

基于氮磷比的赤潮灾害危险度评估方法研究*

文世勇^{1,2}, 赵冬至², 赵玲², 杨建洪², 张丰收², 高树刚²

(1. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了定量表示氮磷比对赤潮灾害危险度的影响, 在赤潮藻类最大比生长速率的氮磷比耐受性模型和赤潮暴发基准细胞密度的基础上, 建立了氮磷比与赤潮暴发时间的关系模型, 并据此划分危险度等级且归一化得到危险度值, 并以中肋骨条藻为例进行了应用分析。结果表明基于氮磷比的赤潮暴发时间模型受初始密度、氮磷比的影响, 且随初始密度、氮磷比的变化呈倒高斯形态变化。依据赤潮藻类在不同氮磷比下的耐受特性, 赤潮灾害危险度可划分为高危险度、中危险度、低危险度三个等级。在高危险度区, 最大比生长速率大, 赤潮暴发时间最短, 赤潮发生的可能性最高; 在中危险度区, 最大比生长速率小, 赤潮暴发时间长, 赤潮发生可能性低; 在低危险度区, 最大比生长速率趋于初始比生长速率, 赤潮暴发时间最长, 赤潮发生可能性最低。

关键词: 氮磷比; 赤潮藻类; 最大比生长速率; 赤潮灾害; 赤潮暴发时间模型; 灾害危险度

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 02-0084-06

Study on Hazard Degree Assessment Method of Harmful Algal Blooms Disaster Based on N/P Ratios

WEN Shiyong^{1,2}, ZHAO Dongzhi^{2*}, ZHAO Ling², YANG Jianhong²,
ZHANG Fengshou², GAO Shugang²

(1. College of Environmental Science & Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: To quantitatively expressed the effect between N/P ratios and hazard degree of harmful algal blooms disaster, based on the tolerance model of N/P ratios of specific growth rate and reference cell density of harmful algal blooms outbreak, Established the relational model between N/P ratios and the outbreak time of harmful algal blooms, obtained the rank and value of hazard degree, and has carried on the application to *Skeletonema costatum*. The results showed that the outbreak time model of harmful algal blooms is affected by initial cell density and N/P ratios, the relationship of them represented reciprocal Gaussian morphology variation. According to the growth characteristics of harmful algal under different N/P ratios, hazard degree of harmful algal blooms disaster can be divided into high hazard degree, medium hazard degree and low hazard degree three ranks. In the high hazard degree, maximum specific growth rate is large, the outbreak time of harmful algal blooms is the shortest, the possibility of harmful algal blooms outbreak is the highest, in the medium hazard degree, maximum specific growth rate is small, the outbreak time of harmful algal blooms is long, the possibility of harmful algal blooms outbreak is low, in the low hazard degree, maximum specific growth rate is tended to the initial specific growth rate, the outbreak time of harmful algal blooms is the longest, the possibility of harmful algal blooms outbreak is the

* 收稿日期: 2008-06-16

基金项目: 国家海洋局 908 专项基金资助项目 (908-02-03-01); “863” 计划资助项目 (2005AA604150、2005AA635200、2007AA092003)

作者简介: 文世勇 (1979 年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 赵冬至; E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn

lowest.

Key words: N/P ratios; harmful algal; maximum specific growth rate; harmful algal blooms disaster; outbreak time model of harmful algal blooms; hazard degree of disaster

危险的定性表达即危险性, 定量表达即危险度, 是指遭到灾害破坏的可能性大小。灾害危险度评估, 是指通过对灾害孕灾环境因子和致灾因子的分析, 得到灾害发生可能性的高低及强度的大小。其评估方法有定性和定量两种。定性方法主要是基于专家的实际工作经验, 根据现场数据得到灾害危险度结果^[1]。定量方法主要通过对灾害影响指标和灾害分布关系数据进行统计分析或根据灾害发生机制及灾害各自特点(如滑坡^[2-3]、泥石流^[4-5]、地震^[6-7]、洪灾^[8-9]等), 建立影响指标与灾害危险度的关系模型, 从而得出灾害危险度区划分布, 其方法主要包括信息量法^[10-11]、多元回归法^[12-13]、模糊综合评判法^[14-15]、人工神经网络^[16-17]等。

赤潮灾害危险度评估研究工作起步比较晚, 尚未形成完善的评估方法体系。目前, 在灾害危险度的基础上已界定了赤潮灾害危险度评估定义^[18]; 建立了包括致灾因子和孕灾环境因子的危险度评估指标体系, 其中致灾因子主要包括赤潮藻类及其类型(是否有毒性), 孕灾环境因子主要包括营养盐、光照度、气象要素、水动力、海洋物理要素等指标, 在此基础上利用 AHP 法作为确定各指标权重的方法, 得出各指标在指标体系中的权重及重要性^[19]; 进而建立了简单的危险度评估模型^[18]。但由于赤潮暴发机理的复杂性, 影响因子较多, 各因子影响机制互不相同, 为了进一步深入了解营养盐结构对赤潮藻类生长的影响机制, 建立了赤潮藻类最大比生长速率的氮磷比耐受性模型^[20], 为准确地定量评估氮磷比对灾害危险度的影响提供理论基础。因此, 为了能准确定量评估灾害危险度, 有必要深入了解单一要素对赤潮灾害危险度的影响机制, 为研究其它孕灾环境因子与灾害危险度的影响机制提供参考。

本文的研究目的是在赤潮藻类的氮磷比耐受性模型的基础上, 通过建立赤潮灾害危险度评估方法, 为研究其它孕灾环境因子与灾害危险度的影响机制提供参考, 为赤潮预警预报、风险评估提供依据。

1 赤潮灾害危险度的认知

赤潮灾害危险度评估包含二个内容, 一是评估

赤潮灾害暴发可能性的高低, 一是评估灾害强度的大小^[18]。评估赤潮灾害暴发可能性高低的依据主要是看赤潮藻类是否达到形成赤潮时的基准细胞密度, 而基准细胞密度又与赤潮生物的种类、个体大小不同而不同^[21]。赤潮藻类的细胞密度与基准细胞密度差越小, 赤潮暴发可能性就越高, 反之, 赤潮藻类的细胞密度与基准细胞密度差距越大, 赤潮发生的可能性就越低。此外, 从赤潮灾害减灾防灾角度来看, 赤潮暴发时间是赤潮灾害减灾防灾的一个重要参数, 赤潮暴发时间越短, 灾害危害性越大, 赤潮暴发时间越长, 灾害危害性越小。因此, 可根据赤潮暴发时间的长短来划分赤潮灾害暴发可能性的高低。暴发时间越短, 可能性就越高, 暴发时间的越长, 可能性就越低。由于赤潮藻类在不同氮磷比条件下的比生长速率不同, 故其暴发时间也不同, 其灾害危险度也不相同; 评估灾害强度大小的主要依据是赤潮灾害暴发面积的大小, 暴发面积的大小主要通过边界点的赤潮藻类的细胞密度与基准细胞密度的比较得到。面积越大, 强度越大, 面积越小, 强度越小。由于单点不存在灾害面积, 故单点的灾害危险度的高低主要通过赤潮灾害暴发可能性的高低来表示。

2 方法的理论基础

2.1 最大比生长速率与氮磷比的关系

赤潮藻类最大比生长速率受氮磷比条件影响, 根据文世勇等人的研究结果表明, 赤潮藻类最大比生长速率与氮磷比遵循谢尔福德耐受定律, 存在以下关系式^[20]:

$$\mu_{\max} = \mu_0 + A \times \exp\left(\frac{-((N/P) - (N/P)_{opt})^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, μ_{\max} 表示赤潮藻类在介质氮磷比为 N/P 下的最大比生长速率 (d^{-1}), μ_0 表示赤潮藻类的初始比生长速率 (d^{-1}), N/P 表示介质中的氮磷比, $(N/P)_{opt}$ 表示在最适赤潮藻类生长的最佳氮磷比, σ 表示该赤潮藻类的耐受度, 是描述浮游植物生态幅的一个指标, A 为参数, 不同的实验环境条件, A 的取值不同。

2.2 赤潮暴发时间与最大比生长速率的关系

赤潮藻类最大比生长速率决定了其暴发时间的长短, 根据赤潮藻类最大比生长速率公式可知, 当

B_L 达到形成赤潮时水体中藻细胞的基准密度 B_L 时, 即 $B_t = B_L$ 时, 则赤潮藻类在某个氮磷比下的暴发时间为:

$$t = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_{\max}} \quad (2)$$

其中, t 表示赤潮藻类在某个氮磷比下的暴发时间 (d), B_L 表示形成赤潮时的基准细胞密度 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$), B_0 表示在某个氮磷比下的初始细胞密度 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$), μ_{\max} 同式 (1)。从式 (2) 可得出, 在相同的基准细胞密度和初始细胞密度条件下, 赤潮藻类最大比生长速率越大, 赤潮暴发时间越短, 最大比生长速率越小, 暴发时间越长; 在相同的基准细胞密度和最大比生长速率条件下, 初始细胞密度越大, 暴发时间越短, 初始细胞密度越小, 暴发时间越长。

3 赤潮灾害危险度评估方法的建立

3.1 基于氮磷比的赤潮暴发时间模型的建立

由于赤潮藻类在不同氮磷比条件下, 其最大比生长速率不同, 进而赤潮暴发时间也不同。因此, 根据式 (1) 和式 (2), 可得到在氮磷比与赤潮暴发时间的模型关系式:

$$t = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_0 + A \times \exp\left(\frac{-((N/P) - (N/P)_{opt})^2}{2 \times \sigma^2}\right)} \quad (3)$$

其中, 式 (6) 中的参数, 其意义同式 (1)、(2)。

式 (3) 表明, 赤潮暴发时间与赤潮藻类最大比生长速率、N/P 表现为不同的变化机制。根据式 (1) 和式 (3) 得到赤潮藻类最大比生长速率与氮磷比、赤潮暴发与氮磷比的关系曲线 (如图 1 所示)。从图 1 上可看出, 赤潮藻类最大比生长速率与氮磷比的关系 (图 1 中的虚线所示) 呈高斯形态分布, 依据氮磷比对赤潮藻类的影响机制并结合谢尔福德耐受定律, 该关系曲线可划分为不能耐受带、生理紧张带和最适生长范围三部分^[20], 耐受下限、耐受上限、最适生长下限、最适生长上限分别是这三部分的分界点, 赤潮藻类的耐受特性决定了其最大比生长速率的特性, 而最大比生长速率的大小决定了赤潮暴发时间的长短。赤潮暴发时间与氮磷比的关系 (图 1 中的实线所示) 呈倒高斯形态分布。根据氮磷比对赤潮藻类的影响机制可知, 在最适生长范围, 当氮磷比为最佳氮磷比时, 最大比生长速率为最大, 赤潮暴发时间最短, 为 t_1 ; 当氮磷比为最适生长下限或上限时, 分别处于最适生

长范围的下限和上限, 最大比生长速率较大, 赤潮暴发时间长, 为 t_2 ; 在生理紧张带, 当氮磷比为耐受下限和上限时, 分别处于生理紧张带的下限和上限, 最大比生长速率较小, 赤潮暴发时间较长, 为 t_3 ; 在不能耐受带, 当氮磷比趋于零或正无穷大时, 最大比生长速率趋于初始比生长速率, 赤潮暴发时间最长, 为 t_4 。从以上分析可知, 在不同的氮磷比条件下, 赤潮藻类处于不同的生长特性, 决定了赤潮暴发时间的长短。最佳氮磷比、最适生长下限、最适生长上限、耐受下限、耐受上限分别是划分赤潮暴发时间长短的分界点。因此, 根据式 (3), 得到赤潮藻类在最佳氮磷比 ($(N/P)_{opt}$)、最适生长下限 ($(N/P)_{opt} - \sigma$) 和上限 ($(N/P)_{opt} + \sigma$)、生态幅下限 ($(N/P)_{opt} - 2\sigma$) 和上限 ($(N/P)_{opt} + 2\sigma$) 及初始比生长速率 (μ_0) 下的赤潮暴发时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 :

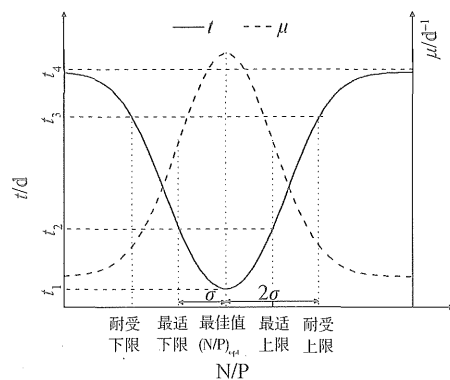


图 1 不同氮磷比下的赤潮暴发时间及其比生长速率

Fig. 1 The outbreak time of harmful algal blooms and maximum specific growth rate under different N/P ratios

在最佳氮磷比 ($(N/P)_{opt}$) 下赤潮藻类的赤潮暴发时间:

$$t_1 = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_0 + A} \quad (4)$$

在最适生长下限 ($(N/P)_{opt} - \sigma$) 和上限 ($(N/P)_{opt} + \sigma$) 下赤潮藻类的赤潮暴发时间:

$$t_2 = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_0 + 0.607A} \quad (5)$$

在耐受性生态幅下限 ($(N/P)_{opt} - 2\sigma$) 和上限 ($(N/P)_{opt} + 2\sigma$) 下赤潮藻类的赤潮暴发时间:

$$t_3 = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_0 + 0.135A} \quad (6)$$

在初始比生长速率 (μ_0) 下赤潮藻类的赤潮暴发时间:

$$t_4 = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_0} \quad (7)$$

根据图 1 和式 (4)、(5)、(6)、(7)，可得到 $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ ，说明当氮磷比范围处于赤潮藻类的最适生长范围 $[(N/P)_{opt} - \sigma, (N/P)_{opt} + \sigma]$ 时，赤潮暴发时间范围为 $[t_1, t_2]$ ，赤潮暴发时间最短，易发生赤潮；当氮磷比范围处于 $[(N/P)_{opt} - 2\sigma, (N/P)_{opt} - \sigma]$ 和 $[(N/P)_{opt} + \sigma, (N/P)_{opt} + 2\sigma]$ 时，赤潮暴发时间范围为 $[t_2, t_3]$ ，赤潮暴发的时间长，不易发生赤潮；当氮磷比范围处于 $[0, (N/P)_{opt} - 2\sigma]$ 或 $[(N/P)_{opt} + 2\sigma, +\infty]$ 时，赤潮暴发时间范围为 $[t_3, t_4]$ ，赤潮暴发时间最长，难发生赤潮。

3.2 基于氮磷比的赤潮灾害危险度等级划分

灾害危险度等级的划分要结合灾害形成机制及自身的特点来划分。本文根据赤潮灾害自身的特点，依据赤潮藻类在不同氮磷比下的耐受特性和赤潮暴发时间的长短将赤潮灾害危险度划分为高危险度区、中危险度区、低危险度区 3 个等级（如图 2 所示）。在高危险度区，氮磷比处于最适生长范围，赤潮藻类处于最好的生长状态，最大比生长

速率大，赤潮暴发时间最短，赤潮发生的可能性最高；在中危险度区，氮磷比处于生理紧张带，赤潮藻类生长受到限制或抑制，最大比生长速率小，赤潮暴发时间长，赤潮发生可能性低；在低危险度区，氮磷比处于不能耐受带，赤潮藻类生长或发育受到影响，甚至死亡，最大比生长速率趋于初始比生长速率，赤潮暴发时间最长，赤潮发生可能性最低。

3.3 赤潮灾害危险度定量表达

为了得到在某个氮磷比下危险度等级相对应的危险度值，根据危险度等级及其意义，结合式 (8) 进行归一化处理，得到危险度等级的定量表达（表 1 所示）。

$$H_i = \frac{t_4 - t_i}{t_4 - t_1} \quad (8)$$

其中， H_i 表示在某个氮磷比 $((N/P)_i)$ 下的危险度值，在 0~1 之间，越趋近于 1，表明危险度越高，反之亦然； t_1 、 t_4 同式 (4)、(7)； t_i 表示在 $((N/P)_i)$ 下赤潮暴发时间。

4 模型在中肋骨条藻中的应用

中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* 是一种广温广盐型浮游硅藻，它既是海产动物的主要饵料生物，又是常见的赤潮生物。中肋骨条藻在全球近岸海域分布极广，在我国诸多海域有该种赤潮记录，对海洋生态环境造成严重危害。中肋骨条藻形成赤潮时水体中藻细胞的基准密度为 $5 \times 10^6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ [21]。

4.1 中肋骨条藻的暴发时间模型

根据文世勇等人的研究结果，得到在赤潮藻类最大比生长速率与氮磷比的关系式 [20]，并结合式 (3) 得到在固定氮源条件下，中肋骨条藻在不同氮磷比下的赤潮暴发时间关系模型为：

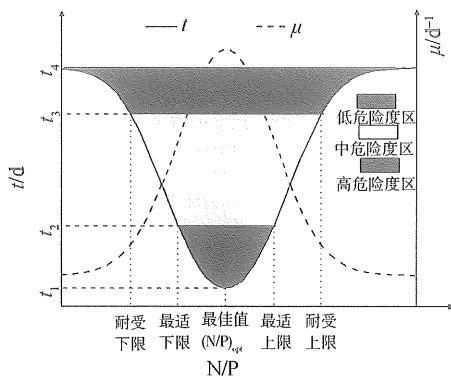


图 2 基于氮磷比的赤潮灾害危险度等级
Fig. 2 Hazard degree rank of harmful algal blooms disaster based on different N/P ratios

表 1 赤潮藻类在不同氮磷比下的危险度等级划分及其危险度区间

Table 1 Rank division and interval of Hazard degree of harmful algal under different N/P ratios

灾害危险度等级	达到藻细胞基准密度所需的时间范围	危险度值区间	氮磷比范围
高危险度	$[t_1, t_2]$	$\left[1, \frac{t_4 - t_2}{t_4 - t_1}\right]$	最适生长范围 $[(N/P)_{opt} - \sigma, (N/P)_{opt} + \sigma]$
中危险度	$[t_2, t_3]$	$\left[\frac{t_4 - t_2}{t_4 - t_1}, \frac{t_4 - t_3}{t_4 - t_1}\right]$	生理耐受带 $[(N/P)_{opt} - 2\sigma, (N/P)_{opt} - \sigma]$, $[(N/P)_{opt} + \sigma, (N/P)_{opt} + 2\sigma]$
低危险度	$[t_3, t_4]$	$\left[\frac{t_4 - t_3}{t_4 - t_1}, 0\right]$	不能耐受带 $[0, (N/P)_{opt} - 2\sigma]$ $[(N/P)_{opt} + 2\sigma, +\infty]$

$$t = \frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{3.312 + 2.251 \times \exp\left(\frac{-((N/P) - 31.7)^2}{2 \times 12.1^2}\right)} \quad (9)$$

从式 (9) 可看出, 中肋骨条藻的赤潮暴发时间受初始密度、氮磷比的影响 (图 3 所示)。从图 3 上可看出, 在同一初始密度条件下, 氮磷比与最佳氮磷比 31.7 的差越小, 中肋骨条藻的赤潮暴发的时

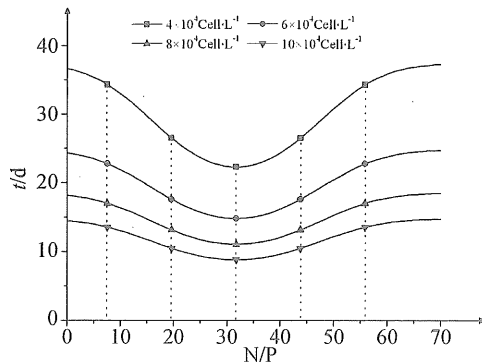


图 3 不同初始密度的中肋骨条藻在不同氮磷比下的赤潮暴发时间

Fig. 3 The outbreak time of *Skeletonema costatum* under different initial density and N/P ratios

间越短; 氮磷比与最佳氮磷比 31.7 的差越大, 赤潮暴发时间越长。不同初始密度条件下, 初始密度越大, 中肋骨条藻的赤潮暴发的时间越短, 且各氮磷比下的赤潮暴发时间差距越小, 暴发时间曲线变化越小; 初始密度越小, 赤潮暴发时间越长, 且各氮磷比下的赤潮暴发时间差距也越大, 暴发时间曲线变化越大。

4.2 中肋骨条藻的赤潮灾害危险度等级划分

根据式 (4)、(5)、(6)、(7)、(8)、(9) 和表 1, 可以得到在固定氮源条件下, 中肋骨条藻在不同氮磷比条件下的灾害危险度 (表 2 所示)。

从表 2 中可以看出, 在固定氮源条件下, 当氮磷比处于 [7.5, 43.8] 时, 中肋骨条藻能暴发赤潮灾害危险度为 [1, 0.72], 处于高危险度, 赤潮暴发的可能性最大; 当氮磷比处于 [7.5, 19.6] 或 [43.8, 55.9] 时, 中肋骨条藻能暴发赤潮灾害危险度为 [0.72, 0.21], 处于中危险度, 赤潮暴发的可能性较大; 当氮磷比处于 [0, 7.5] 或 [55.9, +∞] 时, 中肋骨条藻能暴发赤潮灾害危险度为 [0.21, 0], 处于低危险度, 赤潮暴发可能性最低, 难以发生赤潮。

表 2 中肋骨条藻在不同氮磷比下的危险度等级划分及其危险度区间

Table 2 Rank division and interval of hazard degree of *Skeletonema costatum* under different N/P ratios

灾害危险度等级	达到藻细胞基准密度所需的时间范围	危险度值区间	氮磷比范围	条件
高危险度	$\left[\frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{5.563}, \frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{4.678} \right]$	[1, 0.72]	最适生长范围 [7.5, 43.8]	固定 氮源
中危险度	$\left[\frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{4.678}, \frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{3.616} \right]$	[0.72, 0.21]	生理耐受带 [7.5, 19.6], [43.8, 55.9]	
低危险度	$\left[\frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{3.616}, \frac{(5 \times 10^6 / B_0) - 1}{3.312} \right]$	[0.21, 0]	不能耐受带 [0, 7.5], [55.9, +∞]	

5 结 论

本文在赤潮藻类的氮磷比耐受性模型的基础上, 建立赤潮灾害危险度评估方法, 并在中肋骨条藻中进行应用, 得到以下结论:

首先, 建立了基于氮磷比的赤潮暴发时间模型。该模型受初始密度、氮磷比的影响, 且赤潮暴发时间随初始密度、氮磷比的变化呈倒高斯形态变化。

其次, 建立了赤潮灾害危险度等级定量划分方法。依据赤潮藻类在不同氮磷比下的耐受特性, 赤

潮灾害危险度等级可划分为高危险度、中危险度、低危险度 3 个等级。

最后, 以中肋骨条藻为例进行了应用分析, 其结果表明具有较好的一致性。

由于本文的数据均来自于其他研究学者在室内培养条件下赤潮藻类与营养盐的关系研究公开发表文章的提供的数据并非是自己实验得到的数据, 建立的赤潮藻类的氮磷比耐受性模型是在实验数据的基础上得到, 在实际应用中可能产生一定的误差, 此外, 随着研究工作的进一步深入, 营养盐浓度 (绝对浓度、相对浓度) 对赤潮藻类的生长影响有

待下一步的研究和完善, 因此本文建立的模型和评估方法有待进一步验证、完善和深化。

参考文献:

- [1] 尚永升, 张海峰. 滑坡灾害危险性评价方法研究综述[J]. 山西建筑, 2006, 32(24): 87-88.
SHANG Yongsheng, ZHANG Haifeng. Research summarization on hazards assessment methods of landslide[J]. SHANXI ARCHITECTURE, 2006, 30(24): 87-88.
- [2] ACHARYA G, SMEDT F De, LONG N T. Assessing landslide hazard in GIS: a case study from Rasuwa, Nepal[J]. Bull Eng Geol Env, 2006, 65(1): 99-107.
- [3] BAUM R L, COE J A, GODT J W, et al. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA[J]. Landslides, 2005, 2: 266-279.
- [4] GENTILE F, BISANTINO T, LIUZZI G T. Debris-flow risk analysis in south Gargano watersheds (Southern-Italy) [J]. Natural Hazards, 2007, 44(1): 1-17.
- [5] ARKSEY R, VANDINE D. Example of a debris-flow risk analysis from Vancouver Island, British Columbia, Canada[J]. Landslides, 2008, 5(1): 121-126.
- [6] HOLSCHNEIDER M, TERAMO A, BOTTARI A, et al. On the relevance of the spatial distribution of events for seismic hazard evaluation[J]. Natural Hazards, 2004, 31(1): 1-19.
- [7] FACCIOLI E. Seismic hazard assessment for derivation of earthquake scenarios in Risk-UE[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2006, 4(4): 341-364.
- [8] MERZ B, KREIBICH H, APEL H. Flood risk analysis: uncertainties and validation[J]. ? sterreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 2008, 60(5): 89-94.
- [9] APEL H, THIEKEN A H, MERZ B, et al. A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks[J]. Natural Hazards, 2006, 38(1): 79-100.
- [10] CARRARA A, CARDINALI M, DETTI R, et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard[J]. Earth Surf Processes Landforms, 1991, 16(5): 427-445.
- [11] REMONDO J, BONACHEA J, CENDRERO A. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment[J]. Landslides, 2005, 2(4): 321-328.
- [12] LEE S. Application and cross-validation of spatial logistic multiple regression for landslide susceptibility analysis[J]. Geosciences Journal, 2005, 9(1): 63-71.
- [13] ZHU LEI, HUANG JINGFENG. GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2006, 7(12): 2007-2017.
- [14] SONG SHUJUN, ZHANG BAOLEI, FENG WENLAN, et al. Using fuzzy relations and GIS method to evaluate debris flow hazard[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences[J]. 2006, 11(4): 875-881.
- [15] ZHOU YULIANG, LU GUIHUA, JIN JULIANG, et al. A high precision comprehensive evaluation method for flood disaster loss based on improved genetic programming[J]. Journal of Ocean University of China (English Edition), 2006, 5(4): 322-326.
- [16] XU ZENGWANG. GIS and ANN model for landslide susceptibility mapping[J]. Journal of Geographical Sciences[J], 2001, 11(3): 374-381.
- [17] ERMINI, CATANI F, CASAGLI N. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment[J]. Geomorphology, 2005, 66: 327-343.
- [18] 文世勇, 赵冬至, 张丰收, 等. 赤潮灾害风险评估方法研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 106-111.
WEN Shiyong, ZHAO Dongzhi, ZHANG Fengshou, et al. A study of risk assessment method of harmful algal bloom hazard[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 106-111.
- [19] 文世勇, 赵冬至, 陈艳拢, 等. 基于AHP法的赤潮灾害风险评估指标权重研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 9-14.
WEN Shiyong, ZHAO Dongzhi, CHEN Yanlong, et al. Research on Index Weighting of Risk Assessment of Harmful Algal Bloom Hazard Based on AHP[J]. JOURNAL OF CATASTROPHOLOGY, 2007, 22(2): 9-14.
- [20] 文世勇, 赵冬至, 赵玲, 等. 赤潮藻类的氮磷比耐受性响应模型研究[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(1): 118-122.
WEN Shiyong, ZHAO Dongzhi, ZHAO Ling, et al. The tolerance response model of N/P ratios for harmful algal [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2009, 35(1): 118-122.
- [21] 国家海洋局. HY/T 069-2005, 赤潮监测技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
SOA. HY/T 069-2005, Technical specification for red tide monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.