

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **2013**

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 33 卷 第 21 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究..... 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展..... 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响..... 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析..... 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响..... 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究..... 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险..... 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响..... 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响..... 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响..... 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘿对盐肤木光合特性和总氮含量的影响..... 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应..... 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价..... 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系..... 朱先进,于贵瑞,王秋凤,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响..... 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究..... 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 马赞花,张铜会,刘新平 (6984)

SWAT 模型融雪模块的改进 余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)

科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应..... 常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征..... 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)

三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素..... 吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例..... 黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)

学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 刘某承 (7044)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

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

DOI: 10.5846/stxb201207080952

黄翌,汪云甲,李效顺,胡召玲,刘国平.煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例.生态学报,2013,33(21):7035-7043.
Huang Y, Wang Y J, Li X S, Hu Z L, Liu G P. Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 7035-7043.

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析 ——以大同矿区为例

黄 翌^{1,2},汪云甲^{1,2,*},李效顺²,胡召玲³,刘国平³

(1. 矿山生态修复教育部工程研究中心 中国矿业大学,徐州 221116;

2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室 中国矿业大学,徐州 221116; 3. 江苏师范大学城市与环境学院,徐州 221116)

摘要:植被是综合体现矿区生态环境状况的关键因子。以 NDVI 值为参数,基于像元二分的遥感估算方法测度了 1999—2010 年大同矿区的植被覆盖情况。利用 Global Moran's I 、Getis-Ord General G 、Getis-Ord G_i^* 、Anselin Local Moran I 等空间关联指数分别从全局演变和局部效应的视角揭示了矿区植被受煤炭开发等活动扰动的时空演化和内在作用机制。研究表明:(1)大同矿区植被盖度变化在空间上呈集聚分布状态,表现出很强的空间自相关性,这一现象在植被盖度最低时期最明显;(2)在植被盖度上升期,其变化的热点区不断减少或向次热点地区分散,矿区植被变化集聚效应越发不显著,总体上呈离散的态势。(3)煤炭开发对矿区植被的扰动呈现整体性特征,与煤炭产量成正比。(4)不同植被类型受煤炭开发扰动呈现不同的变化特征。(5)采用循环工艺的高效高产矿井大规模煤炭开发对植被的扰动作用尚不明显,但长期效应有待进一步研究。

关键词:煤矿区;植被盖度;时空效应;图谱分析

Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area

HUANG Yi^{1,2}, WANG Yunjia^{1,2,*}, LI Xiaoshun², HU Zhaoling³, LIU Guoping³

1 Engineering Research Center of Mine Ecological Construction, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

3 School of Urban and Environmental Science, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

Abstract: Vegetation is a key factor which comprehensively reflects condition of ecology and environment in mining area. With NDVI index as the parameter, vegetation coverage in Datong coal mining area from 1999 to 2010 were measured based on dimidiate pixel model by remote sensing estimation method. Spatial correlation indexes such as Global Moran's I , Getis-Ord General G , Getis-Ord G_i^* and Anselin Local Moran I were respectively used to reveal the temporal evolution and intrinsic mechanism of vegetation disturbed by coal mining from the global evolution and local effect perspective. Research results showed that: (1) Changing of vegetation coverage in Datong coal mining area presented cluster distribution and strong spatial autocorrelation in space, meanwhile, the phenomenon was absolutely obvious when vegetation coverage was in the lowest period. (2) In the rising period of vegetation coverage, hotspots of vegetation coverage gradually reduced or separated to the secondary hotspots area, clustering effect of vegetation changing became less significantly, which presented discrete state in general. (3) The disturbance of coal mining brought to vegetation showed overall characteristics and in proportion with coal production. (4) Different vegetation types presented different changing characters caused by coal

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174287);国家自然科学基金青年资助项目(41101428,71103182);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12_0942);江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35);山西省科技重大专项资助项目(20121101008)

收稿日期:2012-07-08; 修订日期:2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyj4139@cumt.edu.cn

mining. (5) The disturbance effect which large-scale coal mining of high efficiency and large production coal mines adopted circulation techniques brought to vegetation was still inconspicuous, however, the long-term effects need to be further studied.

Key Words: coal mine area; vegetation coverage; spatio-temporal effect; graphic analysis

煤炭开采在为国家建设提供大量优质煤炭的同时也严重破坏了矿区的生态环境。根据相关研究,煤炭开发活动对矿区生态环境的主要影响有:地表沉陷、土地沙漠化、土壤质量下降、地表及地下水污染、植被破坏、生态系统退化、生物多样性丧失、景观破坏、农作物减产等^[1]。这些直接或间接影响一方面破坏了矿区植被的生长环境,使其失去适合的生存空间;另一方面,逐渐裸露的地表又进一步加剧了矿区生态脆弱度。因此,植被长势与矿区生态环境之间存在着高度的双向制衡关系。同时,以生态学视角出发,诸如水土保持、生态系统调节、生物多样性保护、土壤质量改良、景观修复等矿区资源环境诸多因子都不同程度依赖于植被的长势和繁茂程度。因此,植被是考量矿区生态环境状况的关键之一。在衡量植被繁茂程度的要素中,植被覆盖度又称为投影盖度,是指植被植株冠层或叶面在地面的垂直投影面积占植被区总面积的比例^[2-4],其范围分布在0—1之间,反映了植被在水平方向上的密度情况,数值越大表明植被覆盖度越高。国内外研究表明,作为重要的气候、生态水文影响因子,植被覆盖度影响着区域大气圈、水圈、生物圈层间的各种物质转化和能量转移过程^[5]。因此,研究其演化过程是检验矿区生态环境变化趋势的重要指标之一,对于评价煤炭开发对矿区环境影响机理、实施切实有效的生态修复工程等具有重要的研究意义。目前,国内外关于区域植被覆盖度的研究主要集中在植被覆盖度与气候因子的关系^[6-7]、植被覆盖度变化对区域环境影响^[8-9]、以城市化等为代表的人类活动对植被覆盖度的影响^[10-11]等方面。在煤矿区,煤炭开发及相关生产活动显然是影响植被的最主要因子,将植被覆盖度应用到煤矿区环境问题研究主要包括:基于景观视角的矿区土地利用、覆被变化及植被景观破碎化程度研究^[12];矿区植被系统恢复过程中的多样性变化^[13];基于遥感过程的 CASA 模型和生态环境状况指数测算矿区植被净初级生产力及生态环境状况变化趋势^[14];矿区地下水与植被的相互关系探讨^[15];采用 NDVI 与一元线性回归方法,分析植被覆盖和土地沙化的动态变化^[16]等,以上研究为本文提供了思路上的启迪。就已有的研究而言,植被覆盖度的计算方法已较为成熟,多数文献对植被覆盖度进行分级,对比分析多时相分级结果,得出区域植被覆盖度的全局趋势和变化规律并加以解释,这些基于分级的对比分析能够在一定程度上表现区域植被演化特征,但是很难进一步提高定量表达的精度。同时,全局趋势分析在研究局部空间问题中也受到限制。因此,本文综合运用以局部性和空间相关性为主的 GIS 空间分析及数理统计方法研究矿区植被覆盖度受煤炭开发影响的时空效应,以期更加深入地挖掘煤炭开采活动对矿区植被的影响机制。

1 数据来源与处理

研究选择山西大同矿区作为研究区域(图1),主要基于以下几点考虑:其一,煤炭开发历史悠久,产量大,环境累积效应和扰动量显著。作为国家“十二五”规划的14个大型煤炭基地之一——晋北煤炭基地主干企业和国内特大型煤矿集团,同煤集团2010、2011年原煤产量连续突破亿吨,采煤塌陷区范围广,15个主要井田范围沉陷区面积达到345.26 km²,平均每个井田周围20 km²以上的土地都是沉陷区,区域环境受煤炭开发扰动显著。其二,地处生态环境脆弱的中西部地区,在全国具有典型性。由于地处黄土高原边缘,地表湿陷性黄土受采动影响,保水能力差,加之沉陷区地形复杂,地表沟谷纵横,起伏陡峭,土地养分退化,耕作条件破坏,亟待复垦修复,是典型的生态脆弱型矿区。因此,大同矿区区位独特,具有很强的典型性,对此进行深入研究,对于全国其他矿区有普遍的参考和借鉴意义。本文以空间关联测度的图谱视角来表达大同矿区植被覆盖度演变的时空格局,探索煤炭开发对矿区生态环境的影响机制。

研究区自然环境、植被和煤炭开采的总体特征为:

大同地区属大陆性季风气候,干旱、半干旱地区。矿区地貌以中低土石山群和黄土丘陵构成,相对高差

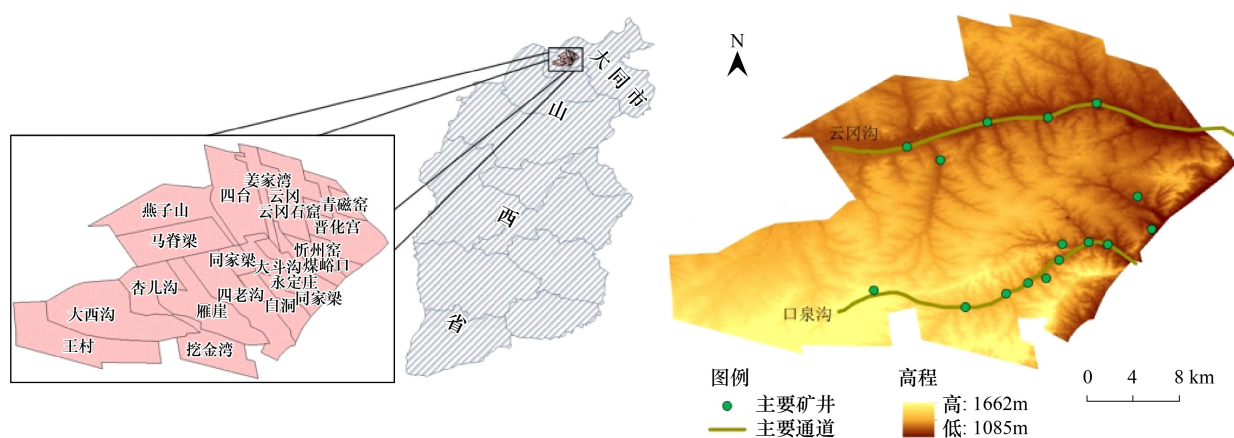


图1 研究区区位和地形

Fig.1 Location and terrain of research area

450m,山体陡峭,树枝状冲沟极为发育,地形支离破碎,沟壑纵横。全区土壤类型主要有山地栗钙土,淡栗钙土和少量草甸土及盐潮土。土质疏松,肥力贫乏,有机质含量少,抗冲力低。矿区植被总体稀疏,多样性差,种类贫乏,旱化特征明显,具有雁北干草原过渡地带特征,表现出个体生态与群落生态的高度统一。据初步统计,自然植被组成以温性落叶阔叶灌丛为主,天然植物共 18 科、35 属、57 种。草本植物多为旱生、中生植物,有华北落叶松、油松、山杨和桦;灌丛主要有沙棘、虎榛子、绣线菊等^[17]。

大同煤田为双纪煤田,走向 NE—SW,上部为侏罗纪含煤地层,位于大同煤田的东北部,下部为石炭、二叠纪含煤地层,除最北端局部地层外,几乎遍布整个大同煤田。矿区自大规模开发以来的数十年,始终以开采埋藏较浅的侏罗纪煤炭为主,石炭、二叠纪煤炭开发近几年刚刚起步,因此本文的研究范围限定于侏罗纪煤田界限。研究区内,共有 17 对大型矿井,5 对分布在北部云冈沟,主要开采侏罗纪煤炭;12 对位于南部口泉沟,其中 10 对开采侏罗纪煤炭,2 对开采石炭、二叠纪煤炭,井田边界如图 1 所示。开采侏罗纪煤层的井田年开采规模 $10^6—5 \times 10^6$ t,开采年限普遍在 50a 以上;开采石炭、二叠纪煤层的井田开采规模 $1.5 \times 10^7—2 \times 10^7$ t,大规模开采年限不足 5a。

以大同矿区 1999 年至 2010 年同期(10 月)12 景 TM/ETM 遥感影像数据,使用 ERDAS 软件首先提取归一化植被指数(NDVI),根据像元二分法原理^[18-21],利用 ERDAS 的建模工具 Spatial Modeler 根据 NDVI 计算出 1999—2010 年 12 个年份大同矿区植被覆盖度。

2 植被盖度时空效应的测度方法

已有的研究大多基于植被盖度的空间格局演变,从总体上揭示矿区植被覆盖度的全局演化过程,但是空间效应可能是大尺度的趋势也可能是局部效应,前者一般称为“一阶效应”^[22],描述的是某个参数的总体变化性,“一阶效应”忽略了局部性和空间相关性等因素,在应用中会带来偏差,需要引入“二阶效应”的方法,“二阶效应”是由空间依赖性和空间异质性产生的。表达的是空间上邻近位置上数值间的相互趋同或背离的倾向。受以煤炭开发为主的多种因素的共同作用,矿区植被覆盖度表现出明显的局部依赖性和异质性,因此,空间数据分析的“二阶效应”方法在矿区植被覆盖度研究中具有重要意义。

运用空间关联指数 Global Moran's I 、Getis-Ord General G 、Getis-Ord G_i^* 、Anselin Local Moran I 来测度全局和局域的空间聚簇特征^[21],前两者是用于探测整个研究区的空间关联结构模式;后两者用于识别不同空间位置上的高值簇与低值簇,即热点区(hot spots)与冷点区(cold spots)的空间分布。空间关联指数表达式和原理如下:

$$\text{Global Moran's } I \quad I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X}) / S^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中, X_i 为区域 i 的观测值, W_{ij} 为空间权重矩阵, 空间相邻为 1, 不相邻为 0, S^2 为 $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n$ 。对 Moran's I 结果进行统计检验, 采用 z 检验: $Z(I) = 1 - E(I) / \sqrt{\text{Var}(I)}$, 式中 $E(I)$ 为数学期望值, $E(I) = -1/n - 1$, $\sqrt{\text{Var}(I)}$ 为变异数, $\text{Var}(I) = E(I^2) - E(I)^2$ 。

在给定显著性水平时, 若 Moran's I 显著为正, 则表示覆盖水平较高 (或较低) 的区域在空间上显著集聚。反之, 若 Moran's I 显著为负, 则表明该区域与其周边地区的覆盖水平具有显著的空间差异。仅当 Moran's I 接近期望值 $-1/(n-1)$ 时, 观测值之间才相互独立, 在空间上随机分布, 此时满足传统区域差异度量方法所要求的独立条件。

$$\text{Getis-Ord General } G \quad G(d) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_i X_j / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j \quad (2)$$

式中, $W_{ij}(d)$ 为以距离规则定义的空间权重, 同样空间范围相邻为 1, 不相邻为 0, X_i 和 X_j 是 i 区域和 j 区域的观测值。在空间不集聚的假设下, $G(d)$ 的期望值 ($E(G)$) 为: $E(G) = W/n(n-1)$, 在正态分布的条件下, $G(d)$ 的统计检验值为: $Z(I) = G - E(G) / \sqrt{\text{Var}(G)}$; 当 $G(d)$ 值高于 $E(d)$ 值, 且 Z 值显著时, 检测区出现高值簇; 当 $G(d)$ 值低于 $E(d)$ 值, 且 Z 值显著时, 检测区出现低值簇, 当 $G(d)$ 趋近于 $E(d)$ 时, 检测区变量呈现出随机分布的特征。

$$\text{Getis-Ord } G_i^* \quad G^*(d) = \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_j / \sum_{j=1}^n X_j \quad (3)$$

为了便于解释和比较, 对 $G^*(d)$ 进行标准化处理: $Z(G^*) = G_i^* - E(G_i^*) / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)}$ 式中, $E(G_i^*)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别是 G^* 的数学期望和方差, $W_{ij}(d)$ 为空间权重, 权重的计算方法如同 Getis-Ord General G 。如果 $Z(G^*)$ 为正, 且显著, 表明位置 i 周围的值相对较高 (高于均值), 属高值空间集聚 (热点区); 反之, 如果 $Z(G^*)$ 为负且显著, 则表明位置 i 周围的值相对较低 (低于均值), 属低值空间集聚 (冷点区)。

$$\text{Anselin Local Moran } I \quad I_i = (x_i - \bar{X}) / S_i^2 \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}(x_j - \bar{X}) \quad (4)$$

式中, X_i 为区域 i 的观测值, $\bar{X}$ 为相关观测值的均值, W_{ij} 为空间权重矩阵, 空间相邻为 1, 不相邻为 0, $S_i^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} / n - 1 - \bar{X}^2$, 式中 n 为观测值的数量。对 Anselin Local Moran's I 结果进行统计检验, 采用 Z 检验: $Z(I) = 1 - E(I) / \sqrt{\text{Var}(I)}$, 式中 $E(I)$ 为数学期望值, $\sqrt{\text{Var}(I)}$ 为变异数。Anselin Local Moran's I 可区分具有统计学上的显著性 (0.05 水平) 的高值 (HH) 聚类、低值 (LL) 聚类、由低值围绕的高值异常值 (HL) 聚类以及由高值围绕的低值异常值 (LH) 聚类。

3 结果分析与讨论

3.1 全局演变特征分析

利用 1999—2010 年大同矿区植被覆盖度计算 Global Moran's I 和 General G 的估计值及其相关指标 (表 1)。

可以看出, 1999—2010 年间, Global Moran's I 估计值全部为正, 检验结果显著, 且数值的大小总体稳定在 0.7—0.8 之间, 但呈现一定的波动性, 2003 年和 2008 年尤为明显, 表明 1999 年以来植被覆盖度空间上分布的趋势, 即植被覆盖度相似 (高或低) 的地区在空间上呈现集中分布的特点, 且总体上较稳定; 在此期间, 全局 G 统计指标的观测值和期望值都十分接近, 相差不大, 且都大于 0, 当设定总体显著性水平 α 为 0.05 时, 可知全局 G 统计量除 2000 年, 2003 年, 2009 年 3 个年份不显著外, 其余各年份都显著, 这说明检测区域高 (或低) 值的集聚现象显著, 植被盖度的变化可能围绕着热点区域来展开, 但在不同的阶段呈现不同的集聚特点:

(1) 1999—2002 年间, Moran's I 和 $G(d)$ 值分别由 0.765 和 0.007782 迅速扩大到 0.783 和 0.007891, $Z(I)$

值也由 3.448 扩大到 6.629,其中全局 G 统计指标达到全期最大值。表明矿区内植被盖度差异显著扩大,变异系数由 0.245 增加到 0.251。

表 1 植被盖度的变异系数、Moran's I 和 General G 估计值(1999—2010 年)

Table 1 Estimated value of variation coefficient, Moran's I and General G of vegetation coverage

年份	植被盖度	变异系数	Moran's I	$G(d)$	$Z(I)$	$Z(d)$
1999	0.4259	0.245	0.765	0.007782	3.448	3.433
2000	0.3852	0.189	0.816	0.007924	5.760	1.953
2001	0.3455	0.231	0.770	0.007980	4.509	3.610
2002	0.3307	0.251	0.783	0.007891	6.629	3.703
2003	0.3064	0.211	0.909	0.007879	4.920	1.457
2004	0.3742	0.131	0.707	0.007866	5.310	2.422
2005	0.3592	0.237	0.745	0.007814	8.029	4.272
2006	0.4146	0.149	0.759	0.007759	7.325	4.057
2007	0.4321	0.122	0.763	0.007813	6.585	3.134
2008	0.4200	0.088	0.634	0.007845	7.853	4.454
2009	0.465	0.117	0.756	0.007785	2.651	0.756
2010	0.5173	0.147	0.765	0.007748	7.027	4.307

(2)2003 年,Moran's I 值由 0.783 扩大到 0.909, Z 值分别由 6.629 和 3.703 缩小到 4.920 和 1.457。同时,2003 年也是全阶段矿区植被覆盖度最低的时期和转折点,Moran's I 值却达到全阶段最大值,矿区的植被受破坏程度呈现高度正相关,植被覆盖度低的地区在空间上呈现集中分布。

(3)2004—2007 年间是矿区植被覆盖度振荡上升的阶段,Moran's I 和 $G(d)$ 值变化不大, $Z(I)$ 和 $Z(d)$ 值却有不同程度的提升,均大于 0.05 显著水平上的标准阈值 1.96,表明 Moran's I 和 $G(d)$ 值在统计上显著性增强。

(4)2008 年启动的全矿区范围内的采煤棚户区搬迁工程对于矿区植被的扰动较明显。采煤棚户区搬迁过程中,涉及的人流、物流等要素的大规模流动现象,对矿区植被亦产生一定程度的破坏。2008 年 Moran's I 值降至全阶段最低值,表明植被覆盖度在矿区范围内各处均有不同程度的下降。

(5)2009—2010 年间,矿区植被覆盖度迅速提升,Moran's I 趋于稳定,并且缓慢增长, $G(d)$ 却缓慢下降,并且 $Z(I)$ 和 $Z(d)$ 值呈现震荡的特点。同时,棚户区搬迁后,由于无人耕种,矿区耕地大量减少,多数转化为草地,在 10 月份遥感图像中,农作物已收割,大同地区耕地表现为裸地类型,反映的植被盖度值较低,这也是 2009 年以后矿区 10 月植被盖度上升的原因之一。

3.2 局部效应分析与热点区域的演变

虽然 Global Moran's I 和 Getis-Ord General G 统计指标在一定程度上揭示了矿区植被盖度全局演变特征,但当需要进一步考虑是否存在局部空间集聚时,全局空间自相关往往会掩盖局部状况或小范围的局部不稳定性及不同位置上的空间变异程度,因此当全局关联特征 Global Moran's I 和 Getis-Ord General G 指标不能充分揭示空间依赖性和异质性时,采用局域空间关联指数 Getis-Ord G_i^* 来探测局域空间的集聚程度,识别不同空间位置上的高值簇与低值簇,即热点区与冷点区的空间分布^[22]。选取 2001—2010 年相对于 2000 年的植被覆盖度变化情况作为局域统计指标 Getis-Ord G_i^* 来进一步进行空间关联分析,生成大同矿区植被盖度的空间热点演变图(图 2)。

分析图 2 得出:

(1)从整体来看,2000—2010 年热点区域的整体格局基本保持稳定,但各种类型区的比例随着时间的推移而有所变化(图 3),热点区、较热点区和冷点区、较冷点区的数量逐渐减少,次热点区和次冷点区的数量有所增加,但个别年份变化很大,这说明,处于两极(冷点区和热点区)状态的类型区向中间状态(次热点区和次

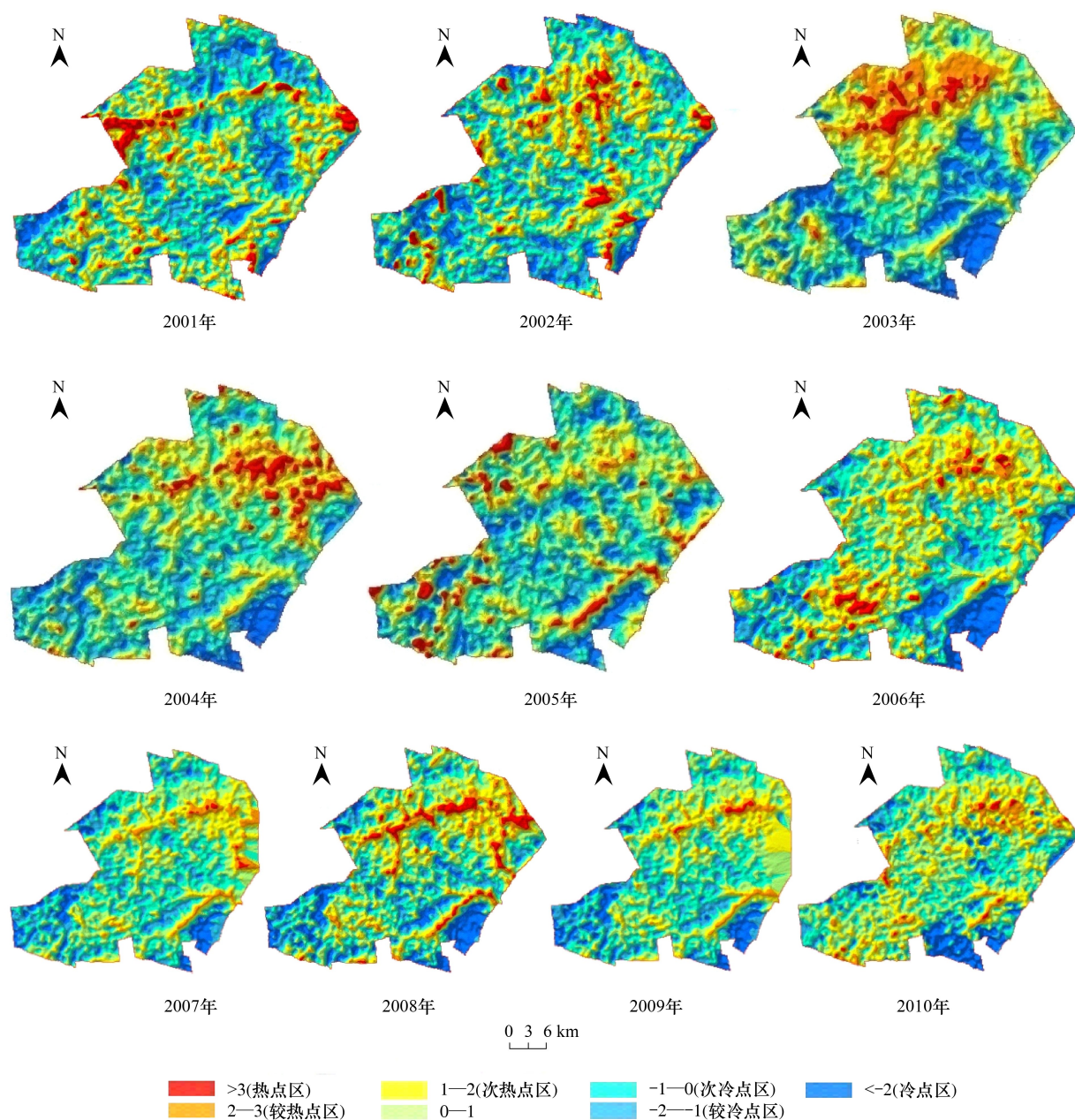


图2 植被覆盖度的演变热点图(相对于2000年)

Fig.2 Hot spots mapping of vegetation coverage (related to year 2000)

由于缺乏同时相的2007年、2009年大同矿区东部遥感数据,图中相应年份该处结果缺失

冷点区)分化,两极状态(热点区和冷点区)的类型区集聚效应越来越弱,极化现象越发不显著,总体上呈离散的态势。

(2)从空间结构上看,2001—2004年,热点区向云冈沟周边地区不断集中,而冷点区逐渐形成了以东南部地区为核心并在其周边地区集聚的势态,2005年以后云冈沟周边的热点区开始减退,又回到以两条沟为轴的热点聚集区,并且分别为次热点区和次冷点区所包围,由此,形成了以两条沟为核心的阶梯状“核心-外围-边缘”结构,并且这种结构显得越来越稳固。热点区集中在固定区域的现象较明显,而这两条沟又是矿区煤炭生产、运输的主轴和居民生活的轴线,各种资源物质相互交织,植被覆盖度变化十分剧烈,这其中又以2008年采煤棚户区搬迁年最为明显,大同矿区绝大部分的棚户区沿口泉沟和云冈沟布局,搬迁活动对沿线植被的扰动量显著,2010年,其空间态势又开始减弱,热点区和冷点区范围较往年明显减小。

(3)从各类型区空间分布变化的格局来看,2001 年热点区沿云冈沟分布,主要集中在燕子山矿附近,而冷点区主要分布在云冈沟两侧,口泉沟及周边极化现象不显著;2002—2006 年,热点区从条带状演化为聚集在云冈沟及两侧的巨大组团;值得注意的是,2008 年全国单体规模最大的矿井——塔山高产矿井(年产量 2×10^7 t)大规模投产后,其所在的口泉沟南侧植被盖度与之前的2004、2006 年相比变化不大,始终处于冷点区,但 2010 年开始有向热点区演化的趋势。

(4) 2001—2010 年,热点区域总体上聚集在矿区的两条发展主轴口泉沟和云冈沟周围,而云冈沟的热点区域范围和热度大于口泉沟,从 2001 年到 2008 年,云冈沟内矿井的煤炭产量始终高于口泉沟,其植被受扰动的剧烈程度也相应较高;2009 年,随着塔山、同忻等高产矿井逐步稳产,口泉沟内煤炭产量超过了云冈沟,但热点区并未产生明显的转移。

植被盖度热点区域的演变探测了各年份矿区植被状况空间结构的局域变化,根据图谱分析,可将大同矿区植被盖度演化分为 3 个典型的阶段:云冈沟两侧的热点集聚阶段(2001—2004 年)、沿轴线演化阶段(2005—2008 年)、热点消退阶段(2009—2010 年),为了研究煤炭开发及相关活动对植被扰动过程中是否存在空间上的不一致性,分别选取 3 个阶段的典型年份 2001—2002 年、2005—2006 年、2009—2010 年,运用 Anselin Local Moran I 对植被盖度的变化进行聚类分析(图 4)。

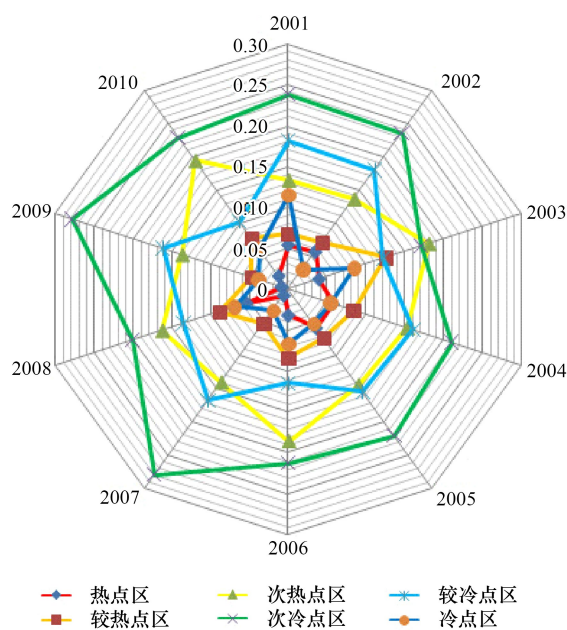


图3 各种集聚类型区比例演化

Fig.3 Revolution of percentage for each centralize type

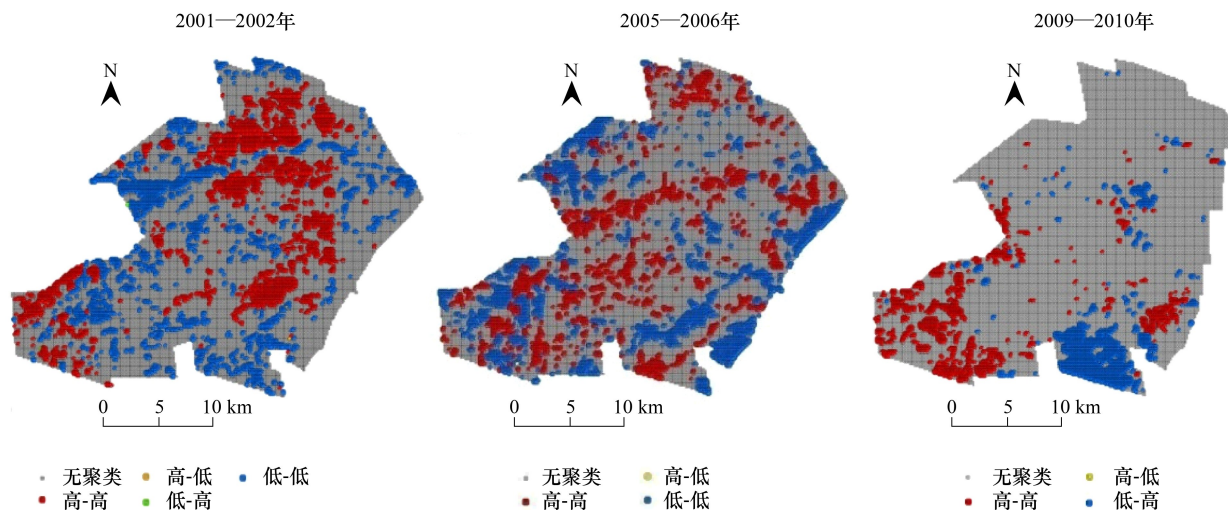


图4 典型年份植被覆盖度变化聚类分析

Fig.4 Clustering analysis of vegetation coverage in typical years

3 个时段各增长单元的集聚类型均发生了变化,2001—2002 年、2005—2006 年呈现明显的集聚效应,而 2009—2010 年聚类效应总体减弱,但在口泉沟南侧却集聚明显。全阶段聚类类型中,基本表现为“高-高”聚类和“低-低”聚类,即植被盖度变化大的地区呈集中分布的特点,几乎未出现异常值,即“高-低”聚类的情况,表明在高强度煤炭开采扰动下,植被遭受的破坏是整体性的。

4 结论

本文综合运用以局部性和空间相关性为主的 GIS 空间分析方法,研究植被这一综合体现矿区生态环境状况的关键因子受以煤炭开发为主的矿区活动扰动的时空效应,对比以往大多单纯基于 NDVI 值的矿区植被演化研究,Global Moran's I 、Getis-Ord General G 、Getis-Ord G_i^* 、Anselin Local Moran I 等空间关联指数在趋势分析等一阶整体效应的基础上,分别从全局演变和局部效应的视角揭示了矿区植被受扰动的时空演化和内在作用机制。

(1) 时序上总体把握及影响因子分析,1999 到 2010 年,大同矿区植被状况以 2003 年和 2006 年为分界点,将植被盖度分为下降阶段、震荡上升阶段和上升阶段,在煤炭开采规模不断加大的过程中,矿区植被状况总体好转,主要存在以下原因:①2003 年煤炭行业经济形势好转,煤矿企业开始重视矿区绿化,大量种植各类树木,积极开展植被修复工程,这是矿区植被盖度总体上升的原因之一。②近年来,煤矿绿色开采技术不断投入实践,新工艺的采用对环境的扰动呈减小趋势。③同时,棚户区搬迁后大量耕地转化为野草地和低矮灌丛,加之人类生活破坏的减少,客观上对植被盖度上升起到一定作用。2003 年以前,煤炭开发和矿区人类活动是植被受扰动较大且破坏明显的主要因素;2003—2008 年,矿区植被受多种因素共同影响,变化波动性较大;2008 年棚户区搬迁以后,种植活动和煤炭开发分别成为影响植被的正负因子。

(2) 全局演变分析,从 Global Moran's I 和 $G(d)$ 变化看,当矿区植被受破坏最严重时,在空间格局上,植被盖度变化相似(高或低)的地区在空间上呈集聚分布状态,表现出很强的空间自相关性,全阶段矿区植被覆盖度最低时,Moran's I 值却达到全阶段最大值,矿区植被受破坏程度呈现高度正相关,而这种相关性在植被恢复期呈减弱的趋势。

(3) 局部效应分析,植被盖度变化的热点区不断减少或向次热点地区分散,矿区植被变化集聚效应越来越弱,总体上呈离散的态势。热点区集中在固定区域的现象较明显。基本表现为“高-高”聚类 and “低-低”聚类,即植被盖度变化大的地区呈集中分布的特点,几乎未出现异常值,即“高-低”聚类的情况,表明在高强度煤炭开采扰动下,植被遭受的破坏是整体性的。

(4) 从煤炭开发与植被受扰动相关性看,2001—2010 年,热点区域总体上聚集在矿区的两条发展主轴口泉沟和云冈沟周围,而云冈沟的热点区域范围和热度大于口泉沟,从 2001 年到 2008 年,云冈沟内矿井的煤炭产量始终高于口泉沟,其植被受扰动的剧烈程度也相应较高,表明煤炭开发对植被的破坏与煤炭产量呈正相关。

(5) 从不同植被类型受扰动效应看,大同矿区植被类型分异明显,山谷内种植有山杨和桦等木本植物,随着海拔的升高,逐渐过渡到以草本和灌丛为主的植被类型,将植被类型与植被覆盖度结合分析,在煤炭开发活动遍及研究区的前提下,对比人类活动均较少的相对高海拔区(矿区西南部地区)和相对低海拔区(云冈沟北部地区),高海拔地区植被覆盖度变化较平缓,草本植物受扰动的程度应低于木本植物。但是,矿区植被受煤炭开发、土壤质量变化、区域气候等多种因素共同影响,势必存在一定的演替规律,在共同作用下的演替机制是下一步研究的重点。

此外,口泉沟南侧一直是扰动效应较轻的区域,近年来投产的塔山和同忻矿井虽然是国内单产最大的井工煤矿,但开采的是埋藏较深的石炭、二叠纪煤炭,对地面环境的影响具有较强的滞后效应,且采用了高效循环经济工艺,力图使煤炭开发和产能对区域环境造成扰动减小到最低,从投产初期看,其对生态环境的扰动量不明显,但煤炭开发对矿区环境的破坏存在累积性和滞后性,其长远扰动效应有待深入研究。

References:

- [1] Fan Y H, Lu Z H, Cheng J L, Zhou Z X, Wu G. Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coal mining areas in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2144-2152.
- [2] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87.
- [3] Xing Z R, Feng Y G, Yang G J, Wang P, Huang W J. Method of estimating vegetation coverage based on remote sensing. *Remote Sensing*

- Technology and Application, 2009, 24(6): 849-854.
- [4] Garcia S, Saura S. Estimating landscape fragmentation indices from satellite images; the effect of sensor spatial resolution. *Proc of the SPIE*, 2004, 52(3): 668-675.
- [5] Wimberly M C, Ohmann J L. A multi-scale assessment of human and environmental constraints on forest land cover change on the Oregon (USA) coast range. *Landscape Ecology*, 2004, 19(6): 631-646.
- [6] Liu L L, Xiao F J. Spatial-temporal correlations of NDVI with precipitation and temperature in Yellow River Basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 477-481.
- [7] Yang J P, Ding Y J, Chen R S. NDVI reflection of alpine vegetation changes in the south Yangtze and yellow rivers. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 467-478.
- [8] Niu B R, Liu J R, Wang Z W. Remote sensing information extraction based on vegetation fraction in Drought and Half-Drought Area. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(1): 27-30.
- [9] Gan C Y, Wang X Z, Li B S. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [10] L L, Ma A Q, Ma Q M. Spatial and temporal variations of vegetation coverage in Coastal Peri-urban Area; a case study of Laoshan District, Qingdao. *Environmental Science and Technology*, 2002, 35(1): 178-185.
- [11] Ji X M, Cheng T, Zheng F. Progress in ecological environment research in peri-urban areas. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1579-1586.
- [12] Hu Z Q, Xie H Q. Study on land use/cover change of coal mining area based on remote sensing images. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(1): 44-48.
- [13] Guo X Y, Zang J T, Gong H L, Zhang G L, Dong Z. Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 763-770.
- [14] Hou H P, Zhang S L, Ding Z Y, Gong Y L, Ma C Z. Study on the measurement of ecological loss based on the net primary productivity in coal mines. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 445-451.
- [15] Wang L, Wei S P, Wang Q J. Effect of coal exploitation on groundwater and vegetation in the Yushenfu Coal Mine. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1408-1414.
- [16] Wu L X, Ma B D, Liu S J. Analysis to vegetation coverage change in Shendong mining area with SPOT NDVI data. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(9): 1217-1222.
- [17] Zhang L F. Main methods discussion of vegetation recovery in mining area of Datong city. *Forestry of Shanxi*, 2009, (3): 29-30.
- [18] Zhao Y S. Principle and Methods of Remote Sensing Application and Analysis. Beijing: Science Press, 2003.
- [19] Duncan J, Stow D, Franklin J, Hope A. Assessing the relation-ship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(18): 3395-3416.
- [20] Carlson T N, Ripley D A. On the Relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [21] Jiang M, Zang X F, S Q, Tong Q X. Vegetation coverage retrieval scale effect analysis using multi-sensor data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 311-315.
- [22] Wang Y F, He H L. Methods of Spatial Data Analysis. Beijing: Science Press, 2007.
- [23] Ma X D, Zhu C G, Ma R H, Pu Y X. Urban spatial growth pattern and its evolution in Suzhou, Jiangsu Province, China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 405-416.

参考文献:

- [1] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 周忠轩, 吴钢. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术. *生态学报*, 2003, 23(10): 2144-2152.
- [3] 邢著荣, 冯幼贵, 杨贵军, 王萍, 黄文江. 基于遥感的植被覆盖度估算方法述评. *遥感技术与应用*, 2009, 24(6): 849-854.
- [6] 刘绿柳, 肖凤劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 477-481.
- [7] 杨建平, 丁永健, 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): 467-478.
- [8] 牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(1): 27-30.
- [9] 甘春英, 王兮之, 李保生. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. *地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [10] 刘林, 马安青, 马启敏. 滨海半城市化地区植被覆盖度的时空变化——以青岛市崂山区为例. *环境科学与技术*, 2002, 35(1): 178-185.
- [11] 季小妹, 陈田, 郑芳. 半城市化地区生态环境研究进展. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1579-1586.
- [12] 胡振琪, 谢宏全. 基于遥感图像的煤矿区土地利用/覆盖变化. *煤炭学报*, 2005, 30(1): 44-48.
- [13] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 张桂莲, 董志. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化. *生态学报*, 2005, 25(4): 763-770.
- [14] 侯湖平, 张绍良, 丁忠义, 公云龙, 马昌忠. 基于植被净初级生产力的煤矿区生态损失测度研究. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 445-451.
- [15] 王力, 卫三平, 王全九. 榆神府煤矿开采对地下水和植被的影响. *煤炭学报*, 2008, 33(12): 1408-1414.
- [16] 吴立新, 马保东, 刘善军. 基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析. *煤炭学报*, 2009, 34(9): 1217-1222.
- [17] 张利芳. 大同市矿区植被恢复主要途径探讨. *山西林业*, 2009, (3): 29-30.
- [18] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [21] 江森, 张显峰, 孙权, 童庆禧. 不同分辨率影像反演植被覆盖度的参数确定与尺度效应分析. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(3): 311-315.
- [22] 王远飞, 何洪林. 空间数据分析方法. 北京: 科学出版社, 2007.
- [23] 马晓冬, 朱传耿, 马荣华, 蒲英霞. 苏州地区城镇扩展的空间格局及其演化分析. *地理学报*, 2008, 63(4): 405-416.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Gross ecosystem product: theory framework and case study OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

Autecology & Fundamentals

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China
Sea in spring MENG Zhaoxui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River
Delta LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia
obovata* seedling ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa*
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

Population, Community and Ecosystem

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting
 CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes
 JI Zijong, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland
 ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land
 MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinping (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land
 CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island
 XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

Resource and Industrial Ecology

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area
 HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 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

本期责任副主编 余新晓

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 33 卷 第 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元