

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

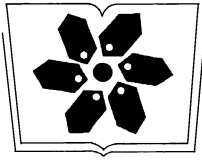
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **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 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 翀,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

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

DOI: 10.5846/stxb201111071684

苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475.

Su H X, Li G Q. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467-5475.

基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系

苏宏新, 李广起*

(中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 干旱是北京地区发生最频繁、波及面积最大、持续时间最长的一种自然灾害。基于 1868—2010 年每月的降水和平均气温数据, 应用综合了降水和气温变化共同效应的新的干旱指标标准化降水蒸散指数 (SPEI) 定量描述北京地区的干湿状况, 并利用历史旱灾记录对其进行验证; 采用连续小波转换 (CWT) 分析近 150 a 来的干旱振荡特征, 并利用交叉小波变换 (XWT) 探讨了干旱与大尺度气候因子之间的关系。结果表明: 1) SPEI 揭示的干旱与历史记录比较吻合, 证明该指数可以在多时间尺度上有效地反映北京地区旱涝程度及其持续时间; 2) 北京地区干旱具有 80—120 个月年际尺度和 250 个月、480 个月年代际尺度的周期振荡, 呈现了同大尺度气候因子相似的变化特征; 3) 北京干旱变化与四大气候因子存在着多时间尺度的显著相关性, SPEI 和北大西洋涛动 (NAO)、北极涛动 (AO)、太平洋涛动 (PDO) 都具有 100—120 个月和 250 个月的年代际主共振周期, 而 SPEI 和厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 在整个研究期内都表现出极显著的 32—64 个月年际主共振周期, 同时 SPEI 与 4 个气候因子在共振周期上均体现出比较明确的时滞特征 (2—6 月不等)。因此, 可以基于大尺度气象因子结合 SPEI 预测北京地区未来的干旱变化。

关键词: 气候变化; 干旱指数; 气候因子; 小波分析

Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing

SU Hongxin, LI Guangqi*

State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Drought occurs in nature when precipitation is significantly lower than normal. When lasting many months or even years in a large area, drought will develop into a natural hazard that permanently damages the environment and causes great economic losses. Thus, improving our knowledge about the variability and impacts of drought is fundamental to quantify the drought hazard and improve the prediction and drought mitigation. Beijing is located in the middle and lower reaches of Haihe River Basin, which belong to a temperate continental monsoon climate zone. The precipitation distribution is very uneven, and often accompanied by high temperature. So drought is one of the most frequently and enduring natural hazard that influences most area in Beijing, north China. In this paper, we analyzed the variability and possible teleconnections between drought occurrences and large-scale climate indices between 1868—2010 in Beijing, such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO), North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO), and Pacific Decadal Oscillation (PDO). The drought occurrences were quantified by a new drought index, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) based on the data of monthly mean temperature and precipitation. The SPEI considers not only precipitation but also temperature data by means of evapotranspiration in calculation, allowing for a more complete approach to explore the effects of climate changes on drought occurrences under global warming. The SPEI can also be

基金项目: 国家自然科学基金 (30900188)

收稿日期: 2011-11-07; 修订日期: 2012-05-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lgqmvp@gmail.com

calculated at several time scales to adapt to the critical times of responses to drought in target natural and economic systems and to determine their resistance to drought. Local historical drought hazard records in Beijing since 1868 were used to improve the validation of SPEI. We then used the method of continuous wavelet transform (CWT) to analyze inter-decadal and decadal oscillation in the time and frequency of drought. Finally, we analyzed the correlations between SPEI and four large scale climate indices through the cross wavelet transform (XWT). The good agreement between SPEI and historical drought records proves that SPEI can effectively reflect the intensity and duration of drought in multi-temporal dimension in this region. SPEI of Beijing had 80—120 month, 250 month, and 480 month oscillation circles, which was similar to the pattern of the four large-scale climate indices. The significant coherence was found between SPEI and the four large-scale climate indices. There were the common patterns of 100—120 month decadal and 250 month inter-decadal oscillation circles between SPEI and NAO, AO, PDO, as well as a common pattern of 32—64 month inter-decadal oscillation circle between SPEI and ENSO during the whole period. There was a clear lag time (2—6 months) during the coherence circle. Therefore, we can forecast the future drought variations in Beijing based on the data of large scale climate indices and SPEI, which is useful for water resources management and agriculture. This article is an initial step to application of the new multi-scalar SPEI drought index in studying the drought variability and impacts in China.

Key Words: climate change; drought index; climate indices; wavelet analysis

干旱是指某一地区长期无降水或降水异常偏少或高温少雨的气候背景下,水分供求严重不足的一种自然现象,当它持续一段相当长时间(如几个月,甚至一年、几年)并波及较大空间范围时,干旱便成为一种自然灾害^[1]。近年来,随着全球气候变暖的不断加剧,干旱事件也呈现明显的上升趋势,不但给经济发展特别是农业生产等带来巨大的损失,还会造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多不利的生态影响^[2]。因此,定量研究干旱动态特征及其形成机制具有重要的现实意义。

干旱定义和计量指标的研究历史久远且已硕果累累,但大多数干旱指标都是针对具体的研究目的而设定的,具有明显的地域性和特定的时间尺度^[3]。目前,帕默尔干旱指标(Palmer drought severity index, PDSI)^[4]和标准化降水指标(Standardized precipitation index, SPI)^[5]是全球和区域干旱过程的监测与分析中应用最为广泛的两个计量指标。PDSI是基于地表水分平衡原理的干湿指标,其计算过程复杂、参数区域性较强(如需每个网格单元土壤湿度的取值,常因观测资料缺乏而引起很大的不确定性),且具有固定的时间尺度,这些都使它的应用受到一定的限制;而SPI只需要降水作为输入量,计算简单易行且具有多时间尺度的特性,使得用同一个干旱指标反映不同时间尺度和不同方面的水资源状况成为可能^[3]。但是,在全球变化背景下,气温的升高已成为加剧干旱过程的重要因子之一^[6],对干旱状况的客观表征需要综合降水和气温变化的共同效应。为此, Vicente-Serrano 等人^[7]在SPI基础上,提出了一个新的气候干旱指数:标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)。该指数基于降水和温度数据,有机地集成了PDSI对蒸发需求变化(温度波动和趋势所造成)的灵敏性和SPI的计算简单和多时空的自然属性,是监测干旱化及研究增温影响干旱化过程较为理想的工具^[8]。在干旱形成机理方面,过去的研究主要集中在局地陆气相互作用对干旱形成的相对贡献等问题,但现在人们已意识到全球海洋温度的变化或大尺度气候因子(如受厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)、太平洋涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)等)在年代际尺度上对干旱形成的作用可能至关重要^[3, 6]。

北京地处海河中下游,属温带大陆性季风气候区。降水年际、年内分配极不均衡,而且经常伴随着高温。因此干旱已成为北京地区发生最频繁、波及面积最大、持续时间最长的一种自然灾害。据不完全统计,从公元1271—2000年期间,北京地区发生的干旱年数为386 a,其中大旱达到149 a^[9]。近年来的降水减少而气温升高进一步加剧了北京地区水资源环境的恶化,干旱问题日趋严重,未来的干旱状况及水资源匮乏已成为人们普遍关心的问题^[10]。那么,北京的干旱是否也受大尺度气候因子的控制呢?黄嘉佑^[11]发现北京旱涝状况与

太平洋地区海温冷暖关系密切。刘桂莲和张明庆^[12]证明了北京气候与厄尔尼诺(El Niño)/拉尼娜(La Nina)事件具有显著的相关性。另外,NAO^[13]和北极涛动(Arctic Oscillation, AO)^[14]也对北京气候及旱涝状况具有一定的影响。但这些研究主要关注大尺度气候因子对局地各气候分量(如降水、温度等)的影响,缺乏反映综合气候效应的干旱指标,也缺乏对不同大尺度气候因子与北京干湿变化关系的系统认识。

本文应用新的干旱指数 SPEI 来综合表征北京地区 1868 年以来的干旱状况并利用历史记录资料对其进行验证;基于连续小波转换(continuous wavelet transform, CWT)在时频域中分析较长时间 SPEI 序列的年际代振荡特征的基础上,采用交叉小波变换(cross wavelet transform, XWT)探论北京干旱状况与四大气候因子(NAO, AO, PDO, ENSO)之间的多时间尺度相关关系,为未来的干旱状况客观评估和准确预测提供参考依据。

1 数据资料和研究方法

1.1 数据来源

本文所用每月的降水和平均气温数据主要有两个来源:1868—1950 年资料来自北京市气象局根据历史记载整编的《北京气候资料(一)》^[15];1951—2010 年资料直接采用由中国气象局国家气候中心提供的北京站(39°48'N, 116°28'E, 31.3 m)观测数据。

NAO 采用李建平等^[16]提出的指数,1873 年以来逐月数据来自 <http://web.lasg.ac.cn/staff/ljp/data-NAM-SAM-NAO/NAO.htm>。同样,1873 年以来逐月 AO 指数^[17]来自于 <http://web.lasg.ac.cn/staff/ljp/data-NAM-SAM-NAO/NAM-AO.htm>。PDO 采用 Mantua 等^[18]提出的指数,1900—2010 年逐月数据取自于 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>。ENSO 现象的相位和强度则采用多元 ENSO 指数(Multivariate ENSO Index, MEI)^[19]来表征,逐月数据为相邻两个月滑动平均值,1871 年以来数据来自 <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/>,相应地在本文相关分析中对应的 SPEI 数据为 2 个月尺度的逐月指数。

1.2 研究方法

基于 1868 年以来每月的降水和平均气温数据分别计算不同时间尺度 SPEI(包括相对短期的 1、2、3、6 个月和相对长期的 12、24、48 个月,分别用 SPEI1、SPEI3、SPEI6、SPEI12、SPEI24、SPEI48 表示),利用长期大量以灾情事实为准的详实干旱历史记录资料,检验其综合表征不同时间尺度干旱状况的能力。SPEI 计算程序软件来自 <http://digital.csic.es/handle/10261/10002>,具体计算过程主要分为 4 个步骤^[7]。

1) 计算气候水平衡:

$$D_i = P_i - PET_i$$

式中, P_i 为降水, PET_i 为潜在蒸发量,通过 Thomthwaite 方法求得;

2) 建立不同时间尺度气候学意义的水分盈/亏累积序列:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}), n \geq k$$

式中, k 为时间尺度(月), n 为计算次数;

3) 采用三参数的 log-logistic 概率密度函数拟合所建立的数据序列:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2}$$

式中, α 为尺度参数, β 为形状参数, γ 为 origin 参数,这些参数可通过 L-矩参数估计方法求得。于是,给定时间尺度的累积概率可计算如下 $F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1}$ 。

4) 对序列进行标准正态分布转换,获取相应 SPEI:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}, \quad W = \sqrt{-2 \ln(P)}$$

当 $P \leq 0.5$ 时, $P = 1 - F(x)$; 当 $P > 0.5$ 时, $P = 1 - P$, SPEI 的符号被逆转。其它常数项分别为 $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

经验证的 SPEI 与四个大尺度气候因子分别通过连续小波转换,在时间域和频率域上展开,分析其多尺度频率结构和时域变化特征。最后,应用交叉小波变换探讨北京干旱状况与各气候因子之间的联合统计特征^[20]。本文所用的小波分析计算程序都来自 <http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence/>。

2 结果与分析

2.1 SPEI 验证:表征干旱的多尺度特征

从图 1 可以看出,不同时间尺度的 SPEI 值随时间变化的敏感性明显不同,时间尺度越小,干湿变化越显著,其值会发生较大变化,甚至是正负波动。相反,时间尺度越大则干湿交替转换越平缓,只有持续的多次降水或无雨、高温等才会使之发生转变,而这对于监测长时期的干旱状况是合理的^[7]。SPEI 表征干旱多时间尺度特性的能力为其在北京地区的推广应用奠定了良好基础。

据史料记载,北京地区干旱发生的频率极高,且经常旱涝交替出现^[9]。SPEI1 和 SPEI3 因为对于短期降水和温度变化都比较敏感,其数值波动性较大(图 1),充分体现了北京这种相对短期旱涝无常、频繁的特性。北京重大旱灾年比重大,干旱持续时间达半年(如 SPEI6,图 1)的干旱发生频率也比较高,尤其在 1920—1954 年和 1980—2010 年。另外,北京地区有连续数年甚至十年以上年年干旱的特点,如 1898—1900 年 3 a 连旱、1920—1923 年 4 a 连旱、1970—1972 年 3 a 连旱等。1980—1982 年旱灾的干旱范围超出北京地区,波及到华北大部分地区。其中北京旱情最为严重,官厅、密云两大水库年平均来水量仅占多年平均天然径流量的 39%。而 1999—2010 则是建国以来最严重的连续干旱年,水库水位急速下降,河道大多干枯,地下水位急剧下降^[9]。SPEI24 和 SPEI48 在这 5 个时期内持续保持较大的负值,与历史记录中北较大规模的连续干旱有极好的对应关系(图 1)。由此可见,多时间尺度的 SPEI 能够清楚地反映不同方面的干湿演变与可获得水资源状况:SPEI1 主要受每月的水分和气温变化的影响,可以准确地反映土壤水分状况,可用于适时排水灌溉和保

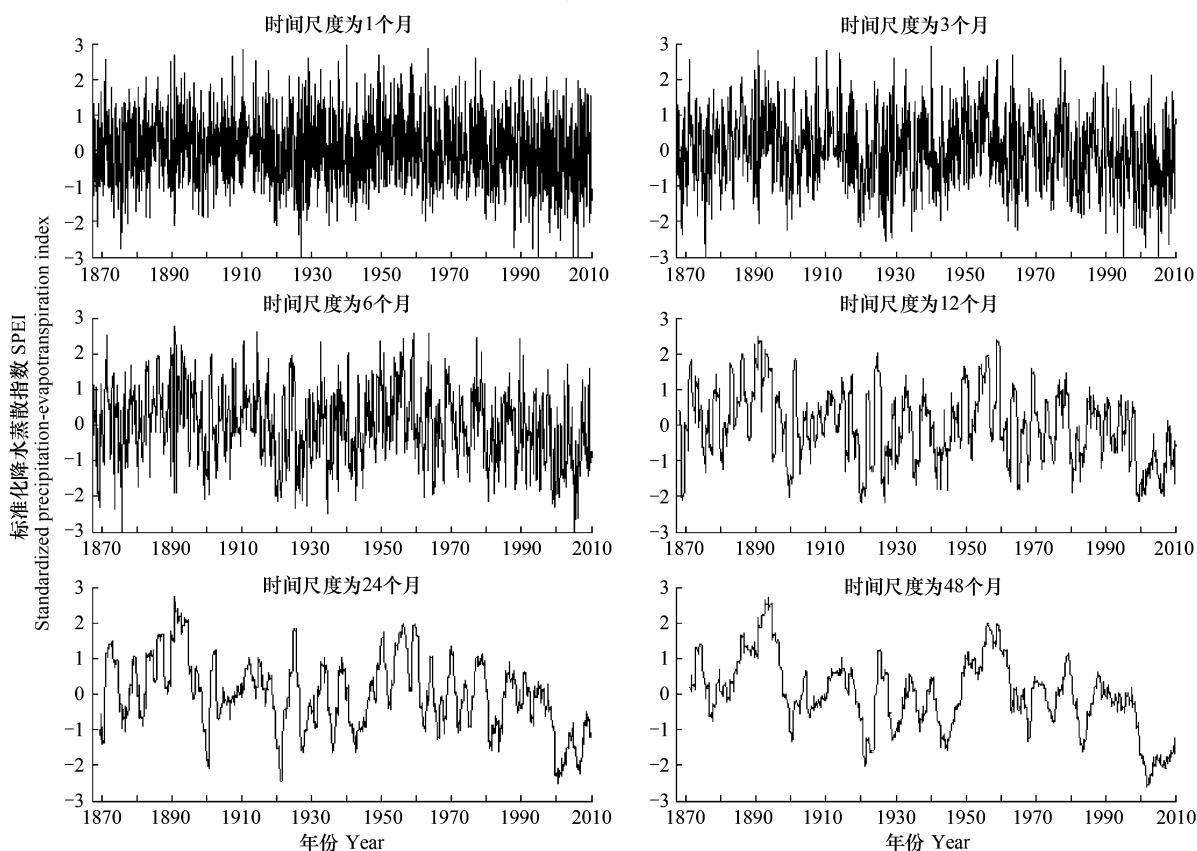


图 1 北京多时间尺度标准化降水蒸散指数长期动态特征

Fig. 1 Long-term dynamic characteristics of multi-time scale Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) in Beijing

证农业生产;SPEI6 和 SPEI12 对于下层土壤水分和河流径流量等有较好地反映;SPEI24 和 SPEI48 则更深入地涉及到地下水位、水库蓄水量及其民生问题。综上所述,多时间尺度的 SPEI 值可以有效地反映北京地区旱涝程度及其持续时间。

2.2 基于连续小波转换的干旱和气候因子振荡特征

北京地区干旱指数和 4 个大尺度气候因子在不同时域中都表现出不同显著性水平的各种振荡周期(图 2)。

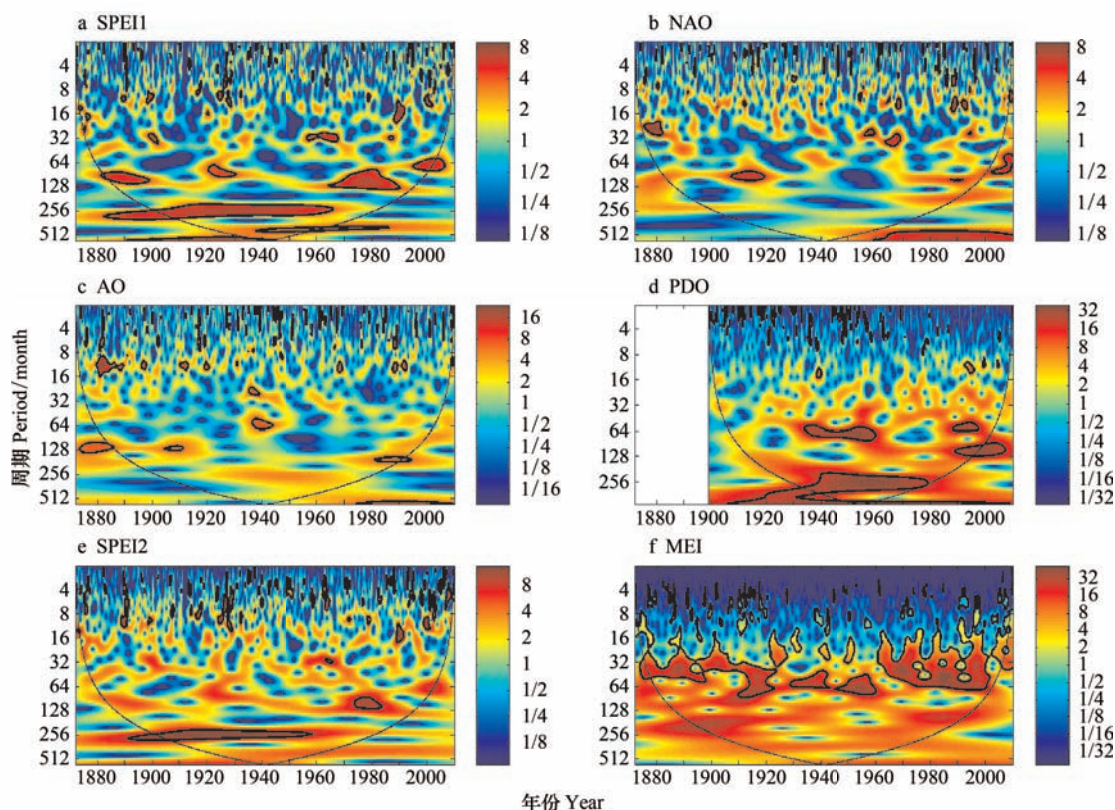


图 2 连续小波转换功率谱 (a) SPEI1, (b) NAO, (c) AO, (d) PDO, (e) SPEI2, 和 (f) MEI

Fig. 2 Continuous wavelet power spectrum of (a) SPEI1, (b) NAO, (c) AO, (d) PDO, (e) SPEI2, and (f) MEI

图中黑色细实线为小波边界效应影响锥,粗黑实线表示通过置信水平为 95% 的红噪声检验

PDO 在 1935—1960 年,1990—2000 年显示出 64—90 个月尺度的年际变化;它在 1935—1980 年期间还表现出很强的 200—250 个月尺度的主振荡周期。此外,在 2—6 月的谱能量通过了显著性检验,但仅仅出现峰值,维持期太短,为一种间歇性的准周期振荡。在其它频段上,小波功率谱能量都比较小,没有通过显著性检验(图 2d)。相对而言,NAO 和 AO 表现出的周期信号较 PDO 弱,其中 NAO 在 1910—1920 年显示出 80 个月尺度的年际变化(图 2b),而 AO 仅在 1940 年代表现出 64 个月尺度的振荡周期(图 2c)。SPEI1 在 1882—1898 年,1920—1932 年,1965—1991 年都显示出 80—120 个月尺度的年际变化,在 1900—1967 年表现出极强的 250 个月的年代主振荡周期,体现了和 PDO 相似的周期变化信息,同时在 1938—1967 年还表现出极强的 480 个月尺度的振荡周期(图 2a)。表征 ENSO 的 MEI 在 1920 年之前和 1960 年以后呈现年际(16—70 个月)振荡幅度较大,期间的振荡相对平稳,尽管没有达到显著水平,MEI 在 1890—1930 年和 1970—1990 年还显示了相当强度的年代际振荡(180—250 个月)(图 2f)。这与 SPEI2 的时频特征比较接近,只是 SPEI2 在相当长的一段时间内 180—250 个月的主振荡周期达到极显著水平(图 2e)。此外,MEI 和 SPEI2 在 3—12 月的谱能量也都通过了显著性检验,但仅仅出现峰值,维持期太短,为一种间歇性的准周期振荡。以上结果表明:北京干旱指数与大尺度气候因子在一定时段存在着相似的周期变化,尤其是 SPEI 和 PDO、MEI。但连续小波转换

只是针对单个因子单独进行时频变化模式分析,两个变量之间周期的相似性没有经过统计检验,是否仅是一种巧合还需要验证。因此,需要采用交叉小波变换进一步分析它们之间的共同信号。

2.3 北京干旱与气候因子的关系

交叉小波变换重点突出北京干旱变异与各大尺度气候因子在时频域中高能区相互关系(图3)。从图3a中看出,SPEI和NAO通过显著性检验的80—100个月共振周期主要表现在1882—1895,1916—1925和1970—1992年,两序列在此频段上表现出稳定的反位相显著共振关系,即显著负相关关系;250个月共振周期主要表现在1902—1950年,平均位相角接近垂直向上 90° ,SPEI显著地延后于NAO。此外,在高频段,两序列的交叉小波能量强度也时有通过显著性检验,但维持时间过短且其位相关系随时频域变化差异较大,没有形成稳定的相关关系。图3b显示,SPEI和AO在1885—1917,和1982—1995年具有显著的100—120个月共振周期;250个月主共振周期主要表现在1910—1968年,SPEI与AO呈正相关,滞后2个月(平均位相角约 60°)。此外,在2—16个月频段,两序列的交叉小波能量强度也时有通过显著性检验,但维持时间过短且其位相关系随时频域变化差异较大,没有形成稳定的相关关系。SPEI和PDO年际共振周期(100—120个月)主要表现在1965—1995年;而年代主共振周期(250个月)则主要表现在1927—1978年,SPEI与PDO呈负相关,同时有1—2月的滞后(平均位相角约 45°)(图3c)。SPEI和MEI在整个研究期内都表现出极显著的年际(32—64个月)主共振周期;与此同时,也几乎所有年份都表现出较强的反位相的250个月共振周期,即呈现完全相反的变化模式,但没有通过显著性检验(图3d)。

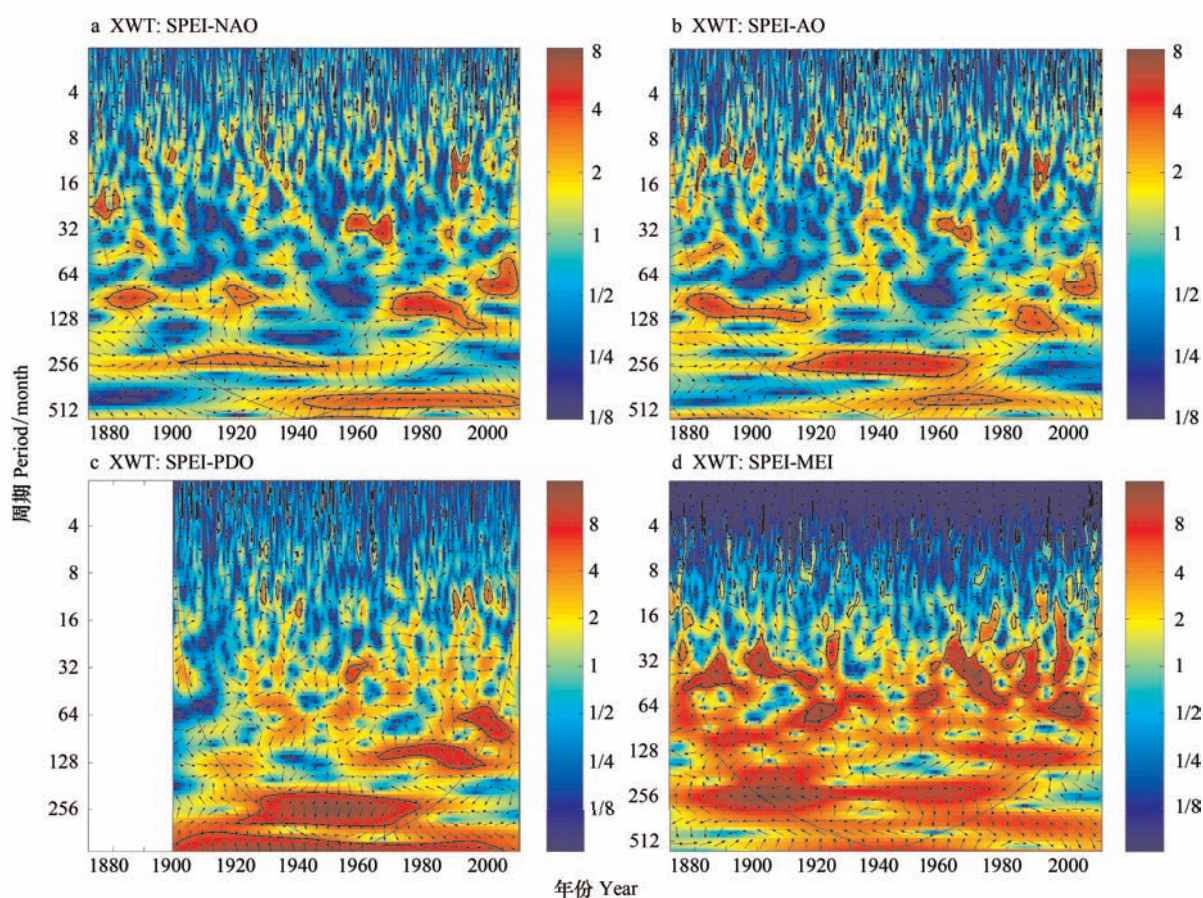


图3 交叉小波功率谱 (a) SPEI和NAO, (b) SPEI和AO, (c) SPEI和PDO, (d) SPEI和MEI

Fig. 3 Cross wavelet transform of (a) SPEI and NAO, (b) SPEI and AO, (c) SPEI and PDO, (d) SPEI and MEI

图中黑色细实线为小波边界效应影响锥,粗黑实线表示通过置信水平为95%的红噪声检验;←表示反位相变化,→表示同位相变化,↓表示位相提前 90° ,↑表示落后 90°

3 讨论

北京作为中国首都,具有无可替代的地位。伴随着经济的发展,由于干旱所造成的人民生命财产损失不断增长与水资源匮乏已经成为妨碍北京城市发展的瓶颈。本文通过对北京地区近 150 a 干湿状况变化的连续小波转换分析,结果表明该地区干旱具有 80—120 个月,250 个月和 480 个月尺度的主振荡周期(图 2)。这与北京地区近 300 a 来年降水量的主周期(21、35 和 85 a 左右)基本相符^[21],说明降水是北京地区干旱最为核心的局地控制因子。虽然,干旱指数序列仍然无法识别出 85 a 左右的主振荡周期,但至少能捕捉 40 a 周期,这充分体现了长时间序列数据对干旱长期演变规律研究的必要性和优越性。

大气涛动是控制一个地区的大气环流机制,研究气候干旱变化与大气涛动的相互关系有助于认识区域干旱变化的特征和形成机制。本文的交叉小波变换(图 3)显示北京干旱与 4 大涛动确实存在年际和年代际尺度显著共振周期,只是不同频率上的相关显著性和不同时段中的相关阶段性又存在明显差异。这至少说明大尺度的气候因子作为外部驱动力影响降水和气温变化是北京地区干旱发生年际和年代际变化的重要原因之一。具体来讲,NAO 是北大西洋地区大气最显著的模态,反映的是亚速尔高压和冰岛低压之间的反向变化关系,除年际变率外,NAO 具有明显的年代际尺度变率,包括 20a 左右的周期和 50—70 a 左右的周期^[22]。从图 2b 中可以看出,除了 80 个月尺度的年际变化外,NAO 在 1960—2010 年之间也表现出极强的 512 个月的振荡周期。进一步分析发现 SPEI 和 NAO 显著负相关关系,当发生一次强的 NAO(正高值)时,北京地区随后几年到 20a 都有可能持续发生严重干旱事件(图 3a),这与符淙斌和曾昭美^[13]的研究结果是相一致的。

AO 是北半球中高纬度大气环流低频变化的主要模态,不仅对北半球许多地方季节内的气候变化产生影响,而且对其年际以及年代际尺度的气候变化均具有重要作用^[23]。本文分析结果表明,北京干旱变化与 AO 之间存在着多时间尺度的显著相关振荡,年代际尺度周期的相关系数明显大于年际尺度周期的相关系数,时段中小波互相关系数的分布具有明显的阶段性特征,说明北极涛动的年际和年代际异常对北京气候干旱变化具有显著影响(图 3b)。而且,在年代际尺度上,两者表现出明显的正相关关系,而龚道溢和王绍武^[24]的研究同样表明:当 AO 指数偏强时,我国大部分地区冬季降水偏多,同时气温也偏高,但其共同效应使得干旱得到某种程度缓解。

PDO 是一种类似于 ENSO 型的具有长生命史的太平洋年代际振荡现象,反映的是热带中东太平洋和北太平洋中纬度海洋表面温度异常^[25]。PDO 既有显著的年际特征,也有极强的年代际振荡周期(图 2d),同时与北京干旱状况具有很好的对应关系(图 3d),暖位相对应高温和少雨,温度升高引起和加剧了区域干旱化趋势^[25]。

ENSO 是指热带太平洋的厄尔尼诺和热带大气南方涛动两方面相互耦合,是赤道太平洋地区乃至全球范围内最强的年际气候变率的自然信号之一^[26]。ENSO 是影响我国温度变化和夏季降水异常的主要因子之一,其发展年夏季我国东部以雨量偏少为主^[27-28]。本文对 1871—2010 年近 150 a 每月 MEI 进行分析,结果表明除了显著的年际特征外,MEI 还显示了相当强度的年代际振荡(180—250 个月)(图 2 f)。SPEI 与 MEI 的相关性主要体现在年际尺度(32—64 个月),ENSO 对北京干旱较短年际周期交替起到非常关键的作用(图 3d),这与先前的刘桂莲和张明庆^[12]的研究相符:每次强大 El Niño 事件发生后,北京地区往往降水减少,气温年较差增大,气候持续干旱;而当 LaNiña 事件发生后,北京地区往往降水增加,气温年较差减小,气候趋向滋润。与此同时,SPEI 与 MEI 在年际尺度(250 个月)也表现出较为强烈的共振周期,相位相反,呈负相关关系,只是没有通过显著性检验(图 3d)。ENSO 循环不仅仅是年际气候变化的最强信号,它也影响气候的年代际变化。因此,今后应加强研究 ENSO 年代际尺度变率及其对低频气候干旱的可能影响。

4 结论

本文引入了综合降水和气温变化共同效应的一个新气候干旱指数 SPEI,它集合了 PDSI 对温度波动的灵敏性和 SPI 的计算简单、多时间尺度的自然属性。经过与北京历史数据的对比验证表明,SPEI 可以在多时间尺度上有效地反映北京地区旱涝程度及其持续时间,是研究该地区干旱化过程较为理想的工具。通过对近

150 a SPEI 序列的连续小波转换分析发现北京地区干旱现象有显著的年际(80—120 个月)和年代际(250 个月和 480 个月)振荡周期特征。交叉小波变换分析表明:1)北京地区的干旱与 4 个大尺度因子都具有 250 个月的年代际主共振周期,其中 SPEI 与 PDO、AO 的相关性最显著;2)北京地区的干旱与 4 个大尺度因子都具有 100—120 个月的年际共振周期,其中 1920 年之前 SPEI 与 AO 相关显著、1960 年之后 SPEI 与 PDO、NAO 显著相关;3)SPEI 和 ENSO 在整个研究期内都表现出极显著的 32—64 个月较短年际主共振周期;4)SPEI 与 AO 主要呈滞后的正相关关系、与 PDO 主要呈滞后的负相关关系、以及与 MEI 的负相关关系,据此可以基于大尺度气象因子预测北京地区未来的干旱变化。

总之,北京地区干旱比较短的年际周期主要受 ENSO 影响,较长的年际和年代周期主要受 PDO 和 AO 影响,NAO 的影响稍弱。但干旱事件的发生及其持续是大尺度气候因子与局地陆气相互作用等多因子综合作用的结果。因此,关于北京地区干旱的发展维持与成因尚需深入研究。

References:

- [1] Redmond K T. The depiction of drought: a commentary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1143-1147.
- [2] Dai A G. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900—2008. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D12115, doi: 10.1029/2010JD015541.
- [3] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [4] Palmer W C. *Meteorological Drought*. Washington DC: Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- [5] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim: American Meteorological Society, 1993: 179-184.
- [6] Dai A G. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2(1): 45-65.
- [7] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [8] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I, Angulo M, El Kenawy A. A new global 0.5° gridded dataset (1901—2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [9] Wen K G, Xie P. *China Meteorological Disaster Ceremony (Beijing Coils)*. Beijing: Meteorology Publish House, 2005.
- [10] Huang Q X, He C Y, Shi P J, Zhao Y Y, Yang Y. Modeling water resources carrying capacity change under stress of drought and socioeconomic development in Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(5): 859-870.
- [11] Huang J Y. Long-term variations of seasonal dryness/wetness in Beijing. *Advances in Water Science*, 1992, 3(1): 59-64.
- [12] Liu G L, Zhang M Q. Correlation analysis between El Niño/La Nina phenomenon during the recent 100 years and Beijing climate. *Meteorological Monthly*, 2001, 27(2): 3-6.
- [13] Fu C B, Zeng Z M. Correlations between North Atlantic Oscillation index in winter and eastern China flood/drought index in summer in the last 530 years. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21): 2505-2516.
- [14] Xu G Y, Ma X Q. Influence analysis of Arctic Oscillation on extreme cold events in Beijing. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2011, 34(2): 39-43.
- [15] Beijing Meteorological Bureau. *Beijing Climate Data 1941—1980*. Beijing, 1982.
- [16] Li J P, Wang J X L. A new North Atlantic Oscillation index and its variability. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 661-676.
- [17] Li J P, Wang J X L. A modified zonal index and its physical sense. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1632, doi: 10.1029/2003GL017441.
- [18] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(6): 1069-1080.
- [19] Wolter K, Timlin M S. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index // *Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop*. Norman, 1993.
- [20] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [21] Li M, Xia J, Chen S M, Meng D J. Wavelet analysis on annual precipitation around 300 years in Beijing Area. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(6): 1001-1011.

- [22] Luterbacher J, Schmutz C, Gyalistras D, Gyalistras D, Xoplaki E, Wanner H. Reconstruction of monthly NAO and EU indices back to AD 1675. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(17): 2745-2748.
- [23] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [24] Gong D Y, Wang S W. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 559-568.
- [25] Ma Z G, Shao L J. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decade oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(3): 464-474.
- [26] Alexander M A, Bladé I, Newman M, Lanzante J R, Lau N C, Scott J D. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate*, 2002, 15(16): 2205-2232.
- [27] Wu B, Zhou T J. Oceanic origin of the interannual and interdecadal variability of the summertime western Pacific subtropical high. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L13701, doi: 10.1029/2008GL034584.
- [28] Wang B, Liu J, Yang J, Zhou T J, Wu Z W. Distinct principal modes of early and late summer rainfall anomalies in East Asia. *Journal of Climate*, 2009, 22(13): 3864-3875.

参考文献:

- [9] 温克刚, 谢璞. 中国气象灾害大典 (北京卷). 北京: 气象出版社, 2005.
- [10] 黄庆旭, 何春阳, 史培军, 赵媛媛, 杨洋. 气候干旱和经济发展双重压力下的北京水资源承载力变化情景模拟研究. *自然资源学报*, 2009, 24(5): 859-870.
- [11] 黄嘉佑. 北京地区季节旱涝长期变化分析. *水科学进展*, 1992, 3(1): 59-64.
- [12] 刘桂莲, 张明庆. 近百年 El Niño/La Nina 事件与北京气候相关性分析. *气象*, 2001, 27(2): 3-6.
- [13] 符淙斌, 曾昭美. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系. *科学通报*, 2005, 50(14): 1512-1522.
- [14] 许国宇, 马晓青. 北极涛动对冬季北京极端低温事件的影响分析. *气象与环境科学*, 2011, 34(2): 39-43.
- [15] 北京市气象局. 北京气候资料 1941—1980(一). 北京, 1982.
- [20] 李森, 夏军, 陈社明, 孟德娟. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析. *自然资源学报*, 2011, 26(6): 1001-1011.
- [23] 龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响. *地理学报*, 2003, 58(4): 559-568.
- [24] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. *大气科学*, 2006, 30(3): 464-474.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 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