

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

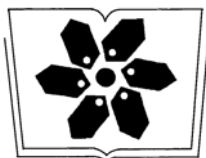
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

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 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

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/stxb201211241666

朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.

Zhu W H, Miao C Y, Zheng X J, Cao G L, Wang F F. Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1379-1390.

基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全 评价与预警研究

朱卫红^{1,2,*}, 苗承玉³, 郑小军^{2,1}, 曹光兰^{2,1}, 王凡凡³

(1. 长白山生物资源与功能分子教育部重点实验室, 延吉 133002; 2. 延边大学 理学院地理系, 延吉 133002;

3. 临邑县第一中学, 临邑 251500)

摘要:图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,该区环境也因此受到了不同程度的干扰和破坏,对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。以图们江流域湿地生态安全为出发点,基于 PSR 模型构建了适合该区域生态环境的生态安全评价指标体系,在 3S 技术支持下,通过解译 1976 年、1990 年、2000 年、2010 年 4 个年份的 TM/MSS 影像,获取了这 4 个时期的景观格局指标数据,并运用层次分析法确定指标权重;在使用逻辑斯蒂增长曲线模型对各个指标进行单指标评价的基础上,使用综合评价法对各个时期的图们江流域湿地生态安全进行评价,最终得到 1976 年、1990 年生态安全值分别为 0.650、0.620,湿地生态系统比较安全,2000 年、2010 年生态安全值分别为 0.536、0.454,湿地生态系统处于预警状态,应及时对该区域湿地生态系统进行保护。基于灰色预测模型构建湿地生态安全预测模型,经检验,模型精度较高,可以进行图们江流域湿地生态安全的预测研究。做出了图们江流域未来 40a 的湿地生态安全预测,分别为 0.3903、0.3345、0.2866、0.2456,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重,急需对本区域湿地生态系统进行保护与管理。

关键词:湿地;生态安全评价;预警;灰色预测;图们江流域

Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology

ZHU Weihong^{1,2,*}, MIAO Chengyu³, ZHENG Xiaojun^{2,1}, CAO Guanglan^{2,1}, Wang Fanfan³

1 Key Laboratory of Natural Resources of Changbai Mountain & Functional Molecules, Yanji Jilin 133002, China

2 Geography Department College of Sciences, Yanbian University, Yanji Jilin 133002, China

3 The First Middle School in Linyi, Linyi Shandong 251500, China

Abstract: Wetlands, forests and oceans form the three global ecosystems. Wetlands are the natural integration of aquatic and semi-aquatic creatures in a wet environment. Wetlands are an important natural resource and one of the most important environments for human survival. They not only offer the raw materials for human life and human production but also play an important role in ameliorating weather conditions, flood storage, and the control and reduction of environmental pollution. Wetlands have thus been called the “kidney of the earth”.

Global and regional problems such as environmental pollution, soil erosion and so on, have become more and more serious with the rapid development of human society. These problems create a serious threat to society, economic

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41361015, 40961011, 41071333);吉林省科技厅国际合作项目(20120740);吉林省科技发展计划项目(20130206007SF)

收稿日期:2012-11-24; 修订日期:2013-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: whzhu@ybu.edu.cn

development and perhaps even human survival. People are discovering it is not military or political activity which threatens to restrict economic development, but ecological crises which are creating long term effects. Also, people are gradually realizing that ecological stability is critical to both broad scale ecosystem integrity and guaranteeing sustainable development. It is the region or country other ecological safety of the carrier and the foundation. The development of human society depends on creating sustainable development with a system which secures the survival of ecological systems. Therefore, the study of ecological sustainability has become a field of concern.

Tumen river is one of the key international rivers in China. The region has already entered into multinational cooperation in developmental stages with the Chinese economy rising rapidly. The environment has been getting interfered with and destroyed in different degrees. This study can provide a scientific basis for sustainable development of ecological environment of the Tumen river basin. In this study, we used the Tumen river watershed wetland ecological security for the purpose built wetland ecology safety evaluation system based on Pressure-Status-Response (PSR) concept model, and got landscape dates of 1976, 1990, 2000 and 2010 by using 3S technology. We used experts' evaluation index combined with AHP evaluation to give the weight and got the final comprehensive evaluation in the use of the logistical growth curve model for each index based on the assessment of a single index. The study finally got the ecological secure values that were respectively 0.650, 0.620 in 1976 and 1990, the ecological system was in a safe state; the ecological secure values were respectively 0.536 and 0.454 in 2000 and 2010, which shows that the ecological system was in a state of early warning. The wetland ecological system should be immediately protected. Based on this, we used the grey prediction model to build a wetland ecological safety prediction model and did accuracy testing for the model. The Simulation error, correlation and the mean square error ratio, and the small error probability were primary concerns but the model accuracy was high enough for the Tumen river wetland ecological safety prediction. Finally this study made a prediction for the Tumen river basin wetland ecological safety for 40 years, the results were respectively 0.3903, 0.3345, 0.2866 and 0.2456. The wetland ecological system was in a moderate warning state and the trend of the situation continued to become more severe. Ecological security threat is very serious and this area needs more protection and management for the wetland ecosystem to survive.

Key Words: wetland; ecological safety evaluation; warning; grey prediction; Tumen river basin

生态安全一般指一个国家或地区的生态环境资源状况能持续满足社会经济发展需要,社会经济发展不受或少受来自于资源和生态环境的制约与威胁的状态^[1]。近年来,在经济持续快速增长的背景下,生态环境发生了深刻变化^[2-3]。随着近几十年来更加剧烈的人类活动影响,全球性和区域性的环境问题日益突出,生态安全问题频频发生。据调查,在我国由于生态灾害和环境污染每年造成的经济损失占国内生产总值的 8.5%—10%,最高可占到当年国内生产总值的 14%^[4]。

最早将环境变化含义明确引入安全概念的是美国学者 LESTER R. BROWN。1981 年,他提出对安全的威胁,来自国与国间关系的较少,而来自人与自然界关系的可能较多^[5]。湿地与森林、海洋并称为全球三大生态系统。湿地不仅是一种重要的自然资

源,也是人类赖以生存的最重要的环境之一,它具有稳定环境、保护物种基因及资源利用等功能,被喻为“地球之肾”^[6]。国外湿地生态安全研究较早,1996 年英国、澳大利亚等国家相继开展了“河流健康计划”,并先后对河流湿地状况进行了评价^[7-9];崔保山等^[10]2002 年对湿地生态系统健康指标体系进行理论研究,奠定了我国湿地生态安全评价的基础;随后,一些学者对辽西大凌河流域、辽河中下游流域,大包山湿地等进行了生态安全评价研究^[11-13]。

区域生态安全是国家稳定与发展的基础,是国防安全的重要保障。区域生态安全评价与预警是当前研究的热点,但其相关理论研究还不够成熟,开展图们江流域湿地生态系统安全评价与预警研究,为该流域生态环境的保护、水资源利用、工农业生产及人民生活提供科学依据,具有十分重要的意义^[14]。

1 研究区概况及研究数据

1.1 研究区概况

图们江流域主要位于吉林省东部的延边朝鲜族自治州境内(图 1),在北纬 $41^{\circ}59'47''$ 至 $44^{\circ}30'42''$,东经 $127^{\circ}27'43''$ 至 $131^{\circ}18'33''$ 之间,地处中、俄、朝三国交界,东临日本海。该地区属于中温带湿润季风气候,季风明显,年平均气温为摄氏 $2-6^{\circ}$ 之间。平均降水量一般为 $400-650\text{mm}$,上游地区达 $1000-1500\text{mm}$,居流域之首;一年中,雨量多集在 6、7、8 月 3 个月,占全年降水量的 60%。图们江两岸湿地丰富、类型多样,特别是图们江上游长白山地区分布着典型的高山苔原湿地和林下泥炭沼泽湿地,中下游分布着河流型、湖泊型和多种人工湿地。这对区域气候变化、经济发展及人类生存环境有着重要的影响,在维护图们江区域生态安全、维持生物多样性等方面发挥着重要作用。由于近年来图们江流域的开发,经济迅速发展、人口增长加快,城市化及交通设施的建设,使周围的生态环境遭受破坏,图们江、嘎呀河、布尔哈通河等重要河流受到污染,农田、建设用地的大量增加,都使得本区域的湿地生态系统受到严重的破坏,急需对本区域进行生态安全评价与预测。因此,结合数据的可获取性,本文选取图们江流域中国一侧为研究区。



图 1 研究区范围

Fig.1 Scope of the study area

1.2 研究数据

1.2.1 数据源

图们江流域地域辽阔,本文以覆盖全区的 Landsat MSS 与 TM 影像为基本数据源,包括 1976 年的 Landsat MSS 影像(轨道号 123/30、124/30、124/31、125/30、125/31),以及 1990 年、2000 年、2010 年

的 Landsat TM 影像(轨道号 114/30、115/30、115/31、116/30、116/31),为方便湿地信息的提取,影像时间均为 6—10 月之间。因为图们江流域地形复杂多样,仅仅运用遥感影像数据并不能准确反映湿地地物类型的分布,本研究引入了地形图、土壤图、水系图、DEM 图等,以及实地野外考察记录来辅助湿地类型的识别等综合解译工作。

1.2.2 数据处理

本文选取研究区范围内的 1:5 万地形图作为基础研究数据,对 Landsat MSS/TM 遥感图像作预处理:

(1)几何校正 以经过几何校正的 1:5 万地形图为准图件,通过控制点校正法对 4 个时期的遥感影像进行几何校正。具体为,在地形图和影像上均匀选取了近 50 个地面控制点,如道路交叉点、大型建筑物角点、保护站等,以 GCS_WGS_1984 坐标系为投影坐标系,采用二次多项式校正法对影像进行几何校正,校正误差在 0.5 个像元以内。

(2)彩色合成 采用 Landsat (MSS) 的 3、2、4 (RGB),Landsat(TM) 的 5、4、3 (RGB) 的波段组合对遥感影像进行彩色合成,合成后的影像将更加接近真实的地物颜色,便于较好地突出图们江流域湿地的景观斑块、植被特征和水体特征。

(3)镶嵌裁切处理 影像镶嵌采用基于地理坐标的镶嵌,然后通过建立掩模对镶嵌后的影像进行裁切处理,掩模范围是整个图们江流域中国一侧,将范围矢量面文件导入到 ENVI4.5 并加载到镶嵌好的影像上,以图们江流域范围矢量面文件为感兴趣区将影像裁切出来,得到研究区 1976 年、1990 年、2000 年、2010 年 4 个年代的遥感影像(图 2—图 5)。

按照图们江流域湿地所处的立地条件,本研究借鉴朱卫红^[15]有关图们江下游湿地分类体系及分布特征研究当中的湿地分类体系,具体内容为将研究区的湿地划分为天然湿地和人工湿地 2 个二级类型,以及河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、水田和其他人工湿地 5 个三级类型。结合野外湿地考察,根据地形图、土壤图、水系图等非遥感数据资料,建立以色调、纹理、形态为基础的解译标志,采用人机交互式解译方法,运用 ArcGIS9.3 软件对校正好的影像进行处理,最终得到 4 个时期图们江流域中国一侧的湿地信息(图 2—图 5);并在此基础上,计算得出 4

个年代的湿地相关数据(表 1)。

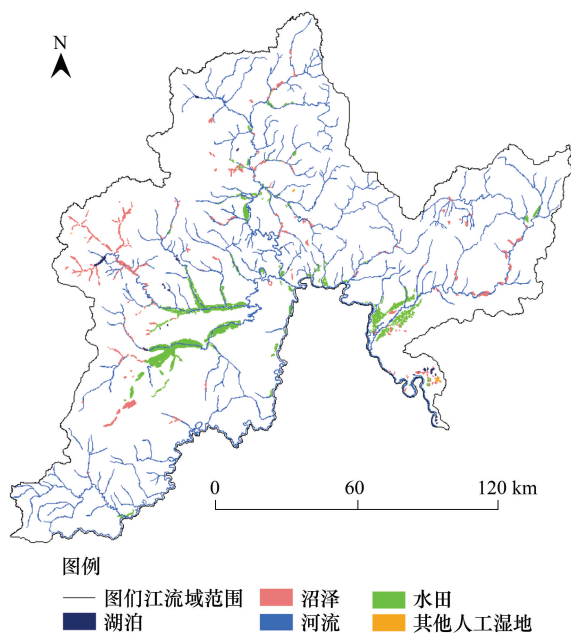


图 2 1976 年湿地分布图

Fig.2 Wetland maps of 1976

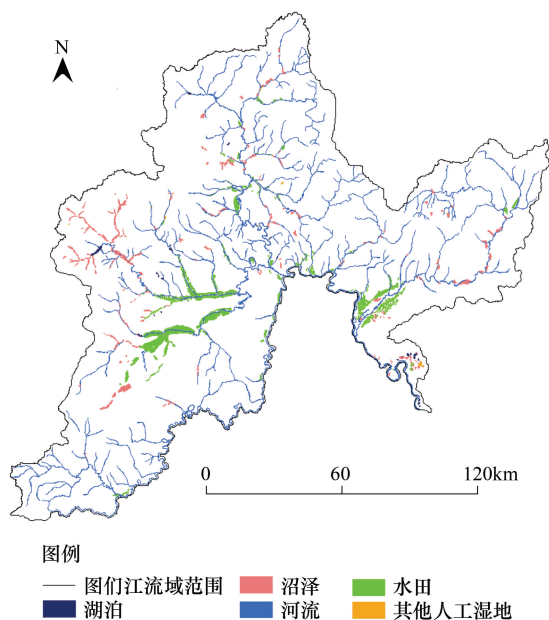


图 3 1990 年湿地分布图

Fig.3 Wetland maps of 1990

2 图们江流域湿地生态安全评价

2.1 基于 PSR 模型的指标体系构建

对于湿地生态系统评价的研究,评价指标建立大都基于 PSR 模型^[16-17]。在研究图们江流域湿地

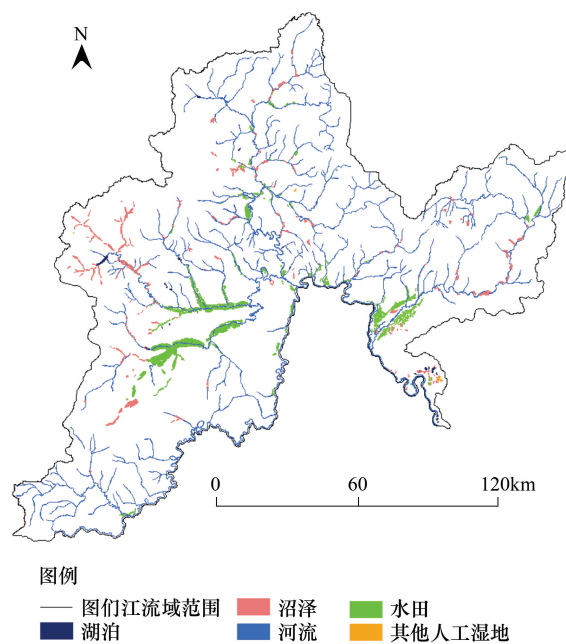


图 4 2000 年湿地分布图

Fig.4 Wetland maps of 2000

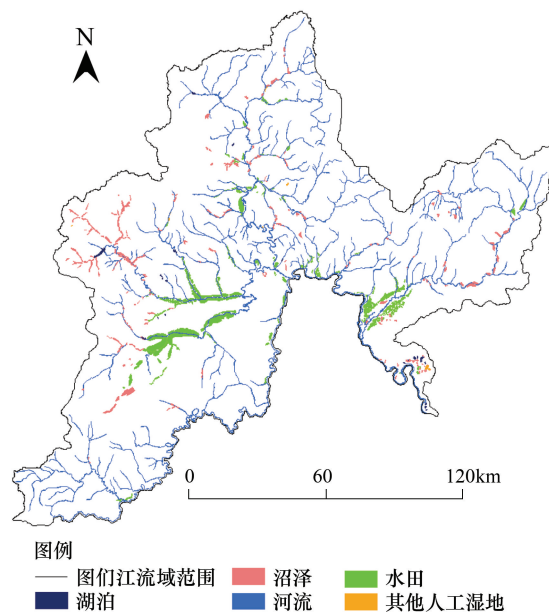


图 5 2010 年湿地分布图

Fig.5 Wetland maps of 2010

生态系统自然特性的基础上,借鉴相关领域专家研究成果,以 PSR 模型为主线,结合指标选取的科学性、系统性、代表性和易操作性原则^[18],构建了图们江流域湿地生态安全评价指标体系(表 2)。

2.2 层次分析法确定指标权重

权重表示在生态安全多指标评价过程中,选取的评价指标在总体评价中相对于评价结果的相对重

要程度,通过一定方法,对各个评价指标进行权重的

表 1 4 个年代湿地信息统计表
Table 1 4 decades statistics of wetlands information

年份 Year	类型 Type		斑块数 Number of patches	面积 Area	年份 Year	类型 Type		斑块数 Number of patches	面积 Area
1976	天然湿地	湖泊	17	398.64	1990	天然湿地	湖泊	28	671.24
		沼泽	157	24066.60			沼泽	318	15124.22
		河流	48	67443.91			河流	65	31443.61
	人工湿地	水田	176	37831.55		人工湿地	水田	870	36890.91
		其他	6	386.44			其他	15	1802.36
	合计		404	130127.14		合计		1296	85932.35
2000	天然湿地	湖泊	14	711.49	2010	天然湿地	湖泊	6	143.36
		沼泽	107	1874.08			沼泽	55	1236.50
		河流	79	22231.52			河流	68	21743.05
	人工湿地	水田	1051	43673.18		人工湿地	水田	1310	29712.05
		其他	41	2805.63			其他	194	4936.63
	合计		1292	71295.89		合计		1633	57771.59

表 2 图们江流域湿地生态安全评价指标体系及权重
Table 2 The wetland ecological safety evaluation assessment index system of the Tumen River basin and weight

目标层 A Object layer	准则层 B Criterion layer	指标层 C Indicators layer	权重值 Weight value
图们江流域湿地生态安全 评价指标体系 The wetland ecological safety evaluation assessment index system of the Tumen River basin	压力指标 B1	人口密度(人/km ²) C11	0.069
		人类干扰指数(km ²) C12	0.139
		景观多样性指数 C21	0.048
	状态指标 B2	平均斑块面积(ha) C22	0.166
		水文调节指数(%) C23	0.025
		初级生产力 C24	0.243
		弹性度指数 C25	0.125
		均匀度指数 C26	0.054
	响应指标 B3	斑块破碎度指数(个/km ²) C31	0.033
		湿地退化指数(%) C32	0.098

设置。本文使用层次分析法^[19],在 PSR 概念模型的指导下,形成 1 个目标,3 个准则,10 个测度指标的指标体系^[20],有效地将指标体系的层次结构建立起来。通过建立递阶层次分析结构,构建两两比较各指标层评价问卷,通过专家问卷法对指标进行两两比较打分,逐渐分析评价指标的关联性和重要程度,进而将定性的问题转化变成定量计算问题,实现生态安全评价指标权重值的确定。构建的矩阵要进一步检验矩阵的一致性,当一致性检验结果 ≤ 0.1 时,表明计算结果对原矩阵具有满意的一致性。

为了获得评价指标数据,本文在景观格局计算软件 Fragstats 3.3 和 SPSS 软件的支持下对评价指标进行计算:

(1) 人口密度指数

人口密度指数=研究区人口数/研究区的面积

(2) 人类干扰指数

城镇建设所占面积,本文主要以建城区、居住区、公共设施用地、工业用地、仓储用地、对外交通用地、道路广场用地、市政公共设施、绿地、特殊用地之和表示;

(3) 景观多样性指数(SHDI)

景观多样性指数是指湿地景观元素或湿地生态系统在结构、功能以及随时间变化方面的多样性,它反映了湿地景观类型的丰富度和复杂度,它的大小反映湿地景观要素多少和各景观要素所占比例的变化:

$$H = - \sum_{K=1}^m (P_K) \log_2(P_K)$$

式中, P_K 为 k 种湿地景观类型占总面积比例, m 为研究区湿地景观类型总数。

(4) 平均斑块面积 (MPS)

平均斑块面积既用来对比不同湿地景观的聚集度或者破碎度,也可用以指示各种湿地景观类型之间的差异。

$$MPS = \frac{S_i}{N_i}$$

式中, S_i 是指第 i 种湿地景观的面积, N_i 是指第 i 种湿地景观的斑块个数。

(5) 水文调节指数

$$\text{水文调节指数} = \frac{\text{河流面积} + \text{滩地面积}}{\text{湿地总面积}}$$

(6) 初级生产力指数

经研究表明,初级生产力与 NDVI 具有明显的正相关,因此,选用研究区内的 NDVI 平均值作为衡量初级生产力的主要指标:

$$NDVI = \frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3}$$

(7) 弹性度指数

弹性度是度量生态系统健康的一个标准,健康的湿地生态系统具有弹性,当湿地生态系统受到压力胁迫后,有能力保持结构和功能的稳定性:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \times F_i}{S}$$

式中, S_i 为第 i 类湿地面积, F_i 为第 i 类湿地的弹性度分置, S 为研究区总面积。

(8) 均匀度指数 (SHEI)

均匀度则反映湿地景观中各斑块在面积上分布的不均匀程度,其值越大,表明景观各组成成分的分配越均匀:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \log_2 P_k}{\log_2 n}$$

式中, P_K 是斑块类型 K 在湿地景观中的比例, n 为研究区中景观类型的总数。

(9) 斑块破碎度指数

$$C = \frac{\sum N_i}{\sum A_i}$$

式中, $\sum N_i$ 为湿地景观斑块总个数; $\sum A_i$ 为湿地景观的总面积。

(10) 湿地退化指数

$$\text{湿地退化指数} = \frac{\text{湿地减少的面积}}{\text{原始湿地总面积}}$$

2.3 单因子评价

逻辑斯蒂增长曲线模型又称自我抑制型曲线,是 20 世纪 20 年代 Lotka 和 Volterra 在种群生态学中的总群数量增长过程的研究中提出的,至今应用仍比较广泛。因为湿地生态安全评价中各个指标的测试值并不是线性的反映出湿地生态安全中各个方面和层次状态的水平,林茂昌、李永健^[21-22]使用此模型分别对闽江河口区湿地、拉鲁湿地生态系统健康进行了单因子评价:

$$P = \frac{1}{1 + e^{(a-b \times R)}} \quad (1)$$

式中, P 表示单项指标的生态安全评价指标评价价值, R 表示单项指标测度值。 a 、 b 均为常数,确定方法为:当 $R = 0.01$ 时, P 的值近似取 0.001;当 $R = 0.99$ 时, P 的值近似取 0.999,则此时方程中的 a 和 b 的值求解分别为 4.595 和 9.19,因此,单项指标评价模型最终为:

$$P = \frac{1}{1 + e^{(4.595 - 9.19 \times R)}} \quad (2)$$

$$P = 1 - \frac{1}{1 + e^{(4.595 - 9.19 \times R)}} \quad (3)$$

通过对研究区 2000 年、2010 年遥感影像的解译以及 2001 年、2011 年延边统计年鉴信息的提取,得到 2000 年、2010 年 2 个年份的图们江流域湿地 10 个单因子指标数据,如表 3 所示。

在单因子评价中,对于指标量值增加与生态环境质量的增加方向相同时的单项指标采用公式 2 来求得单因子指标评价价值;当单项指标量值的增加方向与生态环境质量增加方向相反时,采用公式 3 进行评价。经过计算得出各单项指标的生态安全指数评价价值(表 4)

2.4 生态安全综合评价

根据上述计算所得到的指标权重及单项指标评价价值,本文采用综合评价法计算图们江流域湿地生态安全度的等级。公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^{10} W_i \times X_i$$

式中, I 为研究区湿地生态安全最终得分, X_i 为单因子指标得分, W_i 为各因子指标权重。根据相关研究^[23],研究区湿地生态系统整体的生态安全度依次划分为 5 个标准,分别是安全($0.8 \leq I < 1.0$)、比较安全($0.6 \leq I < 0.8$)、预警($0.4 \leq I < 0.6$)、中度预警(0.2

$\leq I < 0.4$)、严重预警($0 \leq I < 0.2$) 5 个等级。通过综合评价法计算出研究区湿地生态安全值,从而得到了图们江流域湿地生态安全定量化评价,评价结果见表 4。

表 3 2000 年和 2010 年单项指标测度值

Table 3 Single measure values in 2000 and 2010

指标因子 Indicators factor	2000	2010 年	测度值 Measure values	备注 Remarks
人口密度 Population density/(人/km ²)	64.29	55.92	0.13	人口密度下降了 13%
人类干扰指数 Human interference index/km ²	179.38	170.53	0.05	人类干扰指数下降了 5%
景观多样性指数 Landscape diversity index	1.07	0.83	0.22	景观多样性下降了 22%
平均斑块面积 Average patch area/hm ²	54.59	35.38	0.35	平均斑块面积减少了 35%
水文调节指数 Hydrological adjusting index/%	0.31	0.38	0.23	水文调节指数增加了 23%
初级生产力 Primary productivity	0.23	0.11	0.52	NDVI 平均值降低了 52%
弹性度指数 Elastic index	0.59	0.61	0.03	弹性度升高了 3%
均匀度指数 SHEI	2.48	1.93	0.22	均匀度下降了 22%
斑块破碎度 Patch fragmentation/(个/km ²)	1.83	2.83	0.55	斑块破碎化增加了 55%
湿地退化指数 Wetland degradation index/%	712.96	577.72	0.12	湿地面积减少 135.24km ² , 占原来湿地面积的 12%

表 4 2010 年湿地生态安全综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation result of the wetland ecological safety evaluation in 2010

指标因子 Indicators factor	指标测度值(R) Indicators measure values	单项评价价值(X_i) Individual values	单项权重(W_i) Single weight	综合评价结果(I) Results of Comprehensive evaluation
人口密度/(人/km ²)	0.13	0.032	0.069	0.454
人类干扰指数/km ²	0.05	0.016	0.139	
景观多样性指数	0.22	0.926	0.048	
平均斑块面积/hm ²	0.35	0.796	0.166	
水文调节指数/%	0.23	0.074	0.025	
初级生产力	0.52	0.450	0.243	
弹性度指数	0.03	0.014	0.125	
均匀度指数	0.22	0.928	0.054	
斑块破碎度/(个/km ²)	0.55	0.395	0.033	
湿地退化指数/%	0.12	0.988	0.098	

2.5 上、中、下游对比分析

以图们江沿岸南坪镇、甩弯子为图们江上、中、下游的分界点,根据图们江流域水系分布图、土壤图以及高程图的综合分析,将图们江流域划分为上游地区、中游地区和下游地区,分别对上、中、下游湿地进行生态安全评价,并进行对比分析,可以更加客观的揭示图们江流域的湿地生态安全状况。根据上文对于图们江流域湿地综合评价方法,依次对上、中、下游进行生态安全评价。通过计算得到,2010 年图

们江流域上游地区、中游地区、下游地区的湿地生态安全评价价值分别为 0.525、0.333、0.449(表 5)。其中,上游地区、下游地区处于预警状态,中游地区处于中度预警状态,从地区湿地生态安全状况来看,上游地区 > 下游地区 > 中游地区。图们江流域上游地区主要位于延边朝鲜族自治州和龙市境内,湿地生态安全值为 0.525,处于预警状态,且比较接近比较安全状态,由于距离长白山较近,地势相对较高,而且落差较大,该区人口密度相对较小,湿地生态系统

受人类的干扰较小,自然景观保存相对比较完整,湿地生态功能相对比较完善,生态系统虽也遭受一定的破坏,但是生态系统尚可以维持。图们江流域中游地区主要位于延边朝鲜族自治州内的延吉市、龙井市、图们市和汪清县境内,湿地生态安全值为 0.333,处于中度预警状态,由于延吉市一直以来是延边州的经济、政治和文化中心,人口压力较大,土地开发利用较多,使得本地区的湿地生态系统受到相当严重的破坏,景观破碎,湿地生态功能退化,对

外界的干扰反应比较敏感,是图们江流域湿地生态安全值最低的地区。图们江下游地区主要位于延边朝鲜族自治州珲春市内,湿地生态安全值为 0.449,处于预警状态,且接近于中度预警状态,由于下游地区敬信镇防川村特殊的自然地理位置,该区旅游业发达,基础设施建设与农业开发使得本地区湿地自然景观受到一定的破坏,生态系统活力表现衰退,湿地生态功能有一定的退化,但生态系统尚可维持。

表 5 2010 年图们江上、中、下游湿地生态安全评价结果

Table 5 Evaluation results of wetland ecological safety in the tumen river upstream, midstream, downstream in 2010

研究区域 Study area	指标因子 Indicators factor	指标测度值(R) Indicators measure values	单项评价价值(X_i) Individual values	单项权重(W_i) Single weight	综合评价结果(I) Results of Comprehensive evaluation
上游地区 Upstream region	人口密度	0.12	0.970	0.069	0.525
	人类干扰指数	0.06	0.017	0.139	
	景观多样性指数	0.22	0.929	0.048	
	平均斑块面积	0.59	0.696	0.166	
	水文调节指数	0.13	0.032	0.025	
	初级生产力	0.71	0.873	0.243	
	弹性度指数	0.05	0.016	0.125	
	均匀度指数	0.22	0.928	0.054	
	斑块破碎度	0.59	0.696	0.033	
	湿地退化指数	0.23	0.923	0.098	
中游地区 Middlearea	人口密度	0.02	0.988	0.069	0.333
	人类干扰指	0.17	0.046	0.139	
	景观多样性指数	0.30	0.863	0.048	
	平均斑块面积	0.38	0.751	0.166	
	水文调节指数	0.32	0.161	0.025	
	初级生产力	0.59	0.304	0.243	
	弹性度指数	0.04	0.014	0.125	
	均匀度指数	0.29	0.862	0.054	
	斑块破碎度	0.61	0.733	0.033	
	湿地退化指数	0.26	0.900	0.098	
下游地区 Downstream region	人口密度	0.05	0.984	0.069	0.449
	人类干扰指	0.09	0.023	0.139	
	景观多样性指数	0.16	0.958	0.048	
	平均斑块面积	0.41	0.696	0.166	
	水文调节指数	0.03	0.013	0.025	
	初级生产力	0.47	0.432	0.243	
	弹性度指数	0.02	0.012	0.125	
	均匀度指数	0.15	0.957	0.054	
	斑块破碎度	0.69	0.851	0.033	
	湿地退化指数	0.005	0.988	0.098	

2.6 评价结果分析

根据本文的研究方法及评价指标体系对 2010 年图们江流域湿地生态安全现状进行定量评价,综合评价结果为 0.454,处于预警状态,即湿地生态系统自然状态受到一定的影响,结构发生一定程度的变化,受人类活动影响较大,接近湿地生态阈值,系统尚稳定,但敏感性强,湿地生态系统可维持,但已有少量的生态异常出现,主要表现为:污水处理率低,水质差、富营养化程度严重,自然湿地面积退化,生物多样性下降,水禽栖息地破坏,景观多样性差,斑块破碎化严重,系统的外部胁迫力较大,功能有所下降,湿地不合理的开发,湿地受保护水平较低。由此可见影响湿地生态健康的因子既有湿地自身生态过程,也有人类活动作用。

2.6.1 自然因素

湿地动态变化与气候的变化有紧密联系。据 2011 年延边统计年鉴资料统计,1960 年以来图们江地区气温总体趋势是逐渐升高的,近 50 年来年均气温增长 2.27℃,气温的变化会影响水面的蒸发过程;大气降水是湿地的主要补给水源,然而近 50a 来该地区降水量减少 127.4 mm。总之,近 50 年来,图们江地区年平均气温呈升高趋势,年平均降水量呈降低趋势,气候在总体上从“冷湿”向“暖干”过渡。气温和降水共同制约着湿地植物的生长状况及初级生产力水平;在多雨期容易出现时间短、雨量大,从而造成洪涝灾害,通过破坏湿地的水文、土壤、生物等因素,对湿地系统产生较大胁迫压力,最终导致部分湿地退化,湿地系统结构的完整性及功能的稳定性受到破坏,极大地制约着整个湿地生态系统的安全。

2.6.2 人文因素

(1) 人口压力

半个多世纪以来,随着图们江流域相对安定的环境和丰富的土地资源,大量的人口涌向延边州,导致本地区人口的快速增加。据延边州统计年鉴统计,1978 年近 176 万,1990 年近 207 万,2000 年 218.4 万,2009 年约 219 万。特别是图们江中游延龙图城市一体化的建立,以及珲春市将发展成为东北亚核心区域城市,加大对外开放的力度,吸引国内及俄罗斯、韩国等周边国家居民对该地区的建设和发展。图们江地区的城市化进程大大加快,人口大量增加,给该地区的土地利用和湿地生态环境带来

巨大的压力。

(2) 水利工程修建

据延吉市志和珲春市志介绍,2003 年,在图们江中游延吉市郊区的海兰江建立民俗文化村和高尔夫球场,把海兰江下游人为的拦截,形成海兰湖。在朝阳河、海兰江上游分别建设五道水库和大新水库,使河流的流量减少;1982 年,在图们江下游敬信镇人为的建设龙山水库,拦截水源使得圈河下游及周围的水利联系减少乃至被切断,切断了内流区的外泄通道,导致原先湖泊萎缩、沼泽化,而沼泽湿地则变干,加剧了天然湿地的破坏。

(3) 经济因素

20 世纪 80 年代中期以来,图们江地区湿地变化受经济因素影响比较突出,在该地区的农业产业结构中,种植业的收益远远大于畜牧业和林业,加上由于 90 年代粮食价格上涨,一些天然的湿地被迅速开垦为农田。农业活动是该地区天然湿地减少的主要因素。过度开垦排干沼泽,图们江下游敬信地区的几个泡子遭到当地居民的围垦,导致潜水泡沼消失和当地湿地生态系统退化。

3 图们江流域湿地生态安全预警研究

依据上文所述图们江流域 2010 年湿地生态安全计算方法,分别计算出 1976 年、1990 年、2000 年的生态安全综合评价结果,分别为 0.650、0.620、0.536,由此可见,图们江流域湿地生态安全有由预警状态向中度预警发展的趋势。利用 1976 年—2010 年的图们江流域湿地生态安全综合指数,采用灰色系统预测方法,构建 GM(1,1) 模型,实现对图们江流域湿地生态安全状态的预测。

3.1 预测模型构建

数列预测的基础,是基于累加生成的数列的 GM(1,1) 模型。根据邓聚龙^[24]有关灰色预测的介绍,及以上对各个时期湿地生态安全的计算,得到原始数列:

$$\begin{aligned} X^{(0)} &= (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4)) \\ &= (0.6504, 0.6198, 0.5359, 0.4359) \end{aligned}$$

其时间响应式为:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(1)}(k+1) = -4.33535e^{-0.154387k} - 4.98575 \\ \hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \end{cases}$$

3.2 预测模型精度检验

模型的选择不是一成不变的。一个模型要经过

多种检验才能判定其是否合理,是否有效。只有通过检验的模型才能用作预测模型。

3.2.1 相对误差

由预测模型得原始数列的模拟序列:

$$\hat{X} = (\hat{x}(1), \hat{x}(2), \hat{x}(3), \hat{x}(4)) \\ = (0, 0.6202, 0.5315, 0.4555)$$

平均相对误差:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{n_4} \Delta_k = 0.003095 < 0.01$$

模拟误差 $\Delta_4 = 0.003525 < 0.01$, 根据表 4 可知, 精度为一级。

3.2.2 关联度

$$\varepsilon = \frac{1 + |s| + |\hat{s}|}{1 + |s| + |\hat{s}| + |\hat{s} - s|} \\ = \frac{1 + 1.70695 + 1.68665}{1 + 1.70695 + 1.68665 + 0.01930} \\ = 0.995626 > 0.90$$

所以关联度为一级。

3.2.3 均方差比

均方差比 C :

$$C = \frac{S_2}{S_1} = \frac{0.002592296}{0.076626} = 0.03383 < 0.35$$

均方差比值为一级。

3.2.4 小误差概率

小误差概率:

$$p = P(|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745S_1) = 1 > 0.95$$

小误差概率为一级。

故可用:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(1)}(k+1) = -4.33535e^{-0.154387k} + 4.98575 \\ \hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \end{cases}$$

进行预测。这里给出 4 个预测值如下:

$$\hat{X}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(5), \hat{x}^{(0)}(6), \hat{x}^{(0)}(7), \hat{x}^{(0)}(8)) \\ = (0.3903, 0.3345, 0.2866, 0.2456)$$

4 结论与展望

本研究以图们江流域湿地生态安全为出发点, 基于 PSR 模型构建了适合该区域生态环境的生态安全评价指标体系, 在 3S 技术和统计年鉴的支持下, 获取了 1976 年、1990 年、2000 年、2010 年 4 个年份的景观格局指标数据, 并运用层次分析法确定指标权重; 在使用逻辑斯蒂增长曲线模型对各个指标进

行单指标评价的基础上, 使用综合评价法对各个时期的图们江流域湿地生态安全进行评价, 最终得到 1976 年、1990 年生态安全值分别为 0.650、0.620, 等级为比较安全, 2000 年、2010 年生态安全值分别为 0.536、0.454, 为预警状态, 应及时对该区域湿地生态系统进行保护。

表 6 灰色预测精度检验等级表

Table 6 Grey forecasting precision inspection level

精度等级 Accuracy grade	指标临界值 Index critical value			
	相对误差 α	关联度 ε_0	均方差比值 C_0	小误差概率 p_0
一级 1 st Level	0.01	0.90	0.35	0.95
二级 2 nd Level	0.05	0.80	0.50	0.80
三级 3 rd Level	0.10	0.70	0.65	0.70
四级 4 th Level	0.20	0.60	0.80	0.60

相对误差 Relative error; 关联度 Relevancy; 均方差比值 Mean square error ratio; 小误差概率 Small error probability

在获取 4 个年份湿地生态安全值的基础上, 本研究基于灰色预测 $GM(1,1)$ 模型构建湿地生态安全预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = -4.33535e^{-0.154387k} - 4.98575$$

并进行模型精度检验, 经检验, 模拟误差为 $0.003525 < 0.01$, 精度为一级; 关联度为 $0.995626 > 0.90$, 关联度为一级; 均方差比为 $0.03383 < 0.35$, 均方差比为一; 小误差概率为 $1 > 0.95$, 小误差概率为一。由此可见, 模型精度较高, 可以作为图们江流域湿地生态安全的预测模型。本研究做出了图们江流域未来 40a 的湿地生态安全预测, 分别为 2020 年为 0.3903, 2030 年为 0.3345, 2040 年为 0.2866, 2050 年为 0.2456 (图 6), 均为中度预警状态, 并有向重度预警发展的趋势, 生态安全面临的威胁越来越严重。

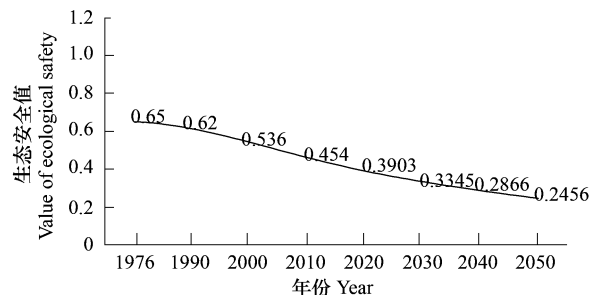


图 6 图们江流域湿地生态安全值模拟及预测

Fig.6 The predictive value of tumen river watershed wetland ecological safety

在图们江地区大开发的背景下,为了能使湿地生态环境和经济建设协调发展,政府应健全相应的法律法规,保证湿地生态保护有法可依;及时治理水污染,限制排污企业的日排水量;设立湿地保护区,保护现有湿地不受破坏;积极修复轻微受损的湿地,改善生态环境;加强科技、资金投入,引导高等院校、科技部门进行湿地生态系统安全研究;大力宣传教育,提高民众保护湿地生态系统的自觉性。

本研究在项目组大量前期工作的基础上,结合 PSR 模型和灰色预测模型对图们江流域湿地生态安全评价和预警进行了深入研究。但是,因为每种模型都有自己的缺陷,湿地生态系统更是一个非常复杂的系统,不可能仅仅依靠几个模型就可以完全描述,加上研究数据的可获取性、研究方法的制约等,还需建立和健全湿地生态安全评价和预警的方法体系。图们江流域这种大尺度的研究区域,生态系统非常复杂,涉及到自然、社会、经济等各个方面的内容,单靠一个学科的知识很难全面描述其特点和规律。因此,今后的研究要从多层次、多角度方面开展湿地生态安全评价与预警研究。

References:

- [1] Qu G P. The problems of ecological environmental have become a popular subject of country safety. *Environmental Conservation*, 2002, (5): 3-4.
- [2] Schmitz O J. Restoration of ailing wetlands. *PLOS Biology*, 2012, (1): e1001248, doi: 10.1371/journal.pbio.1001248.
- [3] Lin J, Song G, Song S M. Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security: a case study of Jiansanjiang land reclamation area. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 5918-5927.
- [4] Cao W. *Introduction to Urban Ecological Security*. Beijing: China Building Industry Press, 2004: 15-26.
- [5] DOBSON A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 277(5325): 515-522.
- [6] Lü X G, Liu H Y. *The Protection and Management of Wetland Ecosystems*. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 6-11.
- [7] Alvarez-Miñes G, Irvine K, van Griensven A, Arias-Hidalgo M, Torres A, Mynett A E. Relationships between aquatic biotic communities and water quality in a tropical river-wetland system (Ecuador). *Environmental Science & Policy*, 2013, 5(3): 1-13. doi: 10.1016/j.envsci.2013.01.011
- [8] SCHOFIELD N J, DAVIES P E. Measuring the health of our rivers. *Water*, 1996, (5/6): 39-43.
- [9] Rapport D J. Sustainability science: an ecohealth perspective. *Sustainability Science*, 2007, 2(1): 77-84.
- [10] Cui B S, Yang Z F. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands I. A theoretical framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1005-1011.
- [11] Wang H C, Wei J, Jiang P, Wu G. Ecological security assessment of Daling River watershed in West Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2426-2430.
- [12] Huang N, Liu D W, Wang Z M. Ecological security in the middle and lower reaches of the Liaohe river. *Resources Science*, 2008, 30(8): 1243-1251.
- [13] Gao X G, Wang L, Qi D H, Chen J D, Wang S M, Zhang F S. Eco-security evaluation of wetland based on PSR model: taking Dashanbao wetland as an example. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2013, 36(2): 86-90.
- [14] Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 354-358.
- [15] Zhu W H, Nan Y, Liu Z F, Wang Q, Cheng H S, Junichi I, Yukihiro M. Study on wetland classification and distribution in the Tumen River lower stream area based on 3S technologies. *Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 39(3): 106-113.
- [16] Wei X P. Ecological safety evaluation of three gorges reservoir area in Chongqing with the pressure-state-response model. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1095-1099.
- [17] Lin J Y, Lin T, Cui S H. Quantitative selection model of ecological indicators and its solving method. *Ecological Indicators*, 2012, 13(1): 294-302.
- [18] Li P W, Li G C, Zhang J H, Li Z H, Xu F. Ecological security assessment and prediction for Shenzhen. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 245-252.
- [19] Zhu W H, Guo Y L, Sun P, Miao C Y, Cao G L. Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6609-6618.
- [20] Pinto R, Patrício J, Baeta A, Fath B D, Neto J M, Marques J C. Review and evaluation of estuarine biotic indices to assess benthic condition. *Ecological Indicators*, 2009, 9(1): 1-25.
- [21] Lin M C. *Assessment of Wetland Eco-Environment Quality of the Estuary of Minjiang River Based on RS and GIS [D]*. Fuzhou: Fujian Normal University, 2005.
- [22] Li Y J. *Research on Methodology of Landscape Ecology Applied in Eco-environmental Quality Assessment of Lulu-marsh [D]*. Chengdu: Sichuan University, 2002.
- [23] Li Y Z, Liu Y, Yan X P. A DPSIR-based indicator system for ecological security assessment at the basin scale. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(6): 971-981.
- [24] Liu S F, Deng J L. The range suitable for GM (1, 1). *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000, 20(5): 121-124.

参考文献:

- [1] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态环境问题已经成为国家安全的热门话题. 环境保护, 2002, (5): 3-4.
- [3] 林佳, 宋戈, 宋思铭. 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例. 生态学报, 2011, 31(20): 5918-5927.
- [4] 曹伟. 城市生态安全导论. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 15-26.
- [6] 吕宪国, 刘红玉. 湿地生态系统保护与管理. 北京: 化学工业出版社, 2004: 6-11.
- [9] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论. 生态学报, 2002, 22(7): 1005-1011.
- [11] 王宏昌, 魏晶, 姜萍, 吴钢. 辽西大凌河流域生态安全评价. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2426-2430.
- [12] 黄妮, 刘殿伟, 王宗明. 辽河中下游流域生态安全评价. 资源科学, 2008, 30(8): 1243-1251.
- [13] 高兴国, 王磊, 齐代华, 陈家德, 王世敏, 张福生. 基于 PSR 模型的湿地生态安全评价——以大山包湿地为例. 湖南师范大学自然科学学报, 2013, 36(2): 86-90.
- [14] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [15] 朱卫红, 南颖, 刘志锋, 王琪, 程火生, 今西纯一, 森本幸裕. 基于 3S 技术的图们江下游湿地系统分类及分布特征研究. 东北师范大学学报: 自然科学版, 2007, 39(3): 106-113.
- [16] 魏兴萍. 基于 PSR 模型的三峡库区重庆段生态安全动态评价. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1095-1099.
- [18] 李佩武, 李贵才, 张金花, 李子鹤, 徐凤. 深圳城市生态安全评价与预测. 地理科学进展, 2009, 28(2): 245-252.
- [19] 朱卫红, 郭艳丽, 孙鹏, 苗承玉, 曹光兰. 图们江下游湿地生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(21): 6609-6618.
- [21] 林茂昌. 基于 RS 和 GIS 的闽江河口区湿地生态环境质量评价 [D]. 福州: 福建师范大学, 2005.
- [22] 李永健. 拉鲁湿地生态环境质量评价的景观生态学方法应用研究 [D]. 成都: 四川大学, 2002.
- [23] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(6): 971-981.
- [24] 刘思峰, 邓聚龙. GM(1, 1) 模型的适用范围. 系统工程理论与实践, 2000, 20(5): 121-124.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《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 薛建辉

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 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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