

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **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 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨 健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨 柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩 磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏 岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍 昊, 王 笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜 林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王 琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑 燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹 雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金 川, 王金旺, 郑 坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张 萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷 伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王 鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠 腾, 李 蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流域河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄 玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷 燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王 娜, 邵 晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常 亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李 芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖 强, 胡 翀, 肖 洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹 科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温 腾, 徐德琳, 徐 驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石 蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾 伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态系统研究·····	杨卓翔, 高 阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一,它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧,延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中,海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下,来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升,给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时,山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布,翠峰直插云霄,森林茂密苍郁,溪流碧澄清澈,奇花异葩繁多,风景美如画卷,气势壮丽非凡。

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

DOI: 10.5846/stxb201105090603

刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 徐华山. 流域环境要素空间尺度特征及其与水生生态分区尺度的关系——以辽河流域为例. 生态学报, 2012, 32(11): 3613-3620.

Liu X C, Xu Z X, Zhang S R, Xu H S. Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3613-3620.

流域环境要素空间尺度特征及其与 水生生态分区尺度的关系 ——以辽河流域为例

刘星才^{1,2}, 徐宗学^{1,*}, 张淑荣¹, 徐华山¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 指标体系构建是流域水生生态分区技术框架中的一项重要内容。目前提出的指标体系尚缺乏一定的科学理论支持, 如所选指标的生态尺度与各级分区大小之间的对应关系。生态学研究认为, 不同尺度上的生态过程和格局不同。以辽河流域为例, 对影响水生生态系统的几个大尺度环境要素(降水、地形和植被)的空间尺度特征进行分析, 得出了各要素空间变异最为显著的尺度。其中, 降水的空间尺度约为 75 km, 地形要素和指标均大致存在 16 km、32 km、64 km 和 128 km 多个景观特征尺度。在界定水生生态一、二级分区范围基础上, 讨论了各环境要素作为水生生态一、二级分区指标的适用性, 以期为辽河流域水生生态分区指标选取提供一定科学依据, 同时希望能为其他流域提供一定参考。

关键词: 辽河; 环境要素; 尺度; 水生生态分区; 指标

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin

LIU Xingcai^{1,2}, XU Zongxue^{1,*}, ZHANG Shurong¹, XU Huashan¹

1 Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China

Abstract: Aquatic ecoregion is the basis for the management of watershed environment in China. Indicators for ecoregion zoning are important for the framework of aquatic ecoregion framework. Several indicators for ecoregion zoning have been proposed in the previous studies. However, most of those indicators lack theoretical basis. For example, how to determine the characteristic scales of environmental factors and link it to a given level ecoregion are not investigated thoroughly. In order to address this issue, scale analysis on topography (DEM and slope) and vegetation is made by using scale variance analysis (SV) method, and precipitation data by the scale covariance methods (SC). Scale variance analysis is a method to detect spatial scales where significant spatial heterogeneity exists for raster data. Boxes are selected for scale variance analysis with the size of 2×2, 4×2, 4×4, 8×4, 8×8, 16×8, 16×16, 32×16, 32×32, 64×32, 64×64, 128×64, 128×128, 256×128, 256×256, 530×256. Scale covariance method is deliberately proposed for long term point-measured records (e.g. precipitation), which cannot be appropriately analyzed with the scale variance method. SC method calculates covariance and correlation coefficient for each pair of point-measured records. Distance between every two points is

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题资助(2008ZX07526-001)

收稿日期: 2011-05-09; **修订日期:** 2011-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

estimated and then the pairs with distance less than predefined scales are selected for SC calculation. Largest outside rectangle of the boundary in the Liao River basin is chosen for data extraction and analysis. Altitude and slope derived from the SRTM-DEM data in the Liao River basin, provided by USGS, is utilized for scale variance analysis. NDVI in the Liao River basin in 2007 is selected for vegetation scale variance analysis. Both DEM and NDVI data are resampled with the cell size of $1\text{ km} \times 1\text{ km}$. Precipitation data from 34 stations within and around the Liao River basin from 1957 to 2008 are collected for scale covariance analysis. Scale covariance analysis results indicate that precipitation shows a characteristic scale of 75 km, corresponding to a box size of 5625 km^2 , and scale variance analysis shows that both topography (DEM and slope) and vegetation (NDVI) have characteristic scales of 16 km, 32 km, 64 km, and 128 km, corresponding to box sizes of 156 km^2 , 1024 km^2 , 16384 km^2 , respectively. Referring to the National Ecological Unit Hierarchy (NEUH) in USA, the aquatic ecoregion framework by US-EPA, and ecoregions defined in the European Water Framework Directive, the range of aquatic ecoregion in China is preliminarily determined. Size of aquatic ecoregion level I is supposed to be more than 5000 km^2 and less than 50000 km^2 , which approximately corresponds to the ecoregions between the levels of "Province" and "Section" in the NEUH or the very large ecoregions in the WFD, and the size for aquatic ecoregion level II is about 1000 to 5000 km^2 , which approximately corresponds to the ecoregions of level "Subsection" in the NEUH or the large ecoregion in the WFD. On the basis of the primarily defined extent of both aquatic ecoregion level I and level II, potential indicators for level I and level II ecoregions are discussed. Conclusions are important for the selection of indicators in aquatic ecoregion zoning.

Key Words: Liao River; environmental factor; scale; aquatic ecoregion; indicator

流域水生态分区是指在某一特定尺度上,以水生态系统为核心,筛选出水生态因子的主要驱动环境要素作为分区指标确定的与水生态系统功能密切相关的周围陆地环境,这一水陆联合区域即为水生态分区^[1-2]。目前,我国水生态分区研究受到密切关注,在借鉴欧美等发达国家先进经验和技术的的基础上,众多的研究工作陆续开展^[2-5]。美国环保署(EPA)在全美进行了三级水生态区划分,其中采用的主要分区指标为土地利用、地形、潜在自然植被和土壤等^[6]。孙小银等^[7]分别针对宏观尺度、中等尺度和小尺度给出了参考分区指标。其中,宏观尺度主要以气候和地形因子为主,中等尺度则在前者基础上包括了生物、河流和人类活动等要素,小尺度则主要包括水生态系统特征因子。刘星才等^[1]提出了一、二级水生态分区技术框架,其中一级分区指标主要包括地形地貌和水文气象要素,二级则包含了土壤、植被、人类活动以及部分水生态系统要素。在目前的水生态分区研究中,指标体系大部分基于人们已有的经验和知识构建,缺乏一定的科学理论分析和支持,其合理性(如哪些指标可以采用、分别在哪一级分区采用)尚存在一些争议,尤其是针对分区指标与分区等级之间的尺度对应关系研究尚不多见。

在生态学研究,尺度研究的核心和目标之一就是确定合适的尺度进行生态学现象分析,多尺度和等级分析是研究生态过程和格局的基础^[8]。这一思想对分区指标尺度的确定具有重要参考意义。为了表征生态过程在空间上的变异特征及变化幅度,生态学家提出了尺度域和尺度阈值两个概念^[9]。尺度域指生态过程不随尺度变化而变化或仅发生单调变化的空间范围。不同尺度域可由尺度阈值分割,即尺度阈值是生态过程在连续空间上发生剧烈变化或断裂性变化的临界范围,即所谓的空间变异尺度。对于大江大河流域这样的景观,往往存在多个空间变异尺度。李小梅等^[10]采用小波分析方法对福州市的 NDVI 特征尺度进行了研究,发现福州地区纬度和经度方向都存在多个特征尺度,分别为 14—58 km 和 30—110 km。李双成等^[11]研究了 NDVI 多尺度变异格局,及其与地形因子(海拔、坡度、坡向和湿度指数)之间的多尺度空间相关性;结果表明,NDVI 与地形因子之间的相关性随尺度增加而增大。赵金等^[9]在塔里木河流域对土地利用监测的最佳尺度选择进行了研究。这些研究对确定环境要素所对应的分区尺度有很好的借鉴意义。

流域水生态分区共分为 4 个等级,属于逐级嵌套系统,即 1 个一级分区包含 1 个以上二级分区,1 个二级

分区包含 1 个以上三级分区。本文假设水生态分区是可以采用环境要素来区分的,并且这些环境要素中应该存在与水生态分区所设定的类似的等级尺度。本文以辽河流域为例,针对可能用于流域水生态一、二级分区(中宏观尺度)的部分指标——即在大中尺度上对水生态系统影响最为显著的几个环境要素——包括空间上连续的数据如植被、高程和坡度以及站点监测数据降水的空间尺度特征进行分析,并尝试在界定各级水生态分区范围的基础上,探讨这些环境要素作为分区指标可能适用的分区等级。

1 研究方法

景观生态学中常用的空间尺度分析方法有半方差分析、尺度方差分析和小波分析等^[12-13]。其中使用最为广泛的是半方差分析方法。它是地统计学中发展起来一个可用来识别变量空间结构的方法,同时还可以用于空间局部最优插值(Kriging 空间插值)。以半方差图为纵坐标,采样间隔为横坐标作图即可得到半方差图。通过半方差理论模型拟合实验半方差图,即可得到空间自相关变程。半方差分析简洁明了,不过计算量略大^[14]。但其最大问题在于对多尺度景观格局(尤其是等级结构)的识别效果较差^[15-17]。小波分析是景观格局分析中相对较新的方法之一,近年来在研究中的应用逐渐增多。小波分析灵活易用,不过也有较为明显的缺点,如小波基的选择对分析结果有一定影响^[14]。此外,一维小波分析中样线选择对分析结果影响很大,而二维小波分析中尺度变换时和尺度方差分析类似,要求尺度必须为 2 的整数次幂,在结果分析时,小波转换图往往难以解释,而需借助小波方差图来识别景观特征尺度^[12, 14]。尺度方差分析在运算和解译方面都要简单得多,在多尺度景观格局分析中效果较好,因此,本文拟采用该方法对环境要素空间变异尺度进行分析。

1.1 尺度方差分析

尺度方差分析是 Moellering 和 Tobler^[18]提出的一种空间等级分析方法,用于检测系统空间变异性发生的具体尺度。该方法最初用来检测巢式等级系统各组织水平的相对变异程度。所谓巢式等级系统,是指系统的每一个层次均由其下一层次组成,相邻层次之间是包含与被包含的关系,如植被、地理分类系统均为这种系统^[19]。如前文所述,本文的流域水生态分区也是一种巢式系统。为了寻求同样可能为巢式等级系统的环境要素作为合适的分区指标,尺度方差分析显然是一种较为合适的方法。尺度方差分析可以将系统的方差在不同尺度等级系统的水平上逐级分解,尺度方差发生突变的尺度也就是空间变异性突出的尺度,从而给出了不同等级水平对应的特征尺度。该方法同样可用来分析景观的多尺度结构,揭示与景观变化和生态过程有关的重要尺度^[19]。尺度方差的统计模型一般写为:

$$X_{ijk\dots z} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_{ijk} + \dots + \omega_{ijk\dots z} \quad (1)$$

式中, $X_{ijk\dots z}$ 表示等级系统最低层次上某组成单元的取值, μ 表示在这一层次上系统的基本单元组成的总体平均值,其余各项分别表示来自各个层次($\alpha, \beta, \gamma, \dots, \omega$)上的影响,其中 α_i 表示系统分解最高层次的影响。根据该模型,以 4 个层次(整体、 α, β, γ)的等级系统为例,各等级上的平方和可采用以下公式计算^[19]:

$$SS_{\text{total}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} (X_{ijk} - \bar{X}_{\dots})^2 \quad (2)$$

$$SS_{\alpha} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} (\bar{X}_{i..} - \bar{X}_{\dots})^2 \quad (3)$$

$$SS_{\beta} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} (\bar{X}_{ij.} - \bar{X}_{i..})^2 \quad (4)$$

$$SS_{\gamma} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} (\bar{X}_{ijk} - \bar{X}_{ij.})^2 \quad (5)$$

式中, I 为系统在 α 层次上的单元数, J_i 为第 i 个 α 层次单元所包含的 β 层次上的单元数, K_{ij} 为第 ij 个 β 层次单元中所包含的 γ 层次上的单元数。

对于栅格数据的尺度方差计算,可以采用下面的公式:

$$SV_{\alpha} = \frac{SS_{\alpha}}{J \cdot K \cdot (I - 1)} \quad (6)$$

$$SV_{\beta} = \frac{SS_{\beta}}{K \cdot \sum_{i=1}^I (J_i - 1)} \quad (7)$$

$$SV_{\gamma} = \frac{SS_{\gamma}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (K_{ij} - 1)} \quad (8)$$

Wu 等^[14]采用尺度方差分析方法对加拿大针叶林景观的空间多尺度和等级特征进行了分析,证明该方法在确定空间变异性及变异格局的特征尺度上较为有效^[15]。

1.2 尺度协方差和相关性

尺度方差分析方法主要应用于空间连续的单值栅格数据(即每个像元只对应一个数值)尺度分析,而对于站点观测类长序列数据(如降水)则不适用。为此,本文将两个变量之间的相关分析扩展到空间多点序列相关分析,提出尺度协方差和尺度相关系数计算方法。该方法假设站点采样数据存在空间自相关,且相关程度受尺度(站点之间距离)影响,通过计算各个尺度上的协方差/相关性,考察景观中可能存在的不同尺度上的自相关格局。协方差和相关性突出的尺度也即景观空间变异性明显的尺度。

(1)首先,计算任意两个观测点间距离 D (一般取欧式距离),并记录每个距离对应的两个站点号(i, j)。

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

(2)对 D 排序,并剔除其中相同的数据,得到即要计算的尺度 SC 。不过,这样得到的尺度往往间隔很小,需要计算的尺度太多,导致计算量比较大。因此,通常在 SC 基础上取一定的尺度间隔,保证能覆盖所关注的尺度范围的同时减少计算所需的尺度数量。

(3)假设需要记得尺度有 K 个,对任意尺度 SC_k ,找出所有间距小于或等于 SC_k 的站点,即 $D_{i,j} \leq SC_k$,设得到的站点集合为 $\{SI, SJ\}$,其中包含 M 对观测站点号,每一对观测站间的距离都小于或等于当前计算尺度 SC_k ,计算每一对站点间的协方差,并求平均值:

$$SCCOV_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M COV(P(SI_m), P(SJ_m)) \quad (10)$$

式中, SI_m 为第 m 对站点, $P(SI_m)$ 为站点号为 SI_m 的站点序列数据, COV 为协方差计算函数, $SCCOV_k$ 即为尺度 SC_k 对应的协方差平均值。

尺度自相关系数的计算过程和尺度协方差计算类似,只是在第(3)步时计算的是相关系数:

$$SCCOR_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M CORR(P(SI_m), P(SJ_m)) \quad (11)$$

式中, $CORR$ 为相关系数计算函数, $SCCOR_k$ 为尺度 SC_k 上的平均相关系数,其余变量含义同上。

这里计算的协方差和相关系数类似空间自相关分析,也会随着尺度变化而变化。以协方差或相关系数为纵坐标、计算尺度为横坐标作图,可观察某一要素在各个尺度上的空间依赖程度。依赖程度最高的尺度对应一个空间可区分度最高的尺度域。事实上,相关系数是协方差的标准化的,因此,实际应用中未必两者都要计算;当前者无法给出所需信息时,可以参考后者,它不同尺度上的变化往往较前者要大。

1.3 数据来源

NDVI 数据可以用来表征地表植被覆盖度。本文采用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)提供的 NDVI 数据,选择了 2007 年 NDVI 旬数据并计算得到年平均数据,分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,原始数据值为像元值(DN),根据数据提供的说明文档将其转换为 NDVI 值。

高程数据来自美国 USGS/NASA 发布的 90 m 分辨率 SRTM-DEM 数据^[20],在应用之前采用 ArcGIS 软件对其进行了填注处理以消除异常数据值,并重采样得到 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率的数据;坡度根据 SRTM-DEM 数据计算得到。为方便尺度方差计算,NDVI、DEM 和坡度数据选取辽河流域边界的最大外接长方形为计算范围,如图 1 所示。

本文选择辽河流域范围内及周边 34 个站点(图 1)1957—2008 年的降水数据进行空间尺度分析,数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。



图 1 辽河流域及其周边降水站点

Fig. 1 Meteorological stations in and around the Liao River basin

2 结果分析

景观生态学中通常采用粒度和幅度来表达尺度这一概念。粒度是指景观的最小可辨识单元的长度和面积等,对于栅格图像,粒度即指像元大小。幅度则通常指研究的时空范围。本文研究以辽河流域为例,在尺度方差分析中固定幅度大小不变,采用了不同粒度进行分析。降水的空间尺度分析同样只改变粒度大小,不过此处粒度指分析过程中雨量站之间的最小距离。

2.1 尺度方差分析结果

采用尺度方差分析方法对辽河流域 NDVI、高程和坡度的空间尺度变化进行了分析。计算范围内数据大小为 530×1006 个像素,每一个像素代表实际大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。尺度方差计算粒度大小以像素个数为单位,均为 2 的 n 次幂(2^n)以满足其巢式等级结构,依次为 $2 \times 2, 4 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32, 64 \times 64, 128 \times 128, 256 \times 256, 530 \times 530$ 。

计算结果表明,高程尺度方差逐渐减小(图 2),在 16×16 尺度上方差出现 1 个峰值,之后继续减少并在 128×128 和最后一个 530×530 粒度上也出现了方差峰值。这意味着高程的景观格局特征尺度约在 8—16 km、64—128 km 和 256—530 km 之间变化,也就是说,高程景观格局存在以上 3 个尺度域,其中 16、128 km 是关键的分段尺度,而 256 km 这一粒度由于受研究所选择计算幅度限制,无法确定是否为景观特征尺度。坡度(图 2)和 NDVI(图 2)的尺度方差同样随粒度增加而持续下降,但是中间出现多次方差峰值,分别为 $16 \times 16, 32 \times 32, 64 \times 64, 128 \times 128$, NDVI 在 256×256 这一粒度上也出现方差峰值。因此,不同于 DEM,坡度在 8—128 km 之间存在多个尺度域,其中几个关键的分割尺度约为 16、32 和 64 km。NDVI 的景观特征尺度范围更加广泛,约在 8—256 km,其中的关键分割尺度约为 16、32、64 和 128 km。

2.2 降水空间尺度分析

降水数据的尺度协方差(图 2)分析显示,在 60 km 和大约 75 km 尺度上,降水有明显的空间自相关性,即在这些尺度上降水的空间依赖程度较高;在 100 km 和接近 140 km 尺度上也有较弱的空间变异性。降水空间相关系数也在 75 km 这一尺度上达到最大值,而之前尺度协方差值最突出的 60 km 尺度则不明显,100 km 和 140 km 也弱了许多。因此,可以认为在 75 km 尺度上降水空间依赖程度最高,75 km 即辽河流域降水的一个景观特征尺度。需要注意的是,这里所计算的景观特征尺度较程度上受观测数据的空间分辨率影响,因此,某些更小空间尺度上的景观变异特征无法在该计算方法中表现出来。

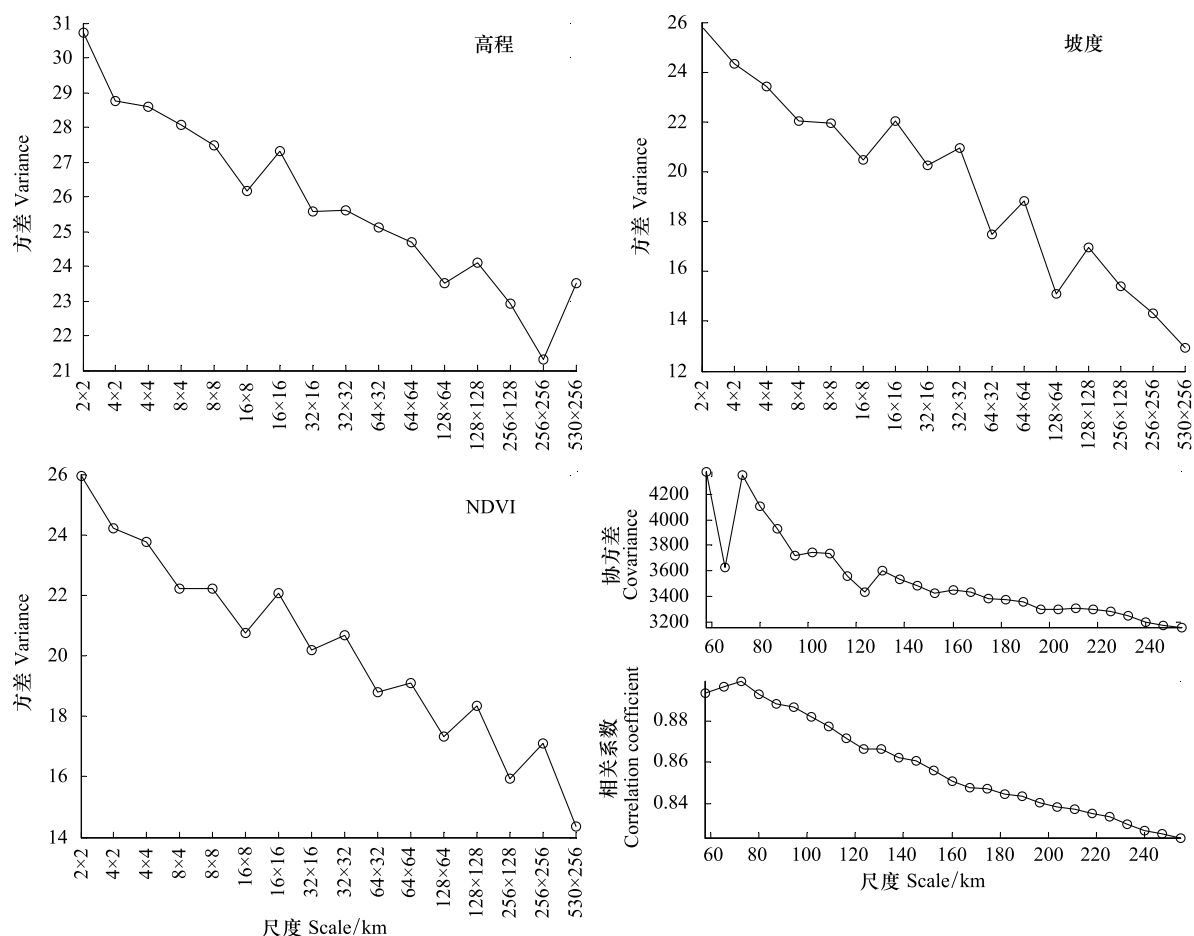


图2 辽河流域高程、坡度和 NDVI 的尺度方差图及降水尺度协方差和空间相关系数

Figure 2 Results of scale variance analysis for DEM, slope and NDVI, and Scale covariances and correlation coefficients for precipitation in the Liao River basin.

3 结论和讨论

3.1 分区大小与指标尺度

流域水生态分区是一个分级分类的生态区划系统,每一级分区都应该有其特定的内涵与范围。目前我国并没有针对各级水生态分区的具体内涵给出定义,也没有明确规定分区大小。美国生态区体系将生态分区划分为从气候带尺度到地类尺度的 8 个等级,并给出各等级分区的大小范围^[21]。欧洲水框架指令(European Water Framework Directive, WFD)^[22]中对河流型生态区划分时,根据面积大小分为 4 个尺度:小(10—100 km²)、中(100—1000 km²)、大(1000—10000 km²)和超大(10000 km² 以上)。美国环保署主导的水生态分区没有明确给出各级分区大小,通过计算大致得到Ⅲ、Ⅳ级分区平均大小分别约在 9 万和 12500 km² 左右。参照和对比表 1 中不同国家生态分区体系中各个分区等级及其对应的尺度范围,认为我国流域水生态一级分区大致在美国生态区体系中的省、区之间,相当于 WFD 中的超大生态区;二级分区则大致相当于美国生态区中的亚区(Subsection)和 WFD 中的大尺度生态区。借鉴国外区划经验和成果,以及我国目前水生态区划工作的特点(目前正在开展水生态分区工作的各个河流型流域大小不一)和一些区划实践工作^[2, 23-25],可以确定辽河流域的水生态一级分区大小大致在流域范围以内 5000 km² 以上、小于 50000 km²,水生态二级分区大小大约在 1000—5000 km² 之间。

空间尺度分析揭示了各环境要素的空间尺度特征。前面的分析结果表明,辽河流域降水空间变异的尺度为 75 km,地形要素(高程和坡度)和 NDVI 均存在 16、32、64 km 和 128 km 等几个景观特征尺度。辽河流域属

于大陆性温带气候,其降水受副热带高压和夏季风等大气环流因子影响^[27]。这些大尺度影响因子对辽河流域不同区域的影响不一样^[28],造成了辽河流域降水大尺度上的空间差异。在一个区域的古地理分化、地貌的形成过程中,地形地貌和植被其实是相互作用和影响的^[29],因此,两者出现类似的景观变异尺度不难理解。

表 1 不同分区体系的各级分区尺度/km²
Table 1 Size of ecoregions for different framework

美国生态区分级系统 ^[21] USA National Ecological Unit Hierarchy	欧盟水框架指令 ^[22] European Water Framework Directive	美国环保署 ^[26] USA EPA Ecoregion	中国流域水生态分区 China aquatic ecoregion
省:25000	很大:> 10000	III 级:≈ 90000 IV 级:≈ 12500	I 级:5000—50000
区:2500	大:1000—10000		II 级:1000—5000
亚区:25—2500	中:100—1000		

空间变异性也反映了一个要素的景观单元在空间上的可区分能力。影响地表水生态系统的环境要素主要包括地质、地貌及水文等。不同的环境要素影响水生态系统的表现尺度不一样。由于降水本身空间变异尺度较大,它作为水文循环过程的一部分,对水生态系统的影响主要表现在大尺度范围,主要体现在对水量(径流)的影响。虽然它在较小尺度上同样会影响水生态系统特征,但由于这些尺度上的降水空间差异较小,对水生态系统空间变异造成的影响也要小得多,其空间区划能力也相应较差。地形要素和植被不仅可以通过水文过程影响水生态系统,它们本身格局的变化所造成的生境差异同样会对水生态系统带来很大影响。因此,这种地表特征的空间差异性对水生态系统产生影响的尺度比降水要广泛的多,而且同时对水生态系统的水量 and 水质都有影响。结合前面对水生态一、二级分区大小的讨论,可以大致确定降水对空间的区划能力应在水生态一级分区范围内,地形要素(高程、坡度)和 NDVI 在水生态一、二级分区范围内都具有较好的空间区划能力。

3.2 结论

本文采用高程、坡度、NDVI 以及月降水量这几个指标对辽河流域地形、植被和降水等环境要素的空间变异尺度进行了分析。结果表明,辽河地形要素在 16、32、64 和 128 km 这几个景观尺度上都有明显的空间变异性。植被(NDVI)则在 32 km 和 128 km 尺度上有略为明显的空间变异性。降水的空间依赖程度最为显著的景观尺度约为 75 km,当然,受降水观测数据的空间分辨率影响,无法检测出小尺度上是否也存在明显的空间依赖性。在界定流域各级水生态分区大致范围基础上,可以初步确定文中几个环境要素适用的分区等级。降水指标适用于流域水生态一级分区,而地形(DEM、坡度)和植被(NDVI)则在水生态一、二级水生态分区中均可应用。当然,本研究基于辽河流域完成,我国各大流域之间自然地理和环境特征相差较大,本研究结果在其他流域是否适用,有待研究。

致谢:本文 NDVI 数据来自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);降水数据来自中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)。

References:

[1] Liu X C, Xu Z X, Xu C. A framework for aquatic ecoregion zoning. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4804-4814.
[2] Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Study of aquatic ecoregion in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 911-918.
[3] Meng W, Zhang Y, Zheng B H. Aquatic ecological region approach and its application in China. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 293-300.
[4] Sun X Y, Zhou Q X, Yu H B, Meng W. Comparative study on ecoregion and its classification systems between China and USA. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3010-3017.
[5] Tang T, Cai Q H. The essential issues in aquatic ecological function regionalization. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6255-6263.
[6] Omernik J M. Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 1987, 77(1): 118-125.
[7] Sun X Y, Zhou Q X. Primary study of freshwater ecoregionalization in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 415-423.
[8] Gong J Z, Xia B C, Li N. Characteristics of scale and hierachical structure of landscape system under different heterogeneities of land cover patterns

- in Guangzhou City. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 873-881.
- [9] Zhao J, Chen X, Bao A M, Duan Y B. Choice of appropriate scale for land use monitoring: a case of the Tarim River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(6): 659-668.
- [10] Li X M, Sha J M, Lian J L. Regional characteristic scale of NDVI based on wavelet analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2864-2873.
- [11] Li S C, Gao W M, Zhou Q F, Liu F Y. Multi-scale spatial analysis on NDVI and topographical factors using wavelet transform. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4198-4203.
- [12] Zhang N. Scale issues in ecology: concepts of scale and scale analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2340-2355.
- [13] Lü Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096-2105.
- [14] Cai B F, Yu R. Comparison on spatial scale analysis methods in landscape ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2279-2287.
- [15] Wu J G, Jelinski D E, Luck M, Tueller P T. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics. *Annals of GIS*, 2000, 6(1): 6-19.
- [16] Meisel J E, Turner M G. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis. *Landscape Ecology*, 1998, 13(6): 347-362.
- [17] Bradshaw G A, Spies T A. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 1992, 80(2): 205-215.
- [18] Moellering H, Tobler W. Geographical variances. *Geographical Analysis*, 1972, 4(1): 34-50.
- [19] Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [20] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, Guevara E. Hole-filled seamless SRTM data V3. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), 2006. <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- [21] Cleland D T, Avers P E, McNab W H, Jensen M E, Bailey R G, King T, Russell W E. National hierarchical framework of ecological units// Boyce M S, Haney A, eds. *Ecosystem Management Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources*. New Haven: Yale University Press, 1997: 181-2000.
- [22] European Commission. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000: establishing a framework for Community action in the field of water policy. 2000.
- [23] Liu X C, Xu Z X, Zhao J, Niu C J. Technique for ecoregion zoning and its application in the Liao River basin//The Eighth China Water Forum. Harbin: China WaterPower Press, 2010.
- [24] Gao Y N, Gao J F. Delineation of aquatic ecoregions in Taihu lake basin. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 111-117.
- [25] Ge Q S, Zhao M C, Zheng J Y, Fang X Q. Study on division of the terrestrial system in China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 515-522.
- [26] National Health and Environmental Effects Research Laboratory (US Environmental Protection Agency). Level III and IV Ecoregions of the Conterminous United States. 2007, <ftp://ftp.epa.gov/wed/ecoregions/>.
- [27] Sun A J, Gao B. Temporal and spatial distribution of serious flood and drought as well as their physical factor analysis during summer season in the Liaohe River basin//Sun A J, Wu G X, Li Y K, eds. *Diagnostic Study and Prediction Method of Serious Drought and Flooding and Low Temperatures*. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 24-31.
- [28] Liu X C, Xu Z X, Yu R H. Spatiotemporal variability of drought and the potential climatological driving factors in the Liao River basin. *Hydrological Processes*, 2011. doi: 10.1002/hyp.8104.
- [29] Marston R A. Geomorphology and vegetation on hillslopes: interactions, dependencies, and feedback loops. *Geomorphology*, 2010, 116(3/4): 206-217.

参考文献:

- [1] 刘星才, 徐宗学, 徐琛. 水生态一、二级分区技术框架. *生态学报*, 2010, 30(17): 4804-4814.
- [2] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 911-918.
- [3] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 水生态区划方法及其在中国的应用前景. *水科学进展*, 2007, 18(2): 293-300.
- [4] 孙小银, 周启星, 于宏兵, 孟伟. 中美生态分区及其分级体系比较研究. *生态学报*, 2010, 30(11): 3010-3017.
- [5] 唐涛, 蔡庆华. 水生态功能分区研究中的基本问题. *生态学报*, 2010, 30(22): 6255-6263.
- [7] 孙小银, 周启星. 中国水生态分区初探. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 415-423.
- [8] 龚建周, 夏北成, 李楠. 广州市土地覆被格局异质性的尺度与等级特征. *地理学报*, 2006, 61(8): 873-881.
- [9] 赵金, 陈曦, 包安明, 段远斌. 土地利用监测适宜尺度选择方法研究——以塔里木河流域为例. *地理学报*, 2007, 62(6): 659-668.
- [10] 李小梅, 沙晋明, 连江龙. 基于小波变换的 NDVI 区域特征尺度. *生态学报*, 2010, 30(11): 2864-2873.
- [11] 李双成, 高伟明, 周巧富, 刘逢媛. 基于小波变换的 NDVI 与地形因子多尺度空间相关分析. *生态学报*, 2006, 26(12): 4198-4203.
- [12] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法. *生态学报*, 2006, 26(7): 2340-2355.
- [13] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096-2105.
- [14] 蔡博峰, 于嵘. 景观生态学中的尺度分析方法. *生态学报*, 2008, 28(5): 2279-2287.
- [19] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级* (第二版). 当代科学前沿论丛. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [23] 刘星才, 徐宗学, 赵洁, 牛翠娟. 水生态一级分区技术及其在辽河流域的应用示范//农业、生态水安全及寒区水科学——第八届中国水论坛. 哈尔滨: 中国水利水电出版社, 2010.
- [24] 高永年, 高俊峰. 太湖流域水生态功能分区. *地理研究*, 2010, 29(1): 111-117.
- [25] 葛全胜, 赵名茶, 郑景云, 方修琦. 中国陆地表层系统分区初探. *地理学报*, 2002, 57(5): 515-522.
- [27] 孙安健, 高波. 辽河流域夏季严重旱涝时空分布特征及其物理因子的分析//孙安健, 吴国雄, 李永康. 严重旱涝与低温的诊断分析和预测方法研究. 北京: 气象出版社, 2000: 24-31.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understory species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《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 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 11 (June, 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:100071	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