

# 基于突变基数法的辽河重污染支流生态安全研究

汤洁, 刘岩岩, 王博, 林晓晟, 张爱丽

(吉林大学 环境与资源学院, 长春 130012)

**摘要:**针对流域生态安全研究的复杂性和重要性,选取吉林省辽河重污染支流——招苏台河流域作为研究区,应用突变理论中的突变基数法,结合压力—状态—响应框架结构建立了招苏台河流域生态安全突变模型。研究了 2004 年、2008 年、2010 年流域内 8 个乡镇的生态安全状况。研究区 2010 年生态安全状况总体较 2008 年呈下降趋势,3 个乡镇生态安全处于较好等级,3 个乡镇处于预警等级,2 个乡镇已降至中警等级。流域生态安全下降的情况应引起足够重视,在采取增加环境保护资金投入和乡镇污水处理厂建设等有效措施,提高生态安全等级的前提下,才能实现流域社会、经济、环境的可持续发展。

**关键词:**突变理论;突变基数法;招苏台河流域;生态安全;空间格局分布

**中图分类号:**X522

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)03-0251-05

## Research for Ecological Security of the Heavily Polluted Tributary of Liaohe Based on Catastrophe Progression Method

TANG Jie, LIU Yan-yan, WANG Bo, LIN Xiao-sheng, ZHANG Ai-li

(College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** According to the characteristics of complexity and importance of research on ecological security of river basin, this article chose heavily polluted tributary Zhaosutai River basin of Liaohe in Jilin Province as the study area. Based on catastrophe progression method, and combining with the Pressure-State-Response framework, the ecological security catastrophe progression model of Zhaosutai River basin was built, analysis on the ecological security situation of 8 townships in the river basin in the year of 2004, 2008 and 2010 was carried out. Results show that the ecological security of the study area in 2010 decreased compared with the year of 2008. Among them, ecological security of 3 townships is at a better level; 3 townships are at the early warning of ecological security level; the other is at the moderate level of alert. Attention should be paid to the decline of ecological security of basin. The relevant departments should take effective measures to improve the level of ecological security of Zhaosutai River basin in order to realize the sustainable development of the basin of the society, economy, environment such as increase of environmental protection investment, building township sewage treatment plant and so on.

**Key words:** catastrophe theory; catastrophe progression method; Zhaosutai River basin; ecological security; spatial pattern

生态安全是指能够维持和保障人类社会可持续发展,同时不损害和威胁生态系统本身健康和完整性的生态系统状态,是人与自然环境达到高度和谐的状态<sup>[1-2]</sup>。生态安全具有双重含义,首先是生态系统本身安全,其结构没有受到破坏;其次是生态系统状态安全,能保障人类社会和经济的发展,生态系统所提供的服务能满足人类生存需要。只有这双重含

义都得到满足才认为达到了生态安全的程度<sup>[3]</sup>。

生态安全已经同国家安全和经济安全并称为国家的“三大安全”。生态安全研究是当前环境、资源可持续利用研究的前沿课题<sup>[4]</sup>,是可持续发展研究的核心之一。在众多生态系统类型中,流域生态系统由于其复杂的特点,已引起人们的高度关注<sup>[5]</sup>,但关于流域生态安全状况的研究仍然较少。

随着突变理论研究的深入,突变级数法在研究系统发生不连续变化的现象时应用较好,李艳<sup>[6]</sup>,魏婷等<sup>[7]</sup>运用突变级数法对生态系统健康进行了研究,黄玉平等<sup>[8]</sup>运用此方法评价了城市土地利用生态适宜度,徐美等<sup>[9]</sup>运用突变理论对土地生态安全格局进行了研究,李发荣等<sup>[10]</sup>采用突变级数法对我国西部城市环境承载力进行了研究,更多的学者<sup>[11-12]</sup>应用此法在灾害预测和预警方面做了较多、较深入的研究,但在流域生态安全方面的研究很少。

辽河流域自“九五”以来就是我国重点治理的“三河”之一。虽然经过多年的治理,但是污染状况仍未得到根本改善,严重制约了流域经济社会发展,威胁着下游 300 多万人的饮水安全。本文拟通过对吉林省辽河的重污染支流——招苏台河流域生态安全研究,以期对流域环境管理和决策提供科学依据,从而实现区域经济的可持续发展和经济效益、环境效益、社会效益的和谐统一。

## 1 研究区概况

招苏台河是吉林省辽河流域的重要支流之一,发源于梨树县三家子乡相屯土们岭,在辽宁省昌图区通江口附近汇入辽河,在吉林省境内河长 103 km,流域面积为 1 147 km<sup>2</sup>。流域处于松辽平原中部,兼有低山、丘陵和平原,海拔高程 611~120 m,属温带大陆性季风气候,四季分明。河流多年平均径流量为 0.455 亿 m<sup>3</sup>,主要由降雨补给,年内季节性变化明显,枯水期流量减少明显,有些河段甚至断流。水质整体较差,2010 年三个监测断面水质均为劣 V 类。天然径流量较小且分布不均,自净能力差。1999—2010 年,流域所在的梨树县人口密度在 200 人/km<sup>2</sup> 左右,最低的 2005 年也达到了 196 人/km<sup>2</sup>,远高于联合国提出的在半干旱的农牧区人口密度不应大于 20 人/km<sup>2</sup> 的人口密度标准,巨大的人口数量给流域资源与环境造成了较重的压力,已严重威胁流域的生态安全状况。

“十二五”期间,梨树县的畜禽养殖量持续大幅增加,已成为经济发展的巨大推动力。1999—2010 年,大牲畜存栏数由 23.59 万头增加到 48.15 万头,仅牛的存栏量就由 18.21 万头增加到 42.77 万头,增幅 3 倍多,农业产值从 22.89 万元增加到 38.84 万元,人均 GDP 增长 5.7 倍。农业和畜禽养殖业的迅猛发展,在带来经济效益的同时,大量化肥、农药的施用和大量持续增加的畜禽粪便污水,造成农业面源污染情况日益严重,已对其生态安全等级产生了重要影响。结合招苏台河流域的实际情况,确定招苏台河干流主

要流经梨树县的孟家岭镇、蔡家镇、十家堡镇、郭家店镇、白山乡、梨树镇、四棵树乡、喇嘛店镇 8 个乡镇作为本文的研究区。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

突变理论(实变理论)最早是由法国数学家伦尼·汤姆于 1968 年首先提出的,该思想一经提出便引起了世界的关注。突变理论是运用拓扑学、奇点理论和结构稳定性等数学工具研究自然界里各种形态及结构不连续的突然变化<sup>[9]</sup>。突变级数法是一种基于突变理论的重要评价方法,该方法仅考虑各指标的相对重要性,不需要考虑各指标的权重,从而减少了综合评价时的主观性和复杂性,使得评价结果更科学、客观,且计算过程较其它方法较为方便<sup>[13-14]</sup>。突变级数法的计算过程如下:

(1) 建立层次评价结构模型。根据评价的总目标,向下逐层分解相关影响因素,排列成树状的层次结构,最后使复杂、难于量化的上层指标分解为简单、便于量化的指标。评价所需的层次和指标确定后,同一层次的指标需按相对重要性从前到后的顺序进行排列。因为,初等突变类型的控制变量不多于 4 个,所以要求各层次的评价指标数量不超过 4 个,超过 4 个应该根据相对重要性进行取舍<sup>[9]</sup>。

(2) 确定各层次突变模型类型。在突变模型中,当状态变量不超过 2,控制变量不大于 4 时,共有 7 种突变形式,称为初等突变,其中应用较广泛的是状态变量只有 1 个的折叠型突变、尖点型突变、燕尾型突变、蝴蝶型突变四种基本初等突变模型,见表 1<sup>[6-7,15-16]</sup>。

(3) 运用势函数确定分歧集方程归一化公式。势函数为突变理论的研究对象,其所有临界点集合将构成一个平衡曲面,可以通过将势函数  $V(x)$  分别求一阶  $V'(x)$  和二阶倒数  $V''(x)$ ,并将  $V'(x)=0$  和  $V''(x)=0$  两个方程联立,消去  $x$ ,即可求得该突变模型的分歧点集方程<sup>[17]</sup>。

(4) 运用归一化公式进行综合评价。因为突变模型中的状态变量和控制变量取值范围不同,为了进行评价和比较,需将状态变量和控制变量进行归一化处理,使其取值范围在 0~1 之间。通过对分歧集方程进行推导可以得出 4 种初等突变模型的归一化公式<sup>[17]</sup>。结合突变理论中的互补性和非互补性运算原则,运用归一化公式由下到上进行递归运算,最后可得到突变系统总的隶属函数值,用于综合评价和分析。

表 1 4 种基本突变模型

突变类型	控制变量数目	势函数	分歧集方程	归一化公式
折叠型突变	1	$f(x)=x^3+ux$	$U=-3x^2$	$X_u=u^{\frac{1}{2}}$
尖点型突变	2	$f(x)=x^4+ux^2+vx$	$U=-6x^2;v=8x^3$	$X_u=u^{\frac{1}{2}};X_v=v^{\frac{1}{2}}$
燕尾型突变	3	$f(x)=\frac{1}{5}x^5+\frac{1}{3}ux^3+\frac{1}{2}vx^2+wx$	$U=-6x^2;v=8x^3;w=-3x^4$	$X_u=u^{\frac{1}{2}};X_v=v^{\frac{1}{2}};X_w=w^{\frac{1}{2}}$
蝴蝶型突变	4	$f(x)=\frac{1}{6}x^6+\frac{1}{4}ux^4+\frac{1}{3}vx^3+\frac{1}{2}wx^2+tx$	$U=-10x^2;v=20x^3;w=-15x^4;t=4x^5$	$X_u=u^{\frac{1}{2}};X_v=v^{\frac{1}{2}};X_w=w^{\frac{1}{2}};X_t=t^{\frac{1}{2}}$

2.2 数据来源

研究区社会、经济相关数据主要来源于 2004 年、2008 年、2010 年《四平统计年鉴》;平均植被覆盖指数、林地和水域面积等生态环境的数据是取自时段分别为:2004-06-28,2008-07-13,2010-09-10,分辨率为 30 m×30 m,云覆盖低于 5%的 TM/ETM 卫星遥感影像,经去云、几何校正等前期处理,采用 5,4,3 波段进行假彩色合成,通过目视解译获得;单位面积耕地农药、化肥施用量源于梨树县农业面源污染调查的相关数据。

由于评价指标的数据单位和量纲不相同,不能将其进行互相比,因此,本文采用 Microsoft Excel 软件将基础数据进行归一化处理,便于代入突变模型进行综合评价。

原始基础数据包括生态安全的正向指标和负向指标两类:正向指标值越大越有利于生态安全可采用  $x=\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}$  进行归一化处理;负向指标值越小生态安全越有利,

采用  $x=\frac{x_{\max}-x}{x_{\max}-x_{\min}}$  进行归一化处理。

3 流域生态安全评价

3.1 生态安全评价指标体系的构建

随着生态安全研究的深入,以联合国经济开发署(OCED)和环境规划署(UNEP)开发的压力—状态—响应模型(PSR;Pressure-State-Response)应用最广。压力—状态—响应模型可以在一定程度上反映生态安全这一复杂概念,模型中的压力因素体现了人类活动的加剧和过量开发与利用资源对生态环境产生的巨大压力;状态因素是生态环境所处的状态;响应因素则是人们为了防止和保护生态环境所采取的措施。本文以传统的压力—状态—响应模型为基础,充分考虑招苏台河流域的经济和社会背景,结合突变级数法的要求,构建自上而下由 3 个层次组成的综合评价指标体系。

3.2 评价模型的选择

根据某一个突变单元中控制变量的个数来选择突变模型的类型,控制变量数目的不同对应不同突变模型类型。所以,对于最顶层的突变单元是由  $A,B_1,B_2,B_3$  构成, $A$  为状态变量, $B_1,B_2,B_3$  为控制变量,控制变量数目为 3,故以  $A$  为中心的突变单元选择突变理论中的燕尾模型。同理,可分别确定以  $B_1,B_2,B_3$  为中心的单元突变模型类型。综上,形成了一个准则成为  $C_1-C_{10}$ ,中间层为  $B_1-B_3$ ,目标层  $A$ ,具有三层结构的招苏台河流域生态安全突变模型,见图 1。

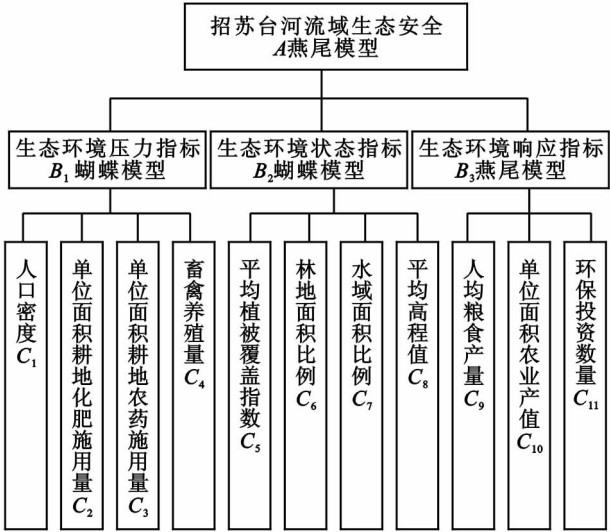


图 1 招苏台河流域生态安全研究突变模型

3.3 评价标准

参考我国学者对生态安全研究的五级分级标准<sup>[18]</sup>,将招苏台河流域生态安全分为生态安全良好、较好、预警、中警、重警五个级别。分别将各评价指标的生态安全隶属度取 0.2,0.4,0.6,0.8 计算各分级值。

当生态安全度值均取为 0.2 时,突变单元  $x_{B1}$ 、 $x_{B2}$  分别构成蝴蝶模型,按照互补性原则:

$$x_{B1}=(\sqrt{X_{C1}}+\sqrt[3]{X_{C2}}+\sqrt[4]{X_{C3}}+\sqrt[5]{X_{C4}})/4=0.606, x_{B2}=(\sqrt{X_{C5}}+\sqrt[3]{X_{C6}}+\sqrt[4]{X_{C7}}+\sqrt[5]{X_{C8}})/4=0.606;$$

突变单元  $x_{B3}$  构成燕尾模型,按照互补性原则:

$$x_{B3}=(\sqrt{X_{C9}}+\sqrt[3]{X_{C10}}+\sqrt[4]{X_{C11}})/3=0.567;$$
突变

单元 $x_A$  构成燕尾模型,按照非互补性原则: $x_A = \min(\sqrt{X_{B1}}, \sqrt[3]{X_{B2}}, \sqrt[4]{X_{B3}}) = 0.778$ 。同理可分别计

算生态安全度取值为 0.4,0.6 和 0.8 时的生态安全综合隶属度,见表 2。

表 2 基于突变理论的招苏台河流域生态安全分级表

生态安全等级	压力值	状态值	响应值	生态安全隶属度综合值
良好状态	$>0.931$	$>0.931$	$>0.922$	$>0.965$
较好状态	$0.850\sim0.931$	$0.850\sim0.931$	$0.832\sim0.922$	$0.921\sim0.965$
预警状态	$0.749\sim0.850$	$0.749\sim0.850$	$0.722\sim0.832$	$0.865\sim0.921$
中警状态	$0.606\sim0.749$	$0.606\sim0.749$	$0.567\sim0.722$	$0.778\sim0.865$
重警状态	$<0.606$	$<0.606$	$<0.567$	$<0.778$

3.4 评价结果及分析

3.4.1 生态安全的时间趋势变化 运用所建立的突变模型,分别计算出流域 8 个乡镇 2004 年、2008 年、2010 年三年的生态安全综合隶属度,见图 2。

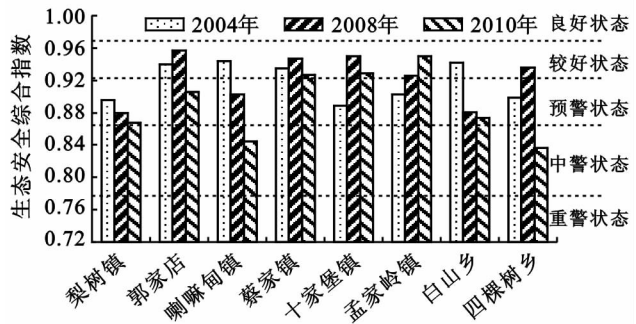


图 2 招苏台河流域生态安全评价结果对比

生态安全评价结果表明,全流域各乡镇的生态安全变化可划分为上升型、下降型和波动型三种类型,上升型仅有孟家岭镇,下降型有梨树镇、喇嘛甸镇和白山乡,其余为波动型。2004 年研究区各乡镇生态安全隶属度的综合值在 0.888 4~0.944 3 范围内波动,其中郭家店、喇嘛甸镇、蔡家镇、白山乡生态安全等级处于较好状态,梨树镇、十家堡镇、孟家岭镇、四棵树乡为预警状态。2008 年的综合值在 0.879 6~0.957 0 范围内,与 2004 年相比,郭家店和蔡家镇仍处于较好状态,且综合值呈上升趋势;十家堡镇、孟家

岭镇和四棵树乡已由预警状态上升为较好状态;梨树镇仍处预警状态,且综合值呈下降趋势;白山乡、喇嘛甸镇从较好状态下降为预警状态。2010 年综合值为 0.836 7~0.949 9,与 2004 年相比,仅有十家堡镇、孟家岭镇保持上升趋势,其余均呈下降趋势,其中喇嘛甸镇和四棵树乡的生态安全状况较差,生态安全等级降至比较严重的中警状态。2010 年流域内各地区的生态安全状况较 2004 年整体呈现下降的趋势,其中喇嘛甸镇、白山乡、四棵树乡下降较为明显,生态安全综合指数分别下降了 0.099 3,0.068 0,0.062 3。

3.4.2 生态安全的空间格局变化 根据 2004 年、2008 年、2010 年招苏台河流域生态安全空间格局分布图可知,流域生态安全空间格局差异显著,见图 3。2004 年,生态安全预警等级主要集中在流域中下游部分乡镇,上游的蔡家镇、郭家店镇生态安全等级较好;2008 年处于生态安全预警等级的乡镇沿流域向下游移动,上游的部分乡镇生态安全等级有好转的趋势;2010 年处于流域最下游的喇嘛甸镇和四棵树乡生态安全等级最差,中上游的乡镇生态安全状况相对较好。2004—2010 年,流域上游到下游生态安全等级下降趋势明显,上游位置的蔡家镇、孟家岭镇、十家堡镇生态安全状况较好,流域中下游生态安全状况下降比较明显,其中喇嘛甸镇、四棵树乡生态安全等级最差,已降至中警等级。

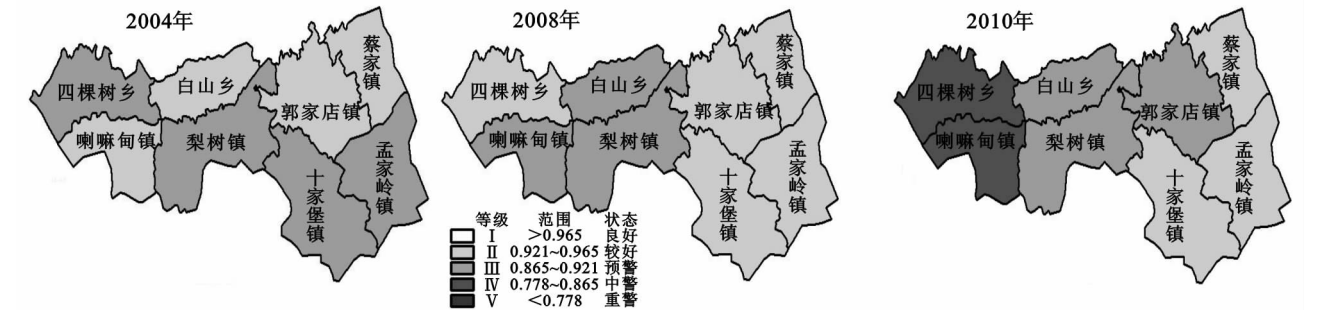


图 3 招苏台河流域生态安全空间格局分布

3.4.3 结果分析

(1) 人口数量的增长给流域生态环境带来了巨大压力。流域内 8 个乡镇的人口总数由 2004 年的

356 205 人增加到 2010 年的 378 469 人,净增加人口 22 264 人,增幅达 6.25%。2010 年,8 个乡镇平均人口密度为 325.48 人/km<sup>2</sup>,远超过了联合国提出的在

半干旱区农牧人口密度最高值为 20 人/km<sup>2</sup>。该流域大部分的财政收入来源于农业,在人口数量和人口密度增加的同时,为了能够持续增加粮食产量,人们不断增加化肥和农药的施用量,从而使农业面源污染强度增强,生态安全的压力指数上升,对研究区生态安全产生了不利影响。

(2) 畜禽养殖量的大幅增加加重了水体污染。近 10 a 来,招苏台流域畜牧业发展快速,畜禽养殖量大幅增加,畜禽饲养场的数量也越来越多,调查数据显示 2010 年招苏台河流域就有 230 个中小型畜禽饲养场<sup>[19]</sup>。大牲畜存栏数由 2004 年的 23.59 万头增加到 2010 年的 48.15 万头,2010 年牛的存栏量达到 42.77 万头,猪达到 57.60 万头。畜禽养殖场产生大量的畜禽粪便随意堆放,粪便冲洗产生的污水未经处理直接进入水体,污染招苏台河水体,对流域生态安全造成巨大威胁。

## 4 结论与展望

招苏台河流域生态安全等级整体不容乐观,生态系统结构破坏较大,生态系统的服务功能退化严重,制约了当地的经济的发展速度,需要采取增加环境保护资金投入,建立乡镇污水处理厂,提高畜禽粪便处理能力等生态安全响应措施,提高生态安全等级,实现生态系统的良性循环,促进该流域的经济、社会、环境的和谐发展。

突变理论中的突变级数法适合于影响因素较多、生态系统类型较为复杂的流域生态安全研究。由于该方法未引入权重,减少了其他评价方法因人为赋权带来的主观偏差,使其研究结果更加科学和合理,且计算方法较目前常用的模糊数学综合评价、灰色关联度等方法计算过程更为简单,对于研究生态环境演变规律,及时预警流域生态环境状态,维护生态系统平衡具有重要的指导意义。

本文仅以招苏台河流域为例建立了评价指标体系,但不同流域环境特征和社会经济水平有较大差异,为此,基于突变理论的流域生态安全评估指标体系选取的规范性、程序化以及如何扩大其适用范围将成为未来研究的重点和发展方向。

### 参考文献:

[1] 高清竹,许红梅,康慕谊,等.黄河中游砒砂岩地区生态

安全综合评价[J].资源科学,2006,28(2):132-139.

- [2] 李闯,刘吉平.霍林河流域中下游土地利用变化及生态安全响应[J].水土保持研究,2012,19(1):221-225.
- [3] 邹长新,沈渭寿.生态安全研究进展[J].农村生态环境,2003,19(1):56-59.
- [4] 易武英,苏维词.基于属性识别模型的重庆市生态安全动态评价[J].水土保持研究,2013,20(2):207-212.
- [5] 饶清华,邱宇,王菲凤,等.福建省山仔水库生态安全评价[J].水土保持研究,2011,18(5):174-178.
- [6] 李艳,陈晓宏,张鹏飞.突变级数法在区域生态系统健康评价中的应用[J].中国人口·资源与环境,2007,17(3):50-54.
- [7] 魏婷,朱晓东,李扬帆,等.突变级数法在厦门城市生态安全评价中的应用[J].应用生态学报,2008,19(7):1522-1528.
- [8] 黄玉平,张张国,胡三中.基于突变级数法的城市土地利用生态适宜度评价:以合肥高新技术开发区为例[J].安徽农业大学学报,2013,40(1):1-5.
- [9] 徐美,朱翔,周军.基于突变理论的湖南省土地生态安全格局分析[J].自然灾害学报,2012,21(6):199-207.
- [10] 李发荣,刘菊梅,全纪龙,等.基于突变级数法的我国西部城市环境承载力研究[J].环境工程,2010,28(增刊):338-342.
- [11] 杨东,焦金鱼,田娜.基于突变理论的岷县山区泥石流危险性区划研究[J].水土保持研究,2008,15(4):5-9.
- [12] 刘朝峰,苏经宇,王威,等.区域地震灾害承载力评价的突变模型[J].中国安全科学学报,2011,21(11):8-15.
- [13] 王枫,刘小玲,袁中友.区域土地生态安全突变评价模型及其实证[J].统计与决策,2009(24):85-87.
- [14] Su S, Li D, Yu X, et al. Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(6): 737-746.
- [15] 陈道炜,刘金福,洪伟,等.福建省土地生态安全动态评价[J].水土保持通报,2011,31(5):115-119.
- [16] 汤洁,林年丰,黄奕龙.尖点突变模型在研究洪水引起环境突变中的应用[J].环境科学学报,2002,22(4):443-447.
- [17] 郑雯,刘金福,王智苑,等.基于突变级数法的闽南海岸带生态安全评价[J].福建林学院学报,2011,31(2):146-150.
- [18] 左伟,王乔,王文杰,等.区域生态安全评价指标与标准研究[J].地理学与国土研究,2002,18(1):67-70.
- [19] 李云飞.招苏台河流域畜禽养殖业污染防治对策研究[D].长春:吉林大学,2012.