

Ecological Risk Analysis Methods and Their Application Based on the Emergy Value of Ecosystem Services

Ke Song, Sheng Zhao*, Feng Gui, Huiwen Cai, Changwen Wu

Marine Science College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan

Email: zhaoeco@gmail.com

Received: Oct. 25th, 2011; revised: Nov. 21st, 2011; accepted: Nov. 27th, 2011.

Abstract: Ecological risk analysis is a new marginal subject that studies issues on risk theory, modern ecology and environmental science, etc. Currently, quantitative assessing and integrative study of ecological risk is a significant issue in the world. At the macrocosm scale we have a practice study on risk analysis based on the value of ecosystem services by integrating the quantification of the value of ecosystem services with the model of risk analysis. We establish an ecological risk analysis models: the model of ecological value at risk (EVR) and the information diffusion model. They provide a quantitative method for the ecological risk analysis. The Zhoushan city was selected as an example for application of our study. According to the historical data of Zhoushan city (1985 - 2007), the emergy value of the ecosystem services was calculated and the value of ecological risk was estimated by using the EVR and information diffusion model. First, we calculate the value of EVR. Such as the confidence level is 95%, the value of EVR of the emergy value is $5.233E+21$. Secondly, we evaluate the risk index of Zhoushan's ecosystems. Finally, we evaluate the estimated value of ecosystem services at risk. When the given emergy value is $4.00E+21$ sej, the estimated value is 1.0641, it means that the probability of the emergy value at risk in next year bigger than $4.00E+21$ sej is 1.0641.

Keywords: Ecological Risk Analysis; Value of Ecosystem Services; Emergy

基于生态系统服务能值价值的生态风险分析方法 及应用研究

宋科, 赵晟*, 桂峰, 蔡惠文, 吴常文

浙江海洋学院海洋科学学院, 舟山

Email: zhaoeco@gmail.com

收稿日期: 2011年10月25日; 修回日期: 2011年11月21日; 录用日期: 2011年11月27日

摘要: 生态风险的定量评价与综合研究是目前国际上一个热点问题。本文在大尺度生态系统上, 通过生态系统服务价值的量化与风险分析的数学模型相结合, 进行了基于生态系统服务能值价值的风险分析研究, 提供了一种生态系统风险分析的量化研究方法。通过建立 EVR 生态风险分析模型和基于信息扩散理论的生态风险分析模型, 以及对生态系统服务的量化指标: 生态系统服务的能值价值的阐述, 计算了舟山市不同年份(1985~2007)的生态系统服务能值价值, 并分别用 EVR 模型和信息扩散模型进行了实证分析。首先用 EVR 模型计算了在不同置信水平下未来一年生态系统服务能值价值损失的上限, 即 EVR 值, 如置信水平为 95%时, 能值价值的损失上限是 $5.233E+21$ sej; 其次用信息扩散模型计算了生态系统服务能值价值的风险估计值。如能值价值为 $4.00E+21$ sej 时, 风险估计值为 1.0641。

关键词: 生态风险分析; 生态系统服务; 能值

1. 引言

近年来, 随着科学技术的进步和社会经济的发展, 人类活动对自然干扰的加强, 导致了大量的生态系统

遭到破坏, 人类的生存环境出现了诸如温室效应、生物多样性减少、土地沙漠化、水资源短缺、能源危机等问题, 人类社会的生存、发展面临前所未有的风险。

因此,进行风险评价分析和管理的防范对策研究,对于维护生态系统功能,减少生态系统损失及人类可持续发展都具有重要现实意义。生态风险分析属于生态经济学中的重要研究内容,是生态学和风险数学的交叉边缘学科,也是现代生态学研究中的一个前沿问题^[1-7]。早期的生态风险分析起源于为保护人类免受化学暴露的威胁而进行的人类健康评估和污染物对生态系统或其中某些组分产生有害影响的环境健康评价^[5,8]。考虑到生境破坏和人类社会经济活动的压力对生物物种和生态系统的影响,生态学家将生态风险分析由以往的化学品造成的生态系统压力扩展到人类活动对生态的整体影响^[9]。随着风险理论的发展和生态问题的日益突出,一些研究者利用风险管理的理论和方法,对生态系统面临的各种风险进行综合评价^[10,11],并进行了理论上的探讨^[12-14]。近年来,随着生态系统服务价值研究的迅速发展,使得在生态系统尺度上评价生态风险成为可能。能值方法是评估生态系统服务价值方法之一,该方法通过服务形成过程中直接或间接投入应用的一种有效能总量来反映和比较各项服务的水平。各服务能值的最终结果都转化为相应数量的太阳能值(单位 sej,本文称之为能值价值),也可以通过能值一货币比率转化为能值货币价值^[15-17]。经济评价手段无法准确评价环境资本、环境贡献或环境影响,而最佳评价方法之一是以能量为共同的评价标准,将所有进出系统的不同形式的能量转化为太阳能值加以比较和研究^[18]。能值分析方法充分考虑了无法货币化的自然资源对生态系统的重要贡献、不同种类能量之间等级和质的差异性、价格受市场影响产生波动等问题,将生态环境系统与人类社会经济系统有机结合,计算得到的能值价值既能反映生态效益又能体现经济效益^[19],真实体现生态系统的服务价值。本文基于这一思想,在大尺度生态系统上,通过生态系统服务能值价值的定量化与生态风险分析的数学模型相结合,并以舟山为例进行了基于生态系统服务能值价值的生态风险分析的实例研究。

2. 生态风险分析的数学模型

生态风险是指在一个特定的生态系统中,一个或多个不良事件发生或正在发生的概率及其产生的严重后果(损失)^[20]。不确定性和危害性是生态风险的两个

基本属性。生态风险分析根据生态系统的机理和机制来预测、评价具有不确定性的灾害或事件对生态系统及其组分可能造成的损失^[1],因此,生态风险分析可以看作是对生态系统中不确定因素和危害因素的风险和造成损失的定量分析。我们通过建立生态风险分析的数学模型,对人类大规模活动对区域生态系统的影响造成的风险进行了定量评价,以下是我们基于生态系统服务价值建立的生态风险分析模型。

2.1. 生态风险分析的 EVR 模型

EVR(ecological value at risk)模型是一类新颖的风险分析模型,是指生态系统中暴露于风险中的那部分价值。而这里的价值是指生态系统服务的定量化生态指标。我们定义 EVR 为:在给定的时间水平和一定的置信水平下,某一类生态指标在未来给定时间内预期产生的可能值。通过计算 EVR,可将生态系统中暴露于风险中的某一类生态指标映射为一个简单的数字,便于生态系统管理者进行监控、操作和管理。以下是我们在金融风险分析的 VaR 方法^[21-24]的基础上建立的生态风险分析 EVR 模型:

为了计算 EVR 的值,首先要确定生态系统服务的价值是否处于风险中,这里定义当生态系统的需求价值(即人类实际从生态系统服务中获得的价值,也就是人类的消费)大于生态系统所提供的价值时,生态系统服务价值处于风险中,此时需求价值减去供给价值的量就是生态系统服务暴露于风险中的价值,可以根据下式计算求得:

$$R = D - S \quad (R > 0) \quad (1)$$

这里, R 是风险价值; D 是生态系统服务的需求价值,即人类实际从生态系统服务中获得的价值,也就是人类的消费; S 是生态系统的供给价值。当这三类价值被定义后,就可以用风险指数 I (Risk Index)来定量评价处于风险中的生态系统服务价值,其数学定义如下:

$$I = R/S \quad (2)$$

式中 R 、 S 的定义与(1)式相同。

当 $D > S$, 用 V 表示处于风险中的生态系统服务需求价值(人类消费), V_0 代表处于风险中的生态系统服务价值在研究期 $[0, T]$ 的初始值($t = 0$), V_1 是处于风险中的生态系统服务价值在研究期末($t = T$)的可能

值, EVR 是一定的概率下处于风险中的生态系统服务价值的预期值, 则有:

$$P(V_0 - V_1 \leq \text{EVR}) = 1 - \alpha \quad (3)$$

式中 α 是给定的置信水平。

从上式可以看出, 计算 EVR 的关键是如何确定 V_1 的分布。一般来说, 确定 V_1 的分布需要建立生态系统服务未来价值变化的数学模型, 依照历史数据来建立数学模型是常用的方法。下面我们将问题简化, 假设 V_0 、 V_1 服从正态分布。设 V_1 的期望值为 EV_1 , 标准差为 σ_1 , 且设

$$E \cdot V_1 = V_0 \quad (4)$$

由正态分布可知, 当 k 为常数时, $P(V_1 - EV_1 < k\sigma_1)$ 可以由标准正态分布得到其概率分布, 即

$$\frac{V_1 - EV_1}{\sigma_1} \sim N(0, 1) \quad (5)$$

由标准正态分布可知, 当 $k = 1.645$ 是, $P(V_1 - EV_1 < -1.645\sigma_1) \approx 5\%$

$$\text{即: } P(V_1 < V_0 - 1.645\sigma_1) \approx 5\% \quad (6)$$

$$\text{有 } \text{EVR} \approx 1.645\sigma_1 \quad (7)$$

式(7)就是在 95% 的置信水平下 EVR 值的近似计算公式。其他置信水平下的 EVR 值可以由同样的方法得到, 如 99% 的置信水平的近似计算公式为:

$$\text{EVR} \approx 2.326\sigma_1 \quad (8)$$

在上面的假设条件下, 只要计算出生态系统服务价值的标准差为 σ_1 , 就可以计算出 EVR 的值。

2.2. 基于信息扩散理论的生态风险分析方法

当我们获得研究区域的历史统计资料较少, 不能满足常规概率风险分析所需要的样本集时, 我们在信息扩散理论的基础上, 构造一种对小样本数据进行的生态风险分析方法^[25]。

设 y_1, y_2, \dots, y_m 为生态系统服务能值风险价值在 m 年内的实际数值, 称

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\} \quad (9)$$

为观测样本集合。根据信息扩散理论风险分析的实质是将单一的样本观测值变为一个模糊集。下面我们利用正态扩散模型进行风险分析。设所讨论的生态

系统服务价值的论域为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (10)$$

将每一个观测样本值 y_i 依下式将其携带的信息扩散到生态系统服务价值论域中的所有点:

$$f_j(u_i) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_j - u_i)^2}{2h^2}} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

其中 e 为自然对数底, h 为扩散系数, h 由下式确定:

$$h = \frac{1.6987(b-a)}{m-1} \quad 1 \leq m \leq 5$$

$$h = \frac{1.4456(b-a)}{m-1} \quad 6 \leq m \leq 7$$

$$h = \frac{1.4230(b-a)}{m-1} \quad 8 \leq m \leq 9$$

$$h = \frac{1.4208(b-a)}{m-1} \quad m \geq 10 \quad (12)$$

这里 b 为观测样本集合中的最大值, a 为最小值。即 $b = \max\{y_j, j = 1, 2, \dots, m\}$, $a = \min\{y_j, j = 1, 2, \dots, m\}$, m 为样本个数。取

$$C_j = \sum_{i=1}^n f_j(u_i) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

则样本 y_j 归一化的信息分布为

$$u_{y_j}(u_i) = \frac{f_j(u_i)}{C_j} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

令

$$q(u_i) = \sum_{j=1}^m u_{y_j}(u_i) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q(u_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

则有

$$p(u_i) = \frac{q(u_i)}{Q} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$p(u_i)$ 就是所有样本落在 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 处的频率值, 将其作为概率的估计值。

我们将超越 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的概率值:

$$r(u_i) = \sum_{k=i}^n p(u_k) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

记为 r_i , 则概率分布 $P = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 称为生态系统服务价值的风险值。

3. 案例分析

舟山市位于我国海岸线的中部,浙江省的东北部,长江、钱塘江、甬江三江入海口,是江海联运和长江流域走向世界的主要海上门户。地理位置介于29°32'~31°04'N, 121°30'~123°25'E 之间。全市区域总面积为22,200 km², 海域面积20,800 km², 海岸线漫长,总长度达2448 km。海域内盛产鱼、虾、贝、藻类等海水产品500多种,是全国最大的渔场。近年来,舟山市初步形成了以临港工业、港口物流、海洋旅游、现代海洋渔业等以“海”为核心的开放型经济体系。2011年舟山群岛国家级新区获国务院批准,其定位为海洋经济发展的先导区、海洋综合开发试验区和长江三角洲地区经济发展的重要增长极。可以预见,未来舟山生态系统将面临更多的来自人类经济系统的压力,选择舟山作为实例进行研究有一定的典型意义。

根据舟山市不同年份(1985~2007年)的统计数据,利用EVR模型(公式(1~8))和信息扩散模型(公式(9)~(18))进行了定量分析,结果见表1~5。表1是舟山市生态系统服务能值供给价值表,为避免重复计算,分别取陆域的最大值雨水化学能和海域的最大值海浪能值之和作为能值供给价值,由表1知,雨水化学能能值为1.488E+20sej,海浪能值2.162E+21sej,则舟山市生态系统服务的能值供给价值为2.310E+21sej。即公式(1)中 $S = 2.310E + 21sej$ 。

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成的,维持人类生存的自然环境条件及其效用,是人类从中获得的各种直接和间接的产品和服务。土地利用(包括海域)是人类最基本的实践活动,通过区域生态进程和服务间的相互作用直接影响生态系统服务。本文计算的舟山生态系统服务包括耕地、林地、草地和海域4种类型,将4种类型土地产生的各种产品(如耕地的粮食、林地的水果、草地的肉和海域的海产品)产量,通过各自的能值转换率,转换成同一标准——能值,并以此数值作为其为人类提供的服务价值,即公式(1)中的 D ,计算结果见表2。根据公式(1)用下式计算舟山市生态系统服务能值风险价值:

Table 1. The Zhoushan City's emergy supply value of ecosystem services
表 1. 舟山市生态系统服务的能值供给价值

类型 Item	原始数据* Raw data (J)	能值转换率 Transformity (sej/J)	能值价值 Emergy value (sej/a)
供给 Supply			2.310E + 21
太阳能 Sun	9.701E + 19	1	9.701E + 19
风能 wind	2.002E + 16	663	1.327E + 19
雨水化学能 Rain chemical	9.637E + 15	15,444	1.488E + 20
雨水势能 Rain geo-potential	9.533E + 14	8888	8.473E + 18
海浪能 wave	8.350E + 16	25,889	2.162E + 21
潮汐能 tidal	1.619E + 14	23,564	3.815E + 18
地球循环 Earth cycle	4.320E + 15	29,000	1.253E + 20

*舟山原始数据来自舟山市统计年鉴。

Table 2. The Zhoushan City's emergy demand value and emergy risk value of ecosystem services (1985 - 2007)
表 2. 舟山市生态系统服务的能值需求和能值风险价值表(1985~2007) 单位: sej/a

年份 year	耕地能值价值 Emergy value of arable land ecosystem services	林地能值价值 Emergy value of forest ecosystem services	草地能值价值 Emergy value of grassland ecosystem services	海域能值价值 Emergy value of sea ecosystem services	总能值价值(D) Total emergy value of ecosystem services (demand)	能值风险价值(R) Emergy value at risk (R)
1985	2.503E + 20	3.028E + 19	1.397E + 20	3.443E + 21	3.863E + 21	1.552E + 21
1990	2.849E + 20	1.684E + 19	2.073E + 20	4.149E + 21	4.658E + 21	2.348E + 21
1995	2.984E + 20	2.745E + 19	2.388E + 20	8.409E + 21	8.973E + 21	6.663E + 21
2000	2.696E + 20	4.781E + 19	2.502E + 20	1.214E + 22	1.270E + 22	1.039E + 22
2001	2.702E + 20	5.944E + 19	2.624E + 20	1.171E + 22	1.231E + 22	9.995E + 21
2002	2.240E + 20	3.039E + 19	2.851E + 20	1.123E + 22	1.177E + 22	9.455E + 21
2003	1.940E + 20	5.468E + 19	3.140E + 20	1.098E + 22	1.154E + 22	9.234E + 21
2004	2.209E + 20	5.115E + 19	3.223E + 20	1.130E + 22	1.189E + 22	9.584E + 21
2005	2.188E + 20	5.014E + 19	3.616E + 20	1.102E + 22	1.165E + 22	9.342E + 21
2006	2.131E + 20	5.200E + 19	3.819E + 20	1.118E + 22	1.183E + 22	9.519E + 21
2007	2.035E + 20	5.795E + 19	3.674E + 20	1.212E + 22	1.275E + 22	1.044E + 22

$$R_y = D_y - S \quad (R_y > 0)$$

R_y 是第 Y 年的能值风险价值; D_y 是第 Y 年的生态系统服务的能值需求价值(消费); S 是生态系统服务的能值供给价值 $S = 2.310 \times 10^{21}$ sej/a。

表 3 是根据 EVR 模型(公式(1~8))计算的在五种不同置信水平下(99%, 95%, 90%, 85%, 80%), 舟山市生态系统能值服务价值的 EVR 值, EVR 值表示在给定的置信水平下生态系统服务价值的损失上限。即在不同置信水平下未来一年(当前年为 2007 年)处于风险中的生态系统服务能值风险价值预期值。如在置信水平 95% 时, 能值价值的 EVR 值为 $5.233E + 21$ sej, 换言之, 我们可以说处于风险中的舟山市生态系统服务的能值风险价值在未来一年不超过 $5.233E + 21$ sej 的概率是 95%。

根据公式(2), 表 4 是舟山市生态系统 1985 年~2007 年的风险指数计算结果表。风险指数定量评价了舟山市生态系统服务的能值价值, 定义当 $I < 1$, 风险指数低, 当 $I > 1$ 风险指数高。从表 4 中可以看到舟山市生态系统风险指数从 1990 年大于 1 以后, 在 2000 年达到了 4.5, 并在这之后的几年基本维持在 4 左右, 说明生态系统受到的人类活动压力非常大, 存在很大的风险。

表 5 是根据信息扩散理论模型(公式(9~18))计算的舟山市生态系统服务能值价值的风险估计值。从表中知, 当给定的能值服务价值论域(U_i)为 $4.00E + 21$ sej 时, 概率估计值为 1.0641, 即未来一年的能值风险价值大于 $4.00E + 21$ sej 的概率是 1.0641。

4. 讨论

1) 将生态系统服务价值的定量化研究与风险分析研究方法相结合, 提供了一种可以定量化研究生态系统风险的方法。本文在生态系统服务能值价值定量化研究的基础上, 应用 EVR 模型和信息扩散理论模型, 并结合舟山市进行了实证分析(见表 1~5), 是大尺度生态系统风险分析的综合研究, 虽然这种结合还有许多问题, 但这种探索性的研究是对生态经济的

发展以及生态系统管理的一种有益尝试。

2) 我们在 VaR 风险管理模型的基础上, 提出了一类新的风险管理模型——EVR 模型, 给出了 EVR 模型的计算公式, 并结合舟山市进行了实例分析。表 3 的结果表示了在不同置信水平下未来一年生态系统服务价值损失的上限。如在置信水平 95% 时, 能值价值的损失上限是 $5.233E + 21$ sej, 换言之, 未来 1 年舟山能值价值损失不超过 $5.233E + 21$ sej 的概率为 95%。当然, 在我们建立的 EVR 模型的具体计算过程中也存在

Table 3. The EVR of the Zhoushan emergy value of ecosystem services

表 3. 舟山市生态系统能值服务价值的 EVR 值表

置信水平 Confidence level	能值价值的 EVR EVR of emergy value (sej)
99%	7.401E + 21
95%	5.233E + 21
90%	4.077E + 21
85%	3.297E + 21
80%	2.677E + 21

Table 4. The risk index of Zhoushan's ecosystem

表 4. 舟山市生态系统的风险指数表

年份 Year	能值风险价值(R) Emergy value at Risk (R) (sej/a)	风险指数(I) Risk index (I)
1985	1.552E + 21	0.67
1990	2.348E + 21	1.02
1995	6.663E + 21	2.88
2000	1.039E + 22	4.50
2001	9.995E + 21	4.33
2002	9.455E + 21	4.09
2003	9.234E + 21	4.00
2004	9.584E + 21	4.15
2005	9.342E + 21	4.04
2006	9.519E + 21	4.12
2007	1.044E + 22	4.52

Table 5. The analysis of the Zhoushan's ecosystem services value at risk

表 5. 舟山市生态系统服务能值风险价值分析表

风险论域 Risk value (u_i) (sej)	1.00E + 21	2.00E + 21	4.00E + 21	6.00E + 21	8.00E + 21	1.00E + 22	1.20E + 22
估计值 Estimated value ($r(u_i)$)	1.0000	1.0051	1.0641	1.0497	1.0445	1.0154	0.1540

一些问题,如假定生态系统服务的未来价值服从正态分布这样的假设,没有考虑生态系统服务的未来价值服从其他分布的情况,这两个模型的最大优点就在于测量的综合性,将一系列生态系统服务价值数据转变为一个单一的概率数字,较好的解决了生态系统风险的复杂性和综合性的问题,虽然这样做有可能丢失相当数量的有价值的信息,这一点有待我们以后做进一步的研究。

3) 生态风险分析的最大困难在于数据的不足,无法用经典的概率统计进行风险分析,因此在信息扩散理论的基础上建立的小样本风险分析具有重要的应用价值。在此模型的基础上,我们以舟山市为例计算了生态系统服务能值价值的风险估计值,结果见表5。

在某一生态系统中,当其的供给价值和需求价值求得以后,就可以用公式(2)通过风险指数 I 来定量评价其风险程度,风险指数可以被认为是定量评价可持续发展的指标。我们知道,当可更新资源(自然资本)的存量不随时间而减少,则我们称之为可持续发展的,本研究中,当生态系统服务的需求价值小于生态系统服务的供给价值时,自然资本的存量得以保持,系统是可持续发展的;当生态系统服务的需求价值大于生态系统的供给价值时,自然资本的存量无法得以保持,系统是可持续发展的,风险指数定量评价了这种不可可持续发展的程度,因此可以作为一种定量评价可持续发展的指标。

4) 能值分析的优点是为测量生态系统资源的使用提供了可能性,但是,生态系统的复杂性使得能值转换率的计算变的复杂与具有不确定性,对于任何产品或过程都没有一个单一的能值转换率,这影响计算的准确性。生态系统服务价值量化指标有多种研究方法,我们仅就生态系统服务的能值指标进行了研究,虽然这种方法存在一些利弊,但仍然是生态系统服务价值量化研究的有代表性的理论,相信随着生态系统服务定量评估的理论和方法的不断发展,其量化研究会不断的深入。

5. 致谢

本文得到国家自然科学基金(No.40971295, 41001001),浙江省科技厅项目(No. 2009C33083)和国际科技合作项目(No. 2009DFB20290)支持。

参考文献 (References)

- [1] C. S. Findlay, L. G. Zheng. Estimating ecosystem risks using cross-validated multiple regression and cross-validated holographic neural networks. *Ecological Modelling*, 1999, 119(1): 57-72.
- [2] N. S. Cavanagh, T. L. McDaniel, L. J. Axelrod, et al. Perceived ecological risks to water environments from selected forest industry activities. *Forest Science*, 2000, 46(3): 344-355.
- [3] J. H. Gentile, M. A. Harwell. Strategies for assessing cumulative ecological risks. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7(2): 239-246.
- [4] G. M. Wang, W. D. Edge and J. O. Wolff. Demographic uncertainty in ecological risk assessments. *Ecological Modelling*, 2001, 136(1): 95-102.
- [5] T. L. McDaniel, L. J. Axelrod and P. Slovic. Perception of ecological risk to water environments. *Risk Analysis*, 1997, 17(3): 291-298.
- [6] T. L. McDaniel, L. J. Axelrod, N. S. Cavanagh, et al. Perception of ecological risk to water environments. *Insurance: Mathematics and Economics*, 1998, 22(2): 190-191.
- [7] T. Oka, H. Matsuda and Y. Kadono. Ecological risk-benefit analysis of a wetland development based on risk assessment using "expected loss of biodiversity". *Risk Analysis*, 2001, 21(6): 1011-1024.
- [8] M. A. Santomero. Financial risk management: The whys and hows. *Financial Markets Institutions & Instruments*, 1995, 4(5): 1-13.
- [9] A. Luoma, E. Ranta and V. Kaitala. Moose Alces alces hunting in Finland—An ecological risk analysis. *Wildlife Biology*, 2001, 7(3): 181-187.
- [10] D. R. J. Moore. The Anna Karenina principle applied to ecological risk assessments of multiple stressors. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7(2): 231-237.
- [11] L. S. McCarty, M. Power. Environmental risk assessment within a decision-making framework. *Environmental Toxicology Chemistry*, 1997, 16: 122-125.
- [12] R. F. Noss. High-risk ecosystems as foci for considering biodiversity and ecological integrity in ecological risk assessments. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(6): 321-332.
- [13] K. S. Shrader-Frechette. What risk management teaches us about ecosystem management. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 40(1): 141-150.
- [14] R. G. Stahl, J. Orme-Zabaleta and K. Austin. Ecological indicators in risk assessment: Workshop summary. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2000, 6(4): 671-677.
- [15] M. T. Brown, T. R. McClanahan. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*, 1996, 91(1-3): 105-130.
- [16] M. Federici, S. Ulgiati, D. Verdesca, et al. Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems. The case of Siena, Italy. *Ecological Indicators*, 2003, 3(3): 155-169.
- [17] S. Ulgiati, M. T. Brown, S. Bastianoni, et al. Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecological Engineering*, 1995, 5: 519-531.
- [18] H. T. Odum, E. P. Odum. The energetic basis for valuation of ecosystem services. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 21-23.
- [19] 蓝盛芳, 陆宏芳, 钦佩. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 35-36, 407.
- [20] 李自珍, 李维德, 石洪华, 贾晓红. 生态风险灰色评价模型及其在绿洲盐渍化农田生态系统中的应用[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 617-622.
- [21] E. F. Fama. The behavior of stock-market prices. *Journal of Business*, 1965, 38(1): 34-105.
- [22] R. Martin, K. Thompson and C. Browne. VaR: Who contributes and how much? *Risk*, 2001, 14(8): 99-102.
- [23] P. Jorion. Risk: Measuring the risk in value at risk. *Financial Analysts Journal*, 1996, 52(6): 47-56.

- [24] K. R. Campbell, T. S. Campbell. Lizard contaminant data for ecological risk assessment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 165: 39-116.
- [25] 黄崇福, 刘新立, 周国贤, 李学军. 以历史灾情资料为依据的农业自然灾害风险评估方法[J]. *自然灾害学报*, 1998, 7(2): 1-8.