支撑项目(2009BAC61B02);中国博士后科学基金(20100470561)

**收稿日期:**2011-06-07; **修订日期:**2011-07-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@rcees.ac.cn

Precipitation as well as temperature has a great impact on vegetation change at the study site. Precipitation and temperature during spring and autumn, especially in April and October, are the most important to vegetation growth in the alpine area. The impact of climate change on NDVI differs between vegetation types, with the greatest impact observed in alpine grassland areas over forest and shrub areas. The NDVI of alpine meadow areas correlates strongly with both precipitation and temperature. In alpine steppe areas temperature has more influence on NDVI, while precipitation has a stronger relationship with NDVI in areas of mountain vegetation. Under a changing climate between 2001 to 2010, which promoted vegetation growth because of the increase in precipitation and temperature, human activity was found to have a positive effect on vegetation growth as shown from the calculation of a residual value of 0.0863 between real NDVI and simulated NDVI. This provides evidence that ecological conservation and construction programs have achieved initial success. The most obvious effects occur in the east of the Yellow River source region and the two sides of Tongtian River of Yangtze River source region. In mountain areas such as Tanggula Mountain, Kunlun Mountain and Buqing Mountain, human activity is still found to have negative effects on vegetation growth. The positive effects of human activity on vegetation decreased between 2001 to 2010, as shown from the negative slope of  $-0.0039$ . This indicates that most ecological projects are implemented with a short-term design and a lack of long-term planning.

**Key Words:** NDVI; vegetation change; climate change; human activity; the Three-River Headwaters region

作为青藏高原的腹地和主体,三江源地区独特和典型的高寒植被系统在全球气候变化及其气候变化响应研究中具有重要地位<sup>[1]</sup>。该区的植被生长状况不仅决定着当地的生态环境和畜牧业生产,对整个中国及亚洲的生态安全和经济发展也具有重要的影响<sup>[2]</sup>。三江源地区气候条件的时空差异比较显著<sup>[3]</sup>,且生态退化问题突出,是国家开展生态建设的重点区域,2000 年成立省级自然保护区<sup>[4]</sup>,2003 年正式批准为国家级自然保护区,2005 年规划投资 75 亿元启动了三江源生态环境保护与建设工程,实施退牧还草、黑土滩治理等 22 个生态建设项目<sup>[5]</sup>。在气候波动和人类恢复行动的叠加作用下,三江源地区的植被生长状况会发生怎样的变化?气候因素和生态建设工程对植被生长的影响程度如何?这些都是亟待讨论的问题。因此,研究三江源近十年来植被变化趋势及其对气候变化和人类活动的响应问题具有重要意义。

区域尺度的三江源植被研究主要集中在植被变化趋势及其驱动机制两个方面。在植被变化方面,存在“植被持续退化”<sup>[6-8]</sup>和“植被表现出略有增加趋势”<sup>[2,9]</sup>两种截然相反的研究结果;在驱动机制方面,人类因素和气候因素孰轻孰重仍然是学术界争议的焦点问题<sup>[6,10-11]</sup>,甚至在气候因子驱动过程中,降水变化与植被生长的关系也尚不明确<sup>[12-14]</sup>。出现同一区域研究结论不一致主要有几个原因,第一,研究选取的时间尺度和空间尺度不一致;第二,植被对气候变化响应的空间异质性<sup>[12,15]</sup>;第三,数据获取和实验手段的差异<sup>[16]</sup>;第四,未对气候因素和人类因素的影响进行耦合研究。现有研究主要关注气候因素对植被变化的影响机制,有关人类活动对植被变化的影响关系的研究鲜见<sup>[4,16]</sup>,而且基本上都是从整体上揭示 NDVI 与气候要素的关系<sup>[2,12-13]</sup>,忽视了不同植被类型对气候变化响应特征的差异,未排除水体等非植被区域的干扰。此外,这些研究所用资料大多是 2008 年以前时段,对最近几年的植被生长状况缺乏新认识。因此,本研究利用 1998—2010 年的 NDVI 数据,以象元为基本计算单元,探讨不同类型植被的变化趋势及其对气候变化和人类活动的响应机制,以便掌握三江源不同地区植被演变的趋势和生态建设项目的效果,为制定相应的政策提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

三江源区位于青海省南部,地处青藏高原腹地,为中国典型的高寒地区,是长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地,素有“中华水塔”之称,是全国生态系统的天然屏障。三江源地区的精准范围目前尚无统一标准<sup>[16]</sup>,本研究参阅相关文献<sup>[5,8,17]</sup>,将江河源区内生态环境比较脆弱、野生动植物资源丰富、亟待治理和保护的区域

作为研究区,地理位置大致位于东经  $89^{\circ}24'—102^{\circ}15'$ ,北纬  $31^{\circ}33'—36^{\circ}17'$ ,总面积约  $35.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均海拔高度 4580m 左右,行政区域包括玉树、果洛、海南、黄南 4 个藏族自治州的 16 个县和格尔木市的唐古拉乡。区内气候属典型的高原大陆性气候,冷热两季交替、干湿两季分明。自然环境类型多样,从东南向西北依次分布着针叶林、灌丛、高寒草甸、高寒草原与高山稀疏植被等植被类型<sup>[18]</sup>。

## 1.2 数据来源及处理

作为反映植被状况的一个重要遥感参数,归一化植被指数 NDVI 是植物生长状态和植被空间分布密度的指示因子,与植被分布密度呈线性相关<sup>[19-21]</sup>。本文采用 1998 年 4 月至 2010 年 12 月的 Spot VEGETATION 逐旬 NDVI 数据进行植被变化分析,共有 459 期影像。该数据空间分辨率为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,时间分辨率为 10d,象元值采用国际通用的最大合成法(Maximum Value Composites, MVC)获得,由每个象元 NDVI 的最大值确定,确保受云影响的程度最低。1998—2008 年的 NDVI 数据由中国西部环境与生态科学数据中心提供,2009—2010 年 NDVI 数据来源于全球 Spot VEGETATION 产品免费分发网站。NDVI 数据主要采用均值法和最大合成法进行处理,为避免某些极端值的影响,每月 NDVI 值由上、中、下三旬数据求平均值获得;每年 NDVI 值则是通过国际通用的最大合成法获取,以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰。由于年度的 NDVI 最大值一般都出现在 8 月份,1998 年 1—3 月份 NDVI 数据的缺失对年度 NDVI 最大值合成结果的影响不大。

气象数据为三江源区内及周边的伍道梁、兴海、托托河、杂多、曲麻莱、玉树、玛多、清水河、玛沁(果洛)、达日、久治、囊谦、班玛、河南、贵南、同仁等共 16 个气象站点的气温、降水月值数据集,源自中国气象科学数据共享服务网。气象数据主要采用反距离权重内插法(Inverse Distance Weighted, IDW)进行空间插值,获取三江源区 1998—2010 年逐月的气温和栅格图像。插值采用的坐标系统为 D\_WGS\_1984,栅格大小  $0.005^{\circ}$ ,通过投影转换和重采样使气象栅格与 NDVI 具有一致的投影坐标和空间分辨率。

植被类型数据由 1:100 万中国植被类型图(2000 年版)合并处理获得,数据源自地球系统科学数据共享平台。按照图例的一级分类,把图斑进行合并,归纳为森林、灌丛、高寒草甸、高寒草原、高山植被 5 种植被类型,其中极小比例的沼泽和荒漠植被分别归到高寒草甸类和高寒草原类。

## 1.3 分析方法

### 1.3.1 NDVI 趋势分析方法

采用一元线性回归方程的斜率来分析每个栅格点的变化趋势。Stow 等用一元线性回归来分析每个栅格点的变化趋势,从而来计算植被的绿色变化率(greenness rate of change, GRC),GRC 被定义为某时间段内的季节合成归一化植被指数年际变化的一元线性回归方程的斜率<sup>[22-23]</sup>。本文采用此方法来模拟每个栅格 NDVI 的年际变化趋势,计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{j=1}^n (j \times \text{NDVI}_{\max}^j) - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n \text{NDVI}_{\max}^j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - (\sum_{j=1}^n j)^2} \quad (1)$$

式中,变量  $j$  为 1—10 的年序号,  $\text{NDVI}_{\max}^j$  为第  $j$  年  $\text{NDVI}_{\max}$ 。运用 GIS 中的栅格计算功能模块,可计算  $\text{NDVI}_{\max}$  在 2001—2010 年期间的变化趋势图,反映 10a 的时间序列中三江源植被  $\text{NDVI}_{\max}$  的变化趋势。某像点的趋势线是这个像点 10a 的  $\text{NDVI}_{\max}$  值用一元线性回归模拟出来的一个总的变化趋势。slope 即这条趋势线的斜率。这个趋势线并不是简单的第 1 年和最后一年的连线。其中  $\text{slope} > 0$  则说明此象元  $\text{NDVI}_{\max}$  在 10 a 间的变化趋势是增加的,反之则是减少。

### 1.3.2 NDVI 与气候要素的回归模型

要建立 NDVI 和气候要素之间理想的回归方程,理论上需选择完全没有人类活动干扰的植被资料,但这在现实操作中具有很大的难度。由于研究区自 2000 年 8 月份成立省级自然保护区以来,才正式开始大规模的生态保护和恢复行动,因此,假设 2001 年以前研究区的植被系统、人类活动、气候因子之间存在一种平衡



状态,选用 1998—2000 年的数据进行 NDVI 与气象要素的空间关系分析。以象元作为计算单元,对这 3 年的年度  $NDVI_{\max}$ 、月气温、月降水图像进行均值统计,然后分不同植被类型计算  $NDVI_{\max}$  与各月份气温、降水的相关系数,依相关性大小选出与  $NDVI_{\max}$  关系最为密切的两个气温月值和两个降水月值,建立与  $NDVI_{\max}$  之间的线性回归方程。

$$NDVI_{\max}^i = a^i P_1^i + b^i P_2^i + c^i T_1^i + d^i T_2^i + e^i \quad (2)$$

式中,  $NDVI_{\max}^i$  为第  $i$  种植被类型  $NDVI_{\max}$  基于气候条件的模拟值,  $P_1^i$ 、 $P_2^i$  分别为第  $i$  种植被类型中与  $NDVI_{\max}$  相关性最高和第二高的月降水值,  $T_1^i$ 、 $T_2^i$  分别为第  $i$  种植被类型中与  $NDVI_{\max}$  相关性最高和第二高的月气温值,  $a^i$ 、 $b^i$ 、 $c^i$ 、 $d^i$ 、 $e^i$  为第  $i$  种植被类型回归方程的待定系数。

### 1.3.3 气候要素与人类活动贡献的分离方法

采用残差分析法实现气候要素和人类活动对植被生长影响的分离。在干旱、半干旱地区天然草地中,植被年度  $NDVI_{\max}$  主要由气候条件和人类活动强度所决定,利用气候条件和  $NDVI_{\max}$  之间的回归关系模型,可分离出  $NDVI_{\max}$  中气候因素贡献的部分<sup>[24]</sup>。在不考虑其它非决定性因素情况下,  $NDVI_{\max}$  实际值与基于气候变化的模拟值之间的残差,即为人类活动所贡献的部分<sup>[24-26]</sup>。按照参照时段(大规模生态保护与建设之前)各种植被类型 NDVI 与气候要素的空间关系模型,运用植被类型图和 2001—2010 年的气候数据,将近 10a 来各年度的气候条件设为不同的气候变化情景,模拟在没有实施生态恢复与建设措施情况下各年度  $NDVI_{\max}$  的空间格局,然后以行政边界为统计单元,计算实测年度  $NDVI_{\max}$  与模拟年度  $NDVI_{\max}^j$  之间的残差  $\sigma$ ,用来衡量近 10a 来人类活动导致的 NDVI 增减幅度,  $\sigma$  为正值表示人类活动对植被生长产生正影响,生态环境得到改善,反之则认为人类活动对植被产生负影响,加剧植被退化程度。

$$\sigma^j = NDVI_{\max}^j - NDVI_{\max}^j \quad (3)$$

式中,  $\sigma^j$  为第  $j$  年度第  $i$  种植被类型  $NDVI_{\max}$  实测值与模拟值之间的残差,  $NDVI_{\max}^j$  为第  $j$  年度第  $i$  种植被类型  $NDVI_{\max}$  的实测值,  $NDVI_{\max}^j$  为第  $j$  年度第  $i$  种植被类型  $NDVI_{\max}$  基于气候条件的模拟值。

## 2 结果与分析

### 2.1 NDVI 时空变化特征

从 2001—2010 年平均状况看,三江源植被覆盖区域实测  $NDVI_{\max}$  的范围在 0.002—0.808 之间,平均值约为 0.417。不同植被类型之间的  $NDVI_{\max}$  也存在较大差异,从大到小依次排序为林地、灌丛、高寒草甸、高山植被、高寒草原。三江源植被长势呈现出从东南向西北阶梯式递减的格局(图 1),第 1 阶梯包括河南县、泽库县、同德县、玛沁县东部、甘德县、久治县和班玛县,县域平均  $NDVI_{\max}$  大于 0.60,平均海拔在 4000m 左右,植被类型以高寒草甸和灌丛为主,在同德县和玛沁县交界处分布有林地,同德县北部生长有高寒草原,甘德县、久治县零星分布有高山植被;第 2 阶梯包括兴海县、玛沁县西部、达日县、称多县、玉树县和囊谦县,县域平均  $NDVI_{\max}$  处于 0.50—0.60 之间,平均海拔约 4400m,植被类型以高寒草甸和灌丛为主,高山植被零星分布,玉树县和囊谦县局部分布有林地,兴海县和称多县有高寒草原成片分布;第 3 阶梯包括玛多县、曲麻莱县大部分地区、治多县东部和杂多县,县域平均  $NDVI_{\max}$  处于 0.40—0.50 之间,平均海拔在 4650m 左右,植被类型以高寒草甸、高寒草原和高山植被为主,局部地区有小面积的灌丛分布;第 4 阶梯包括唐古拉乡、治多县西部和曲麻莱县西北角,县域平均  $NDVI_{\max}$  在 0.40 以下,平均海拔约为 5000m,植被类型以高寒草原为主,局部分布有高寒草甸。

近 10a 来三江源植被状况呈略有好转趋势,  $NDVI_{\max}$  的回归直线斜率为 0.0047,与邵全琴等<sup>[5]</sup>利用 2004 年和 2008 年 TM 影像分析得到的三江源地区 2004 年以来生态变化趋于好转的结论基本一致。与植被长势空间格局相似,植被好转趋势也从东南向西北递减(图 1),水热条件好的东南部植被好转比较明显,自然条件较差的西北部植被恢复较为缓慢。按行政单元,同德县、达日县、久治县、班玛县和囊谦县植被好转的趋势最为明显,县域平均的  $NDVI_{\max}$  变化斜率 0.007 以上;其次是河南县、泽库县、兴海县、甘德县、玛沁县、玛多县、称多县和玉树县,县域平均的  $NDVI_{\max}$  变化斜率在 0.005—0.007 之间;曲麻莱县、治多县、杂多县和唐古拉乡的

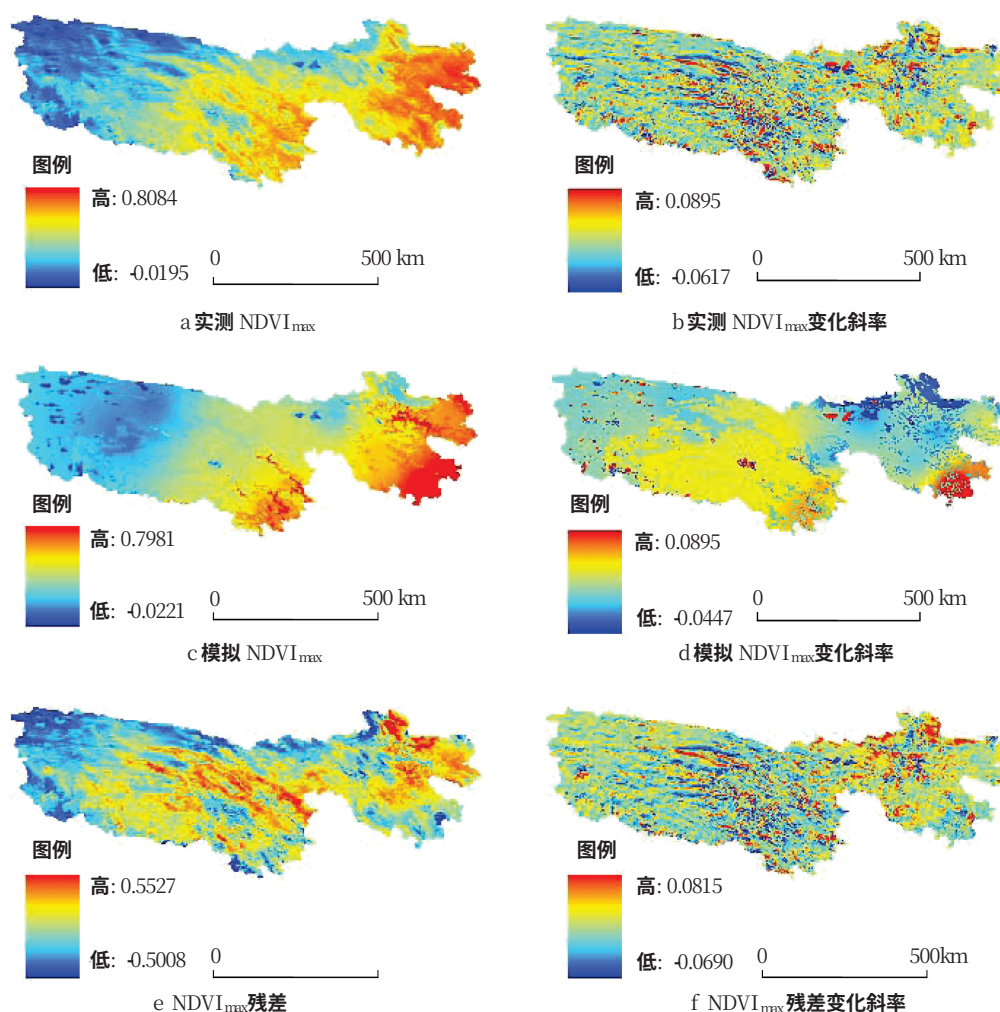


图 1 2001—2010 年三江源地区实测  $NDVI_{max}$ 、模拟  $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{max}$  残差及变化斜率

Fig. 1 Real  $NDVI_{max}$ , simulated  $NDVI_{max}$ , residual of  $NDVI_{max}$  and the slope

植被好转趋势最为平缓, 县域平均的  $NDVI_{max}$  变化斜率在 0.005 以下。按植被类型, 高山植被好转最明显,  $NDVI_{max}$  变化斜率为 0.009; 其次是高寒草原和林地,  $NDVI_{max}$  变化斜率在 0.005 左右; 高寒草甸的  $NDVI_{max}$  变化斜率为 0.004, 略低于高寒草原; 灌丛的好转趋势最不明显,  $NDVI_{max}$  变化斜率只有 0.003。

## 2.2 植被生长对气候变化的响应

以象元为单元, 在排除非植被区域的基础上, 采用大规模保护与建设之前 1998—2000 年的数据, 分别从年尺度、季节尺度和月尺度对  $NDVI_{max}$  和气温、降水进行空间相关性分析。结果表明, 三江源地区的植被生长与降水和气温均有着密切的关系,  $NDVI_{max}$  与年、季、月尺度上的降水和气温的相关系数均通过  $P < 0.001$  水平的显著性检验 (表 1), 其中与年降水和年均气温的相关系数分别达 0.71 和 0.69; 在季节尺度上, 植被生长受春季 (3—5 月) 和秋季 (9—11 月) 的气候条件影响最大,  $NDVI_{max}$  与春季的降水和气温的相关系数均在 0.71 左右, 与秋季降水和气温相关系数也达到 0.70 和 0.69, 与夏季 (6—8 月) 降水和气温相关系数为 0.62 和 0.64, 与冬季 (12—翌年 2 月) 降水和气温相关系数为 0.43 和 0.65; 在月尺度上, 植被长势主要受生长季 (5—9 月) <sup>[4, 12]</sup> 前后一个月 (4 月份和 10 月份) 气候条件的控制,  $NDVI_{max}$  与 4 月份降水和气温的相关系数为 0.71 和 0.70, 与 10 月份降水和气温的相关系数为 0.72 和 0.69。不同植被类型对气候变化的响应特征存在差异, 高寒草地植被受气候条件的影响明显大于林地和灌丛,  $NDVI_{max}$  与各尺度降水和气温的相关系数均通过  $P < 0.001$  水平的显著性检验。高寒草甸的生长受水热条件控制最为明显,  $NDVI_{max}$  与年降水和年均气温的相关



系数分别为 0.65 和 0.60; 季节尺度, 高寒草甸生长主要受春、秋季气候条件的抑制,  $NDVI_{max}$  与春、秋季降水和气温的相关系数均在 0.60 以上。高寒草原在年尺度上对气温变化的敏感程度大于降水,  $NDVI_{max}$  与年均气温和年降水相关系数分别为 0.59 和 0.49; 季节尺度上受春季的降水和气温影响最明显,  $NDVI_{max}$  与春季降水和气温的相关系数分别达到 0.65 和 0.61。高山植被长势受降水的影响大于气温, 年尺度上  $NDVI_{max}$  与降水和气温的相关系数为 0.53 和 0.48; 季节尺度主要受春、秋季的降水和气温影响比较大。对于林地和灌丛, 年尺度上降水的影响远远大于气温, 季节尺度主要受春季降水和冬季气温的影响,  $NDVI_{max}$  与春季降水相关系数分别为 0.42 和 0.48, 与冬季气温相关系数分别为 -0.24 和 -0.13。

表 1  $NDVI_{max}$  与气候要素的相关系数表Table 1 Correlation coefficients of  $NDVI_{max}$  and climate factors

| 气候要素<br>Climate factors | 林地<br>Forest | 灌丛<br>Shrub | 高寒草甸<br>Alpine meadow | 高寒草原<br>Alpine steppe | 高山植被<br>Alpine vegetation | 植被总体<br>All vegetation |
|-------------------------|--------------|-------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| 年降水 Climate factors     | 0.211 ***    | 0.295 ***   | 0.653 ***             | 0.495 ***             | 0.528 ***                 | 0.714 ***              |
| 春季降水                    | 0.420 ***    | 0.477 ***   | 0.610 ***             | 0.647 ***             | 0.545 ***                 | 0.690 ***              |
| 夏季降水                    | 0.043        | 0.120 ***   | 0.561 ***             | 0.264 ***             | 0.441 ***                 | 0.621 ***              |
| 秋季降水                    | 0.055        | 0.208 ***   | 0.634 ***             | 0.434 ***             | 0.552 ***                 | 0.700 ***              |
| 冬季降水                    | -0.074 ***   | 0.096 ***   | 0.353 ***             | -0.019 ***            | 0.463 ***                 | 0.427 ***              |
| $P_1$                   | 0.006        | 0.140 ***   | 0.242 ***             | 0.013 ***             | 0.355 ***                 | 0.311 ***              |
| $P_2$                   | -0.157 ***   | -0.029 ***  | 0.169 ***             | -0.285 ***            | 0.367 ***                 | 0.234 ***              |
| $P_3$                   | 0.277 ***    | 0.416 ***   | 0.612 ***             | 0.436 ***             | 0.508 ***                 | 0.667 ***              |
| $P_4$                   | 0.345 ***    | 0.484 ***   | 0.624 ***             | 0.684 ***             | 0.563 ***                 | 0.713 ***              |
| $P_5$                   | 0.445 ***    | 0.463 ***   | 0.590 ***             | 0.458 ***             | 0.532 ***                 | 0.670 ***              |
| $P_6$                   | 0.044        | 0.071 ***   | 0.535 ***             | 0.214 ***             | 0.488 ***                 | 0.617 ***              |
| $P_7$                   | 0.294 ***    | 0.354 ***   | 0.506 ***             | 0.322 ***             | 0.297 ***                 | 0.543 ***              |
| $P_8$                   | -0.088 ***   | -0.053 ***  | 0.448 ***             | 0.079 ***             | 0.351 ***                 | 0.496 ***              |
| $P_9$                   | 0.023        | 0.154 ***   | 0.566 ***             | 0.327 ***             | 0.475 ***                 | 0.623 ***              |
| $P_{10}$                | 0.085 ***    | 0.249 ***   | 0.642 ***             | 0.645 ***             | 0.583 ***                 | 0.718 ***              |
| $P_{11}$                | -0.026       | 0.135 ***   | 0.552 ***             | 0.296 ***             | 0.474 ***                 | 0.619 ***              |
| $P_{12}$                | 0.054        | 0.232 ***   | 0.578 ***             | 0.387 ***             | 0.561 ***                 | 0.646 ***              |
| 年均气温                    | -0.116 ***   | 0.009       | 0.601 ***             | 0.594 ***             | 0.479 ***                 | 0.691 ***              |
| 春季气温                    | -0.050       | 0.116 ***   | 0.626 ***             | 0.613 ***             | 0.494 ***                 | 0.708 ***              |
| 夏季气温                    | -0.004       | 0.086 ***   | 0.550 ***             | 0.587 ***             | 0.438 ***                 | 0.641 ***              |
| 秋季气温                    | -0.098 ***   | 0.017       | 0.603 ***             | 0.584 ***             | 0.476 ***                 | 0.693 ***              |
| 冬季气温                    | -0.240 ***   | -0.131 ***  | 0.556 ***             | 0.527 ***             | 0.408 ***                 | 0.648 ***              |
| $T_1$                   | -0.251 ***   | -0.131 ***  | 0.548 ***             | 0.502 ***             | 0.390 ***                 | 0.635 ***              |
| $T_2$                   | -0.217 ***   | -0.094 ***  | 0.590 ***             | 0.566 ***             | 0.447 ***                 | 0.682 ***              |
| $T_3$                   | -0.196 ***   | -0.089 ***  | 0.593 ***             | 0.600 ***             | 0.468 ***                 | 0.691 ***              |
| $T_4$                   | 0.063        | 0.279 ***   | 0.631 ***             | 0.609 ***             | 0.492 ***                 | 0.702 ***              |
| $T_5$                   | 0.014        | 0.161 ***   | 0.612 ***             | 0.605 ***             | 0.484 ***                 | 0.691 ***              |
| $T_6$                   | -0.026       | 0.067 ***   | 0.567 ***             | 0.596 ***             | 0.457 ***                 | 0.659 ***              |
| $T_7$                   | 0.003        | 0.086 ***   | 0.531 ***             | 0.587 ***             | 0.425 ***                 | 0.623 ***              |
| $T_8$                   | 0.013        | 0.106 ***   | 0.545 ***             | 0.576 ***             | 0.428 ***                 | 0.635 ***              |
| $T_9$                   | -0.046       | 0.049 ***   | 0.567 ***             | 0.582 ***             | 0.455 ***                 | 0.659 ***              |
| $T_{10}$                | -0.067 ***   | 0.060 ***   | 0.606 ***             | 0.582 ***             | 0.471 ***                 | 0.693 ***              |
| $T_{11}$                | -0.156 ***   | -0.046 ***  | 0.598 ***             | 0.547 ***             | 0.457 ***                 | 0.686 ***              |
| $T_{12}$                | -0.247 ***   | -0.164 ***  | 0.523 ***             | 0.499 ***             | 0.382 ***                 | 0.617 ***              |

\* \* \* 通过  $P < 0.001$  水平的显著性检验,  $P_i$  表示第  $i$  个月的降水量,  $T_i$  表示第  $i$  个月的气温

为了选取更为合理的尺度来构建 NDVI 模拟模型, 分别采用年尺度的年降水和年均气温、季节尺度春节

和秋季降水和气温、月尺度 4 月份和 10 月份的降水和气温作为自变量建立 NDVI 与气候要素的回归方程,三个尺度模型的方差解释量分别为 0.55、0.60 和 0.61,月尺度模型方差解释量最高,因此,针对不同植被类型,分别选择与  $NDVI_{max}$  相关性最高、第二高的月气温和月降水,建立基于气候条件的 NDVI 模拟模型,各植被类型的回归方程  $F$  值均通过  $P < 0.005$  水平的显著性检验(表 2)。

表 2 基于气候条件的 NDVI 模拟模型  
Table 2 Simulation models of NDVI based on climate condition

| 植被类型<br>Vegetation types | 回归模型<br>Regression models                                           | $R^2$<br>Coefficient of<br>determination | 自由度<br>Degree<br>of freedom<br>( $f_1, f_2$ ) | $F$ 值<br>$F$ value | 显著性水平<br>Significance<br>level |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| 林地                       | $NDVI = -0.0087P_4 + 0.0071P_5 + 0.0083T_1 - 0.0075T_{12} + 0.4309$ | 0.2376                                   | 4,3180                                        | 201.277            | * * *                          |
| 灌丛                       | $NDVI = 0.0013P_4 + 0.0012P_5 + 0.0211T_4 - 0.0126T_{12} + 0.3007$  | 0.2772                                   | 4,24343                                       | 1760.297           | * * *                          |
| 高寒草甸                     | $NDVI = 0.0069P_4 + 0.0039P_{10} + 0.0008T_4 + 0.0236T_5 + 0.0612$  | 0.5033                                   | 4,245238                                      | 48944.250          | * * *                          |
| 高寒草原                     | $NDVI = 0.0061P_4 + 0.0068P_{10} + 0.0158T_4 - 0.0204T_5 + 0.1061$  | 0.5090                                   | 4,94081                                       | 19599.920          | * * *                          |
| 高山植被                     | $NDVI = 0.0056P_4 + 0.0075P_{10} + 0.0165T_4 - 0.0216T_5 + 0.1057$  | 0.3585                                   | 4,42559                                       | 4851.507           | * * *                          |

表中 \* \* \* 表示通过  $P < 0.005$  显著性水平检验,  $P_i$  表示第  $i$  个月的降水量,  $T_i$  表示第  $i$  个月的气温

从模拟结果看,三江源植被覆盖区域基于气候条件的  $NDVI_{max}$  范围在 0.121—0.798 之间,平均值约 0.331,模拟  $NDVI_{max}$  与实测  $NDVI_{max}$  在空间分布上具有很高相关性,相关系数为 0.81,达到  $P < 0.001$  水平的极显著相关,植被类型之间的大小排序与实测  $NDVI_{max}$  完全一致。气候变化驱动下的植被生长同样上呈现出从东南向西北递减的格局(图 1),班玛县和久治县模拟的植被状况最好,县域平均的模拟  $NDVI_{max}$  在 0.60 以上;其次是河南县和泽库县,县域平均的模拟  $NDVI_{max}$  在 0.50—0.60 之间;囊谦县、达日县、甘德县、玉树县、玛沁县和同德县的植被状况处于中等水平,县域平均的模拟  $NDVI_{max}$  在 0.40—0.50 之间;称多县、兴海县、玛多县、杂多县、曲麻莱县中东部、治多县东部的植被生长相对较差,县域平均的模拟  $NDVI_{max}$  在 0.30—0.40 之间;唐古拉乡、曲麻莱县西部和治多县西部的植被状况最差,县域平均的模拟  $NDVI_{max}$  在 0.30 以下。

在时间维上,近 10a 来气候变化对植被生长而言呈现出利好趋势,模拟  $NDVI_{max}$  的变化斜率为 0.0086,大于实测  $NDVI_{max}$  的增长幅度。在气候变化驱动下,久治县、班玛县、玉树县、囊谦县的植被增长趋势最显著(图 1),回归直线的上升斜率大于 0.012;杂多县、治多县西部、唐古拉乡西部及曲麻莱县大部分地区的模拟  $NDVI_{max}$  增长也比较明显,回归直线的斜率在 0.010 以上。在气候变化驱动下,不同类型的植被增长趋势不同,其中林地和高寒草甸  $NDVI_{max}$  上升态势较为明显,模拟  $NDVI_{max}$  的变化斜率大于 0.01;其次是高寒草原和高山植被,变化斜率在 0.005—0.01 之间;灌丛的增长态势最弱,变化斜率小于 0.005。

### 2.3 生态保护与建设的效益分析

通过计算实测年度  $NDVI_{max}$  与气候变化驱动模型模拟的年度  $NDVI_{max}$  之间的残差来衡量生态保护与建设行动的效益。计算结果表明,近 10a 来三江源的平均残差为 0.0863,表明人类活动对生态环境产生正影响,生态保护和治理措施已取得成效,对植被生长的贡献率约为 20.68%,则气候变化的贡献达 79.32%。从图 1 可看出,效益最为明显的区域集中在黄河流域东部和长江流域的通天河两侧,主要包括河南县、泽库县、同德县、甘德县、兴海县、玛沁县、玛多县西南部、称多县、玉树县、曲麻莱县南部、治多县东部及杂多县西部地区,  $NDVI_{max}$  实测值与模拟值之间的残差在 0.12 以上,人类活动对 NDVI 的贡献率在 20% 以上;人类活动表现为负影响的区域主要分布在唐古拉山、昆仑山、布青山、阿尼玛卿山等山脉的周边地区,行政范围包括治多县西部、唐古拉乡西部、曲麻莱县北部、玛多县的东北部、以及治多县和杂多县交界处的东部山体,这些地区海拔比较高,水热条件较差,不利于生态建设工程实施,人类活动方式主要为放牧,生态环境处于持续退化状态。

从植被类型看(图 2),高寒草甸的治理效果最好,实测与模拟  $NDVI_{max}$  的残差为 0.1158,对 NDVI 的贡献率达 23.84%;高寒草原和高山植被的恢复也取得一定的成效,人类活动对 NDVI 的贡献率也在 10% 以上;林地的保护效果最差,人类破坏力度超过保护与建设力度,  $NDVI_{max}$  的残差为 -0.0964。

从时间维分析,2000 年以来三江源采取的大规模生态保护和建设行动已取得成效,但人类活动的正影响呈现出下降趋势,2001—2010 年  $NDVI_{max}$  残差的变化斜率为  $-0.0039$ ,表明生态项目的实施效果缺乏长效性。从图 1 得知,仅有兴海县、同德县、玛多县、玛沁县和达日县的恢复效益呈现出上升趋势,其它行政单元  $NDVI_{max}$  残差的斜率均为负数,其中曲麻莱县、唐古拉乡、杂多县、囊谦县、玉树县、久治县和班玛县的下降态势最为明显,  $NDVI_{max}$  残差的变化斜率绝对值大于  $0.005$ 。按植被类型统计,只有高山植被的建设效益呈上升趋势,  $NDVI_{max}$  残差的变化斜率为  $0.0014$ ;其它植被类型的恢复效益均为下降趋势,其中林地和高寒草甸的下降幅度最大,变化斜率的绝对值大于  $0.005$ ,灌丛和高寒草原的下降幅度比较平缓,变化斜率的绝对值小于  $0.001$ 。

### 3 结论与讨论

本文在前人研究的基础上进行了几个方面的改进。首先,从全球 Spot VEGETATION 产品免费分发网站上获取了 2009-01—2010-12 的逐旬 NDVI 数据共 72 景影像,进行了投影转换、范围裁剪、几何校正等预处理,对目前我国应用比较成熟的 1998-04—2008-12 逐旬 Spot VEGETATION NDVI 数据集进行了补充。其次,在排除非植被区域基础上,分不同植被类型分析了高寒地区植被生长对气候变化的响应特征,并建立相应的 NDVI 模拟模型,与以往区域尺度的整体 NDVI 研究相比,更细致地刻画了气候要素对植被变化的驱动机制。第三,通过分离气候要素和人类因素对 NDVI 的影响,对三江源生态保护与建设项目的实施效果进行了定量评估。

(1) 区域尺度上,三江源地区 2001—2010 年植被生长呈好转趋势,植被增长趋势与水热条件密切相关,从东南向西北递减。对三江源地区植被变化的动因,学术界上一直存在争论,焦点问题是人类因素与气候因素孰轻孰重<sup>[6,10-11]</sup>。本研究结论是,气候要素对 NDVI 的贡献达 79.32%,人类活动贡献占 21.68%,表明在 10a 的时间尺度上,气候变化是影响植被生长的决定性因素,气候暖湿化的趋势决定了三江源地区植被增长的方向,但人类的保护与治理行动可在短期内促进植被好转的速率。

(2) 三江源地区的植被变化对降雨和气温具有相当的敏感程度。年度尺度,  $NDVI_{max}$  与年降水和年均气温的相关系数分别为 0.71 和 0.69;季节尺度,植被生长受春季和秋季的气候条件影响最大,  $NDVI_{max}$  与春季的降水和气温相关系数均在 0.71 左右,与秋季降水和气温相关系数为 0.70 和 0.69;月尺度,植被长势主要受生长季前后一个月(4 月份和 10 月份)气候条件的控制,  $NDVI_{max}$  与 4 月份降水和气温的相关系数为 0.71 和 0.70,与 10 月份降水和气温的相关系数为 0.72 和 0.69。

该结论与陈琼等<sup>[12]</sup>、唐红玉等<sup>[13]</sup>等得到的三江源地区降水与植被覆盖负相关、降水不是植被生长的限制因子等结论存在分异。经初步分析,导致结论不一致的原因主要是统计的单位不一样,大部分学者研究三江源地区 NDVI 与气候要素的关系时,都是把整个研究区域作为计算单元,统计小样本的区域 NDVI 与降水在时间序列上的相关性,而本研究是以象元作为计算单元,统计大样本的 NDVI 与降水在空间分布上的相关性。以区域作为计算单元进行 NDVI 与降水的相关性分析可能存在以下问题:第一,没有考虑 NDVI 和降水的空间差异性。在统计年限比较有限情况下,显著的空间差异性可能会影响小样本的统计分析结果,掩饰了降水与 NDVI 之间的相关性。第二,没有考虑降水年内分配不均以及降水对植被影响的滞后性问题。由于降水在年内分配极不均匀,而高寒地区植被生长季较短,用年降水为变量进行降水与 NDVI 的关系分析,统计结果将受

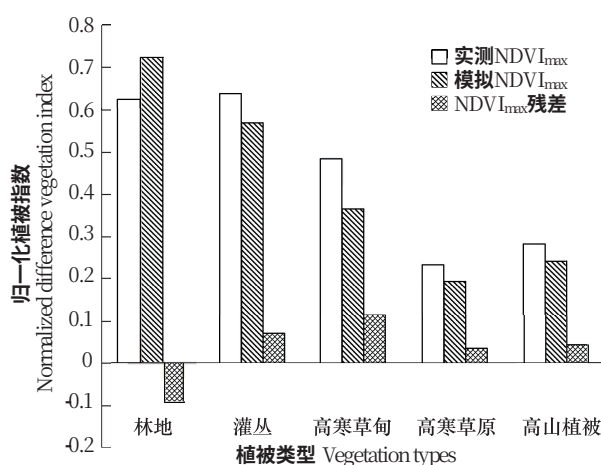


图 2 不同植被类型的实测  $NDVI_{max}$ 、模拟  $NDVI_{max}$  及  $NDVI_{max}$  残差

Fig. 2 Real  $NDVI_{max}$ , simulated  $NDVI_{max}$ , residual of  $NDVI_{max}$  of different vegetation types



到无效降水的影响,用生长季降水为变量进行降水与 NDVI 的关系分析,统计结果又会受到降水影响滞后性的干扰。第三,没有排除非植被区域的干扰。区域平均 NDVI 与降水的相关性统计分析结果将受到无植被覆盖区域 NDVI 值的影响。NDVI 是通过近红外波段和红色光波段的反射值运算得到的,而近红外波段为水体的强吸收区,在没有植被覆盖的区域,降水越丰沛,土壤湿度越大,NDVI 的值就会越小,严重干扰植被覆盖区域 NDVI 与降水之间相关统计结果。因此,排除无植被覆盖区域可以降低土壤湿度对 NDVI 的影响,从而更客观评价降水对植被生长的作用。

(3)不同植被类型对气候变化的响应特征存在差异,气候变化对高寒草地的影响远远大于林地和灌丛。高寒草甸的生长受水热条件控制最为明显,NDVI<sub>max</sub>与年降水和年均气温的相关系数分别为 0.65 和 0.60;季节尺度,高寒草甸生长主要受春、秋季气候条件的抑制,NDVI<sub>max</sub>与降水和气温的相关系数均在 0.60 以上。高寒草原在年尺度上对气温变化的敏感程度大于降水,NDVI<sub>max</sub>与气温和降水相关系数分别为 0.59 和 0.49;季节尺度上受春季的降水和气温影响最明显,相关系数分别达到 0.65 和 0.61。高山植被长势受降水的影响大于气温,年尺度上的相关系数为 0.53 和 0.48;季节尺度主要受春、秋季的降水和气温影响比较大。对于林地和灌丛,年尺度上降水的影响远远大于气温,季节尺度主要受春季降水和冬季气温的影响,NDVI<sub>max</sub>与春季降水相关系数分别为 0.42 和 0.48,与冬季气温相关系数分别为-0.24 和-0.13。

(4)在气候条件利好的情况下,近 10a 来三江源地区的人类活动对生态环境表现出正影响,实测 NDVI<sub>max</sub>与模拟 NDVI<sub>max</sub>之间的残差为 0.0863,表明生态保护与建设行动取得初步成效。生态措施的实施效果在空间上存在差异,黄河流域东部和长江流域通天河两侧的生态恢复效益最为明显,而在唐古拉山、昆仑山、布青山、阿尼玛卿山等山脉的周边地区,由于水热条件较差,不利于生态建设工程实施,人类活动对生态环境仍表现为负影响,生态环境呈持续退化趋势。按植被类型,高寒草甸的治理效果最好,人类活动对 NDVI 的贡献达 23.84%;林地的保护效果最差,NDVI<sub>max</sub>的残差为-0.0964,人类活动的破坏力度仍大于建设力度。从时间动态分析,人类活动对植被的正影响呈现出下降趋势,2001—2010 年 NDVI<sub>max</sub>残差的回归斜率为-0.0039,表明生态项目实施的短期行为严重,生态建设的效果缺乏长效性。如何将市场机制引入到三江源生态保护与建设中,建立政府项目的长期约束和监控机制势在必行。

## References:

- [ 1 ] Zhao X Q. Alpine Meadow Ecosystem and Global Change. Beijing: Science Press, 2009:309-335.
- [ 2 ] Qian S, Fu Y, Pan F F. Climate change tendency and grassland vegetation response during the growth season in Three-River Source Region. Science China:Earth Sciences, 2010, 53(10): 1506-1512.
- [ 3 ] Dai S, Li L. The characteristics of climate change in the Three-River Headwaters region from 1961 to 2009. Journal of Qinghai Meteorology, 2011, (1): 20-26.
- [ 4 ] Xu W X, Gu S, Zhao X Q. A far-reaching footprint of the Eastern Subtropical North Pacific SST variability on the summer rainfall over the Yellow River Loop//Proceedings of the 26nd Annual Conference of Chinese Meteorological Society. Hangzhou, 2009: 943-955.
- [ 5 ] Shao Q Q, Zhao Z P, Liu J Y, Fan J W. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years. Geographical Research, 2010, 29(8): 1439-1451.
- [ 6 ] Zhang Y L, Liu L S, Bai W Q, Shen Z X, Yan J Z, Ding M J, Li S C, Zheng D. Grassland degradation in the source region of the Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 3-14.
- [ 7 ] Liu L S, Zhang Y L, Bai W Q, Yan J Z, Ding M J, Shen Z X, Li S C, Zhang D. Characteristics of grassland degradation and driving forces in the source region of the Yellow River from 1985 to 2000. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(2): 131-142.
- [ 8 ] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters region in Qinghai Province. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(4): 364-376.
- [ 9 ] Yang Y H, Piao S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 1-8.
- [ 10 ] Bai W Q, Zhang Y L, Xie G D, Shen Z X. Analysis of formation causes of grassland degradation in Maduo County in the source region of Yellow River. Chinese Journal of Applied Ecology, 823-826.
- [ 11 ] Yang J P, Ding Y J, Chen R S. NDVI reflection of alpine vegetation changes in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(3): 468-478.
- [ 12 ] Chen Q, Zhou Q, Zhang H F, Liu F G. Spatial disparity of NDVI response in vegetation growing season to climate change in the Three-River

- Headwaters Region. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1284-1289.
- [13] Tang Y H, Xiao F J, Zhang Q, Shi J M. Vegetation change and its response to climate change in Three-River source region. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(4): 177-180.
- [14] Li S Y, Sun X Q. Research about analysis of the causes of ecological degradation of the pastoral areas in Qinghai: with the case study of the grassland degradation in the Three-River region. *Qinghai Prataculture*, 2009, 18(2): 19-23.
- [15] Ma M G, Veroustraete F. Interannual change trend of NDVI from 1981 to 2001 in the Heihe River Basin, China// *Proceedings of the 2nd International Vegetation User Conference*. Antwerp, 2004: 231-237.
- [16] Zhang Y L, Ding M J, Zhang W, Liu L S, Wang Z F, Yan J Z, Bai W Q, Zheng D. Spatial characteristic of vegetation change in the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River in China. *Geographical Research*, 2007, 26(3): 500-508.
- [17] Feng Y Z, Yang G H, Yang S Q, Wang D X. Definition on the source regions of Yangtze River, Yellow River and Lancang River. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest (Natural Science Edition)*, 2004, 32(1): 11-14.
- [18] Hou X Y. *Atlas of China Vegetation (Scale 1:1000000)*. Beijing: Science Press, 2001:1-280.
- [19] 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): 205-210.
- [20] Purevdorj T S, Tateishi R, Ishiyama T, Honda Y. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3519-3535.
- [21] Li H X, Liu S Z. A model of grassland degradation assessment based on NDVI-taking the grassland in Tibet as an example. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21(S1): 69-71.
- [22] Stow D A, Hope A, McGuire D, Verbyla D, Gamon J, Huemmrich F, Houston S, Racine C, Sturm M, Tape K, Hinzman L, Yoshikawa K, Tweedie C, Noyle B, Silapaswan C, Douglas D, Griffith B, Jia G S, Epstein H, Walker D, Daeschner S, Petersen A, Zhou L M, Myneni R. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 281-308.
- [23] Hope A S, Boynton W L, Stow D A, Douglas D C. Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(17): 3413-3425.
- [24] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [25] Cai X, Gu Z H, Chen J, Liu J, Shi P J. Analysis of human-induced steppe degradation based on remote sensing in Xilin Gole, Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 268-277.
- [26] Peng F, Wang T, Xue X. Study of human impact on vegetation in desertified regions based on rainfall use efficiency: a case study of Horqin region, Inner Mongolia. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(4): 896-901.

#### 参考文献:

- [1] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化. 北京: 科学出版社, 2009: 309-335.
- [3] 戴升, 李林. 1961—2009 年三江源地区气候变化特征分析. *青海气象*, 2011, (1): 20-26.
- [4] 徐维新, 古松, 赵新全. 气候持续变暖引起三江源地区植被出现阶段性变化新特点//第 26 届中国气象学会年会论文集. 杭州, 2009: 943-955.
- [5] 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 樊江文. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. *地理研究*, 2010, 29(8): 1439-1451.
- [6] 张懿铨, 刘林山, 摆万奇, 沈振西, 阎建忠, 丁明军, 李双成, 郑度. 黄河源地区草地退化空间特征. *地理学报*, 2006, 61(1): 3-14.
- [8] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.
- [9] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- [10] 摆万奇, 张懿铨, 谢高地, 沈振西. 黄河源区玛多县草地退化成因分析. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 823-826.
- [11] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录. *地理学报*, 2005, 60(3): 468-478.
- [12] 陈琼, 周强, 张海峰, 刘峰贵. 三江源地区基于植被生长季的 NDVI 对气候因子响应的差异性研究. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1284-1289.
- [13] 唐红玉, 肖凤劲, 张强, 史津梅. 三江源区植被变化及其对气候变化的响应. *气候变化研究进展*, 2006, 2(4): 177-180.
- [14] 李穗英, 孙新庆. 青海省三江源草地生态退化成因分析. *青海草业*, 2009, 18(2): 19-23.
- [16] 张懿铨, 丁明军, 张玮, 刘林山, 王兆锋, 阎建忠, 摆万奇, 郑度. 三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景. *地理研究*, 2007, 26(3): 500-508.
- [17] 冯永忠, 杨改河, 杨世琦, 王得祥. 江河源区地域界定研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(1): 11-14.
- [18] 侯学煜. *中国植被图集(1:100 万)*. 北京: 科学出版社, 2001: 1-280.
- [19] 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): 205-210.
- [21] 李辉霞, 刘淑珍. 基于 NDVI 的西藏自治区草地退化评价模型. *山地学报*, 2003, 21(S1): 69-71.
- [25] 曹鑫, 辜智慧, 陈晋, 刘晋, 史培军. 基于遥感的草原退化人为因素影响趋势分析. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 268-277.
- [26] 彭飞, 王涛, 薛娴. 基于 RUE 的人类活动对沙漠化地区植被影响研究——以科尔沁地区为例. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 896-901.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 19 October, 2011 (Semimonthly)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Ecology research and its effects on social development in China .....                                                                                                                 | LI Wenhua (5421)                                       |
| The current mission of ecology-advancing under the situation of chaos and innovation .....                                                                                            | JIANG Youxu (5429)                                     |
| Resilience thinking: development of ecological concept .....                                                                                                                          | PENG Shaolin (5433)                                    |
| A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China .....                                                               | LIU Shirong, WANG Hui, LUAN Junwei (5437)              |
| Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review .....                                                                                | YU Guirui, FANG Huajun, FU Yuling, et al (5449)        |
| Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale .....                                                           | LIU Lijuan, LI Xiaoyu, HE Xingyuan (5460)              |
| Research on the protection of <i>Davidia involucrata</i> populations, a rare and endangered plant endemic to China .....                                                              | CHEN Yan, SU Zhixian (5466)                            |
| Progress on water resources input-output analysis .....                                                                                                                               | XIAO Qiang, HU Dan, GUO Zhen, et al (5475)             |
| Research advances of contraception control of rodent pest in China ...                                                                                                                | LIU Hanwu, WANG Rongxin, ZHANG Fengqin, et al (5484)   |
| Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region .....                                                                  | LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie (5495)                 |
| Remediation of blowout pits by clonal plants in Mu Us Sandland .....                                                                                                                  | YE Xuehua, DONG Ming (5505)                            |
| Precipitation trends during 1961—2010 in the Loess Plateau region of China .....                                                                                                      | WANG Qixiang, FAN Xiaohui, WANG Mengben (5512)         |
| An evaluation method for forest resources sustainability .....                                                                                                                        | CUI Guofa, XING Shaohua, JI Wenyuan, et al (5524)      |
| Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of loess plateau in China: landscape-level and comparison at multiscale .....                                  | WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5531)           |
| The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade .....                                                                       | E Youhao, SHI Qian, MA Yuping, et al (5542)            |
| Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: standing stock value of biological resources .....                                                                        | DU Guoying, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5553)          |
| Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: provisioning service value .....                                                                                          | WANG Min, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5561)            |
| The dynamics of the structure and plant species diversity of evergreen broadleaved forests in Damingshan National Nature Reserve after a severe ice storm damage in 2008, China ..... | ZHU Hongguang, LI Yanqun, WEN Yuanguang, et al (5571)  |
| Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants .....                                                 | QIAO Zhenjiang, CAI Kunzheng, LUO Shiming (5578)       |
| The eco-efficiency evaluation of the model city for environmental protection in China .....                                                                                           | YIN Ke, WANG Rusong, YAO Liang, et al (5588)           |
| Pollution footprint and its application in regional water pollution pressure assessment: a case study of Huzhou City in the upstream of Taihu Lake Watershed .....                    | JIAO Wenjun, MIN Qingwen, CHENG Shengkui, et al (5599) |
| Ecological effect of green space of Shanghai in different spatial scales in past 20 years .....                                                                                       | LING Huanran, WANG Wei, FAN Zhengqiu, et al (5607)     |
| Assessing indicators of eco-mobility in the scale of urban communities ...                                                                                                            | DAI Xin, ZHOU Chuanbin, WANG Rusong, et al (5616)      |
| Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a case study in Changzhou City, China .....                                             | LI Feng, YE Yaping, SONG Bowen, et al (5623)           |
| The carbon emissions embodied in Chinese household consumption by the driving factors .....                                                                                           | YAO Liang, LIU Jingru, WANG Rusong (5632)              |
| The research on eco-efficiency and carbon reduction of recycling coal mining solid wastes: a case study of Huabei City, China .....                                                   | ZHANG Haitao, WANG Rusong, HU Dan, et al (5638)        |
| Effects of urban shading on photosynthesis of <i>Euonymus japonicas</i> .....                                                                                                         | YU Yingying, HU Dan, GUO Erhui, et al (5646)           |



|                                                                                                                                                                               |                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Ecological view of traditional rural settlements: a case study in Yonghan of Guangdong Province .....                                                                         | JIANG Xueting, YAN Lijiao, HOU Deqian (5654)            |
| The altitudinal pattern of insect species richness in the Three Gorge Reservoir Region of the Yangtze River: effects of land cover, climate and sampling effort .....         | LIU Ye, SHEN Zehao (5663)                               |
| Spatial-temporal patterns of fishing grounds and resource of Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) in the Southeast Pacific Ocean .....                          | HUA Chengjun, ZHANG Heng, FAN Wei (5676)                |
| Impacts of <i>Ambrosia artemisiifolia</i> invasion on community structure of soil meso- and micro- fauna .....                                                                | XIE Junfang, QUAN Guoming, ZHANG Jiaen, et al (5682)    |
| Appearance in spring and disappearance in autumn of <i>Bemisia tabaci</i> in China .....                                                                                      | CHEN Chunli, ZHI Junrui, GE Feng, et al (5691)          |
| Water use strategies of <i>Malus toringoides</i> and its accompanying plant species <i>Berberis aemulans</i> .....                                                            | XU Qing, WANG Haiying, LIU Shirong (5702)               |
| Analysis of vertical profiles of soil CO <sub>2</sub> efflux in Chinese fir plantation .....                                                                                  | WANG Chao, HUANG Qunbin, YANG Zhijie, et al (5711)      |
| Eco-toxicological effects of four herbicides on typical aquatic snail <i>Pomacea canaliculata</i> and <i>Crown conchs</i> .....                                               | ZHAO Lan, LUO Shiming, LI Huashou, et al (5720)         |
| Effects of short-term cold-air outbreak on soil respiration and its components of subtropical urban green spaces .....                                                        | LI Xibo, ZENG Wenjing, LI Jinqian, et al (5728)         |
| Effects of landscape pattern on watershed soil erosion and sediment delivery in hilly and gully region of the Loess Plateau of China: patch class-level .....                 | WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5739)            |
| Partitioning and mapping the sources of variations in the ensemble forecasting of species distribution under climate change: a case study of <i>Pinus tabulaeformis</i> ..... | ZHANG Lei, LIU Shirong, SUN Pengsen, et al (5749)       |
| Relationship between masson pine tree-ring width and NDVI in North Subtropical Region .....                                                                                   | WANG Ruili, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (5762)      |
| Effects of species composition on canopy rainfall storage capacity in an alpine meadow, China .....                                                                           | YU Kailiang, CHEN Ning, YU Sisheng, et al (5771)        |
| Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland .....                                                                          | XIONG Yuanqing, WU Pengfei, ZHANG Hongzhi, et al (5780) |
| Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China .....                                          | LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (5789)        |
| Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic Masson pine using mixed model .....                                                                        | FU Liyong, ZENG Weisheng, TANG Shouzheng (5797)         |
| Influence of fire on a <i>Pinus massoniana</i> soil in a karst mountain area at the center of Guizhou Province, China .....                                                   | ZHANG Xi, ZHU Jun, CUI Yingchun, et al (5809)           |
| The growth and distrubution of <i>Platyclusus orientalis</i> Seed-base seedling root in different culture periods .....                                                       | YANG Xitian, DONG Nalin, YAN Dongfeng, et al (5818)     |
| Effects of complex pollution of CTAB and Cd <sup>2+</sup> on the growth of Chinese sweetgum seedlings .....                                                                   | ZHANG Qin, XUE Jianhui, LIU Chenggang (5824)            |
| The influence of volatiles of three invasive plants on the roots of upland rice seedlings .....                                                                               | ZHANG Fengjuan, XU Xingyou, GUO Aiying, et al (5832)    |
| Age structure and regeneration strategy of the dominant species in a <i>Castanopsis carlesii</i> - <i>Schima superba</i> forest .....                                         | SONG Kun, SUN Wen, DA Liangjun (5839)                   |
| A study on application of hepatic microsomal CYP1A biomarkers from <i>Sebastiscus marmoratus</i> to monitoring oil pollution in Xiamen waters .....                           | ZHANG Yusheng, ZHENG Ronghui, CHEN Qingfu (5851)        |
| The method of measuring energy flow $\phi$ and $p$ in ecological networks by input-output flow analysis .....                                                                 | LI Zhongcai, XI Xudong, GAO Qin, et al (5860)           |

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

| 排序<br>Order | 期刊<br>Journal                           | 总被引频次<br>Total citation | 排序<br>Order | 期刊<br>Journal | 影响因子<br>Impact factor |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------|-----------------------|
| 1           | 生态学报                                    | 11764                   | 1           | 生态学报          | 1.812                 |
| 2           | 应用生态学报                                  | 9430                    | 2           | 植物生态学报        | 1.771                 |
| 3           | 植物生态学报                                  | 4384                    | 3           | 应用生态学报        | 1.733                 |
| 4           | 西北植物学报                                  | 4177                    | 4           | 生物多样性         | 1.553                 |
| 5           | 生态学杂志                                   | 4048                    | 5           | 生态学杂志         | 1.396                 |
| 6           | 植物生理学通讯                                 | 3362                    | 6           | 西北植物学报        | 0.986                 |
| 7           | JOURNAL OF INTEGRATIVE<br>PLANT BIOLOGY | 3327                    | 7           | 兽类学报          | 0.894                 |
| 8           | MOLECULAR PLANT                         | 1788                    | 8           | CELL RESEARCH | 0.873                 |
| 9           | 水生生物学报                                  | 1773                    | 9           | 植物学报          | 0.841                 |
| 10          | 遗传学报                                    | 1667                    | 10          | 植物研究          | 0.809                 |

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 19 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 19 2011

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>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           | 中国生态学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                         | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@csppg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>E-mail:journal@csppg.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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>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