

基于生态资产的生态系统风险分析模型及应用实例

李维德^{1,*}, 王积全²

(1. 兰州大学数学与统计学院生物信息研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要:生态学将在生态系统的管理和生命支持系统的可持续发展上发挥核心作用。对生态系统的定量研究是生态系统管理研究的核心和前沿。研究借助于金融资产风险管理方法, 结合生态资产价值化和生态系统风险研究建立了基于生态资产的生态系统风险分析方法, 给出了对区域(流域)生态系统总体风险进行度量的分析模型和计算公式, 并以民勤绿洲生态系统为例进行了实证研究。实证研究结果表明: 未来 3a 内民勤绿洲生态资产价值损失在 95% 置信水平下不会超过 1.92 亿元。所建立的生态资产风险分析模型对区域生态系统管理具有一定的意义。

关键词:生态系统风险分析模型; 生态资产; 生态系统服务功能的价值; 可持续发展; 民勤

文章编号: 1000-0933(2009)07-3811-07 中图分类号: X171 文献标识码: A

Model of ecosystem risk based on natural capital: a case study

LI Wei-De^{1,*}, WANG Ji-Quan²

1 Institute of Bioinformatics, School of Mathematics and Statistics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 The State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Institute of Cold and Arid Regions Environment and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3811 ~ 3817.

Abstract: Ecology is playing a core role in ecosystem management and in sustainable development of the life support system. Quantitative study of the ecosystem is crucial in ecosystem management and is becoming the research frontier. In this study, new method for measuring ecosystem risk is established by combining capitalization of natural asserts and financial risk method. Some models to calculate the total ecosystem risk for a region or watershed are established. A case study of the method is conducted in Minqin oasis ecosystem. The case study shows how to calculate the risk value of an ecosystem. The result of the case study indicates that the maximum loss of the region's ecosystem value is no more than 192 million RMB yuan at 95% confidential level in three years. The method and formulae established for ecosystem risk analysis are useful in ecosystem management.

Key Words: ecosystem risk analysis model; natural capital; the value of ecosystem services; sustainable development; Minqin

生态学研究正在由自然生态向生态系统和人类关系的可持续性方向上发展。新世纪的生态学不再是避开人类而“纯粹的”研究自然的学科, 而将更多的在人类可持续发展和对自然社会生态系统的管理方面起重要作用^[1]。人类在创造现代文明的同时, 也成为生命支持系统的最大的破坏者, 一系列的生态环境问题迫使新世纪的生态学由传统的边缘学科向中心学科转移, 寻求解决人与自然和谐发展的根本出路。美国生态学会的“生态科学与全球可持续发展战略远景报告”^①明确提出: 生态学能够、也必须为建设未来社会可持续发展

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30770333); 国家留学基金资助项目

收稿日期: 2008-08-08; 修订日期: 2008-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weideli@lzu.edu.cn

① www.esa.org/ecovisions

发挥核心作用,建立以生态学为基础的科学决策来推进对拥挤地球可持续发展能力的创新研究。科学决策的基础是对可持续发展能力的科学评估,生态系统服务研究、生态系统风险研究正是大尺度上可持续发展研究和生态系统管理研究中难能可贵的研究工具。本研究试图将生态系统服务功能的研究工作和生态系统风险的研究结合起来,建立一种用于生态系统可持续发展管理的评价工具。

生态风险是近年来环境保护和生态安全研究领域的一个非常重要的概念。从环境风险评价(environment risk assessment)发展起来的生态风险评价(ERA, ecological risk assessment)以往主要侧重在生态毒理学研究上,研究化学污染物对生物个体、种群和生态系统的影响^[2]。近年来,研究者普遍认识到,流域或区域尺度上生态系统的负面影响不再局限于污染物,人类活动的影响更为显著^[3,4]。尽管基于点源污染和单个风险因子对种群和生态系统的风险评价在理论上已经发展得较为成熟^[5~10],但在流域(区域)尺度上的生态风险研究却甚为困难。这一方面由于大尺度生态系统本身十分复杂,所面临的风险因素较多,尤其是人类大规模活动下对流域(区域)生态系统的影响而造成的风险难以用传统的 ERA 方法进行评价;另一方面,由于不同流域(区域)具有不同的生态特征,所面临的风险不同,没有形成统一的评价方法^[11~15]。因此,针对研究流域(区域)的特点,建立基于问题的生态风险评价方法就显得十分重要^[16,17]。近年来,众多致力于生态风险研究的科学家^[18~28]对生态系统风险量化技术进行了较多的探讨,但由于生态系统风险的研究刚刚起步,而所涉及的学科又较多,采用的研究方法和研究角度各有不同,至今还没有形成其理论体系。因此可以说,生态风险分析在流域(或区域)尺度上的定量研究还只在探索阶段,有待于进一步发展。

流域(区域)生态系统是由自然-社会-经济构成的复杂系统,所面临的风险因素十分复杂,要对流域生态系统在总体上给出生态风险定量分析存在很大的困难。近几年来,随着生态经济研究的深入,对“生态资本”(ecological capital; 又称“自然资本”或“自然资本资产”, natural capital, natural assets)价值化的研究发展迅速^[29~35],使有可能从生态资本的价值化来研究流域或区域尺度上的总体生态风险。生态资本价值化研究比较完善和影响较大的当推“生态系统服务功能的价值(the value of ecosystem services)”。本文正是基于这样的思想,通过生态系统服务功能的价值对区域或流域生态系统总体风险进行探索性研究。

1 生态资产风险分析的 EVR 方法

EVR(ecological value at risk)定义为在给定的时间水平(如 1a、3a 等时间期限)和给定的置信水平(如 95%、90% 的概率等)下,生态资本资产在未来给定时间内预期发生的最大损失的上限。

譬如,假设某区域现有的生态资本资产为 5000 万,由于在各种风险因素(如森林砍伐、水文过程改变、城市化等)的干扰下,该生态资本资产在未来时间内会遭受不确定性的损失。那么可以认为该生态资本资产面临的风险暴露值为 5000 万。并假设已经知道该生态资产未来时间期限内的概率分布,比如正态分布,那么就可以在给定的时间水平和给定的置信度下计算其未来损失的上限(EVR 值)。EVR 方法可以用图 1 来进行形象的描述。

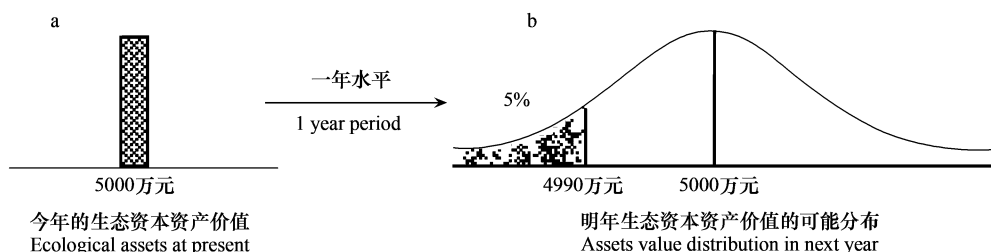


图 1 EVR(ecological value at risk)方法示意图

Fig. 1 A sketch map of EVR method

图 1 中(a)为生态资本资产的风险暴露值。假设在 1a 的时间水平下,生态资本资产 1 年期末的资产价值分布如图 1(b)所示,图 1(b)中阴影部分所占的概率为 5%。在给定的置信水平(此处为 95% 概率)下,就可

以计算出该生态资本资产的损失下限—— EVR 值 = $5000 - 4990 = 10$ (万元)。也就是说,一年之内,在 95% 的概率下,该生态资本资产的最大损失不超过 10 万元。

显然, EVR 给出了在一定时间内、给定置信水平下,生态资本资产“价值”损失的警戒值,对生态资本资产风险的监控、比较和管理是有用的。

2 模型的建立与分析

由定义知, EVR 就是以一定的概率确定的生态资产价值最大潜在损失。用数学描述为:

$$P(V_1 < V_0 - EVR) = p \quad (1)$$

其中, V_0 指生态资本资产在期限 $[0, T]$ 初期($t=0$)的价值表述,是已知的; V_1 指生态资本资产在该期限末期($t=T$)的可能价值表述,是未知的随机变量; p 是概率, $p=1-\text{置信度}$ 。式(1)也可以表述为

$$P(V_0 - V_1 \leq EVR) = 1 - p \quad (2)$$

从上式可以看出,计算 EVR 的关键是如何确定 V_1 的分布。也即在该时间水平下对 V_0 的变化情况进行预测。一般来说,确定 V_1 的分布需要建立生态资本资产未来价值变化的数学模型。不同的模型可以导致不同的 EVR 计算方法。依照历史数据来建立数学模型是常用的方法。下面在假设的基础上建立 EVR 值的计算公式。

假设生态资本资产在给定的时间水平下未来价值相对变化量呈正态分布。设 $V_1 = V_0(1+R)$, 则 R 是未来价值相对变化量,假设 R 服从正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 。下面讨论在上述假设下 EVR 的近似计算公式。设在置信度 c 下 V_1 的最小值为 V_m , 其对应的 R 为 R_m 。 $V_m = V_0(1+R_m)$ 。有:

$$EVR = E(V_1) - V_m = E(V_0(1+R)) - V_0(1+R_m) = -V_0(R_m - E(R)) = -V_0(R_m - \mu) \quad (3)$$

由 R 的正态分布假设知:

$$\frac{R - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1) \quad (4)$$

由标准正态分布,当给定置信水平 c 时,有 $-k = \frac{R_m - \mu}{\sigma}$ 。其中 k 就是在给定置信水平下 R_m 所对应的值。则 $R_m - \mu = -k\sigma$, 代入(3)式有:

$$EVR = V_0 k \sigma \quad (5)$$

则当 $c = 95\%$ 时,对应地 $k \approx 1.65$ 。故有:

$$EVR \approx V_0 1.65 \sigma \quad (6)$$

式(6)就是在 95% 置信水平下给出的 EVR 值的近似计算公式。其它置信水平下的 EVR 值的计算公式用同样的方法可以得到。

假定 σ 是由 1a 的时间间隔上计算出来,在正态分布假设下,时间间隔为 T 的 EVR 近似计算可以基于“平方根时间法则”推导^[36],由推导得到的近似计算公式为:

$$EVR^{(T\text{年})} \approx \sqrt{T} EVR^{(1\text{年})} \quad (7)$$

在上面的假设条件下,只要计算出生态资本资产价值相对变化量的标准差 σ , 就可以容易地计算出该资产的 EVR 值。正态假设是为了给出容易计算的公式,对生态资产未来变化满足其它分布的情形可以根据公式(1)、(2)建立类似的 EVR 计算公式。置信水平的选取可以根据管理目标进行选定,这里取最常用的置信度 95%。本模型是在金融风险分析的 VaR (value at risk) 方法的基础上构建的,有关 VaR 方法请参考相关文献^[36,37]。

3 研究实例

应用研究选择甘肃省民勤县为研究样区。民勤县位于河西走廊东部、石羊河流域下游,东经 $103^\circ 2' \sim 104^\circ 2'$, 北纬 $38^\circ 5' \sim 39^\circ 6'$ 。东西北三面被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围。境内地势平坦,海拔 1295 ~ 1460m,总面积 1.6 万 km^2 ,总人口 30.3 万。属温带大陆性干旱气候,多年平均降水 110mm,多年平均蒸发量 2644mm。由于干旱少雨且与沙漠地区毗邻,生态系统极为脆弱。为了解决水的问题,石羊河流域建国以来修

建水库和大规模开发地下水,建立了完善的水利工程体系,使本地区水资源得到充分利用,经济社会稳定发展。但随着人口的增加和工农业生产的快速发展,水资源出现严重短缺。水资源成为制约该流域生态经济可持续发展的主要制约因素,并引发了严重的生态环境问题。特别是地处石羊河流域下游的民勤,由于地表来水量的减少和地下水位下降,加速了土地的沙漠化进程。天然沙生植被和人工林大量衰败、枯死,草场退化,北部沙漠以每年 8~10m 的速度向绿洲推进,全县沙漠化面积已达 94.51%,绿洲生态系统面临着巨大的风险。石羊河流域地理位置和环境梯度上都处于全国沙漠化监控与防治的前沿地区,尤其是流域下游的民勤绿洲,阻隔了巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的汇合,在全国生态格局中具有重要的战略地位。本研究选择民勤作为实例研究的研究样区具有一定的典型意义。

生态系统服务是指对人类生存及生活质量有贡献的生态系统产品和生态系统功能。生态系统服务是人类一切福利的源泉,它包括来自自然的物流、能流和信息流,以及制造业资本和人类资本结合在一起产生的人类的福利。生态系统为人类提供的服务包括两大类:一是提供人们生活必需的生态系统产品,如农业生态系统提供的粮食,水域生态系统提供的水产品等,其实质是生态系统对能量的固定和物质的转化;二是提供保证人类生活质量的生态功能,包括维持生命物质的生物化学循环和水文循环、维持生物物种与遗传多样性、土壤肥力的更新与维持、光合作用及分解作用等支撑与维护地球生命支持系统的功能等^[32, 34]。与生态系统产品相比,生态系统功能对人类的影响更为广泛和深远。近年来,生态系统服务价值的研究渐渐成为生态学和生态经济学的一个热点。其中,美国生态学家 Constanza 等人的研究成果引起了世界各国极大的反响。他将全球生物圈划分为:海洋、森林、草原、湿地、水面、荒漠、农田等 16 大类 26 小类;将生态系统服务功能划分为气候调节、水分调节、控制水土流失、物质循环、降解废物、文化娱乐等 17 种功能,并以此为基础计算了全球生态系统服务年度价值平均为 33 万亿美元,相当于同期全世界国民生产总值的 1.8 倍^[30]。国内学者也对不同区域内的森林、草地、水域及陆地生态系统的价值进行了研究^[31~35]。考虑到石羊河流域和银川地区在生态环境上的相似性,本研究区水域生态系统单位面积服务价值根据邵宁平等对银川水域生态服务价值的平均值代替^[38],其它生态系统单位面积服务功能价值的估计采用李佳对民勤绿洲生态系统的研究成果^①,其单位面积的价值见表 1。根据民勤县历年土地利用格局的统计数据 and 表 1 中的研究结果,可计算出民勤县不同年份生态系统服务功能的价值(表 2)。

表 1 民勤县生态系统服务功能的单位价值(RMB 万元/(km²·a))

Table 1 The value of ecosystem services in Minqin for per square kilometer (10⁴ RMB yuan/(km²·a))

土地类型 Land area types	耕地 Cropland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	居民、工矿、道路用地 Building area	未利用地 Un-used area
生态服务功能的价值 The value of ecosystem services	76.156	94.725	66.918	655.1	0	3.915

表 2 中服务价值的相对变化量如果满足正态分布,则可计算出其价值相对变化量的标准差,然后利用公式(6)、(7)可获得用 EVR 模型计算出的、给定时间期限和置信水平下的生态系统服务价值的 EVR 值。遗憾的是,尽管其相对变化量有一定的正态性,但通不过统计检验。下面给出计算 EVR 值的一个修正方法。

依据有关统计理论,取 $w = k + \frac{1}{6}(k^2 - 1)\gamma$, 其中 $\gamma = \frac{E(R - \mu_R)^3}{\sigma^3}$ 是总体偏度,则可用 w 代替公式(5)中的 k 来进行分数位的分布估计^[39]。在本研究实例中,可计算出上述时间序列其相对变化量的期望为 -0.00542,标准差为 0.27149,总体偏度为 -2.446。则可算得 $k = 1.65$ 时 $w = 0.9477$ 。在公式(6)中修正 1.65 为 0.9477 即为本例中的计算公式。由此可得表 3 所示的 EVR 值计算结果。

EVR 值表示给定置信水平下未来损失的大小。上述结果表示在给定置信水平 95% 下未来给定时间内生

① 李佳. 绿洲生态系统服务功能价值评估——以民勤绿洲为例. 兰州大学硕士学位论文, 2007.

态价值损失的上限。一年 *EVR* 值为 11066 万元表示:在给定置信水平为 95% 时,民勤县未来一年内生态服务价值损失的上限是 11066 万元;换句话说,有 95% 的把握说,从计算当前年计(本例中当前年为 2005 年),未来一年内民勤县生态系统服务功能的价值的减少不会超过 11066 万元。再如,3a *EVR* 值为 19167 万元表示:有 95% 的把握说,从计算当前年计(本例中当前年为 2005 年),未来 3a 内民勤县生态系统服务功能价值的减少不会超过 19167 万元。

表 2 民勤县生态系统服务功能的价值(1950~2005)(RMB 万元)

Table 2 The value of ecosystem services in Minqin(1950~2005)(10^4 RMB yuan)

年份 Year	生态系统服务功能价值 The values of ecosystem services	年份 Year	生态系统服务功能价值 The values of ecosystem services	年份 Year	生态系统服务功能价值 The values of ecosystem services
1950	595677	1969	488906	1988	468414
1951	595342	1970	491823	1989	470802
1952	595365	1971	486122	1990	467309
1953	595132	1972	487502	1991	469708
1954	594806	1973	488757	1992	469788
1955	592853	1974	458320	1993	412062
1956	595472	1975	460087	1994	436314
1957	594181	1976	459091	1995	435259
1958	583048	1977	461646	1996	437212
1959	549145	1978	461090	1997	436553
1960	547608	1979	462425	1998	439553
1961	532970	1980	463608	1999	441446
1962	477190	1981	464873	2000	444644
1963	476817	1982	461635	2001	440201
1964	477195	1983	463009	2002	446849
1965	480374	1984	458783	2003	450029
1966	484644	1985	465352	2004	453003
1967	486404	1986	468295	2005	432478
1968	487436	1987	469343		

表 3 由 *EVR* 方法计算出给定置信水平 95% 下生态服务价值损失上限(RMB 万元)

Table 3 The results of maximum losing value of ecosystem services on given confident levels 95% using *EVR* method (10^4 yuan)

置信水平 Confidence level	1 年 <i>EVR</i> 值 1 year <i>EVR</i>	2 年 <i>EVR</i> 值 2 year <i>EVR</i>	3 年 <i>EVR</i> 值 3 year <i>EVR</i>	5 年 <i>EVR</i> 值 5 year <i>EVR</i>
95%	11066	15650	19167	24745

4 结论与讨论

(1)生态资本资产的价值化为生态系统总体风险管理提供了可能性,金融风险分析技术的引入提供了一种可以量化研究生态系统未来风险的方法。尽管这两种方法的结合还有很多问题,但这种探索性的研究对生态经济的发展以及生态系统管理无疑是一种有益的尝试。本文就生态系统服务功能的价值作为生态资本资产,结合 *VaR* 方法建立了生态系统风险分析的 *EVR* 模型,并就民勤县为研究样区进行了实例研究。

(2)*EVR* 值将生态资产面临的风险具体化为一个数字,意义明确、计算简单,有利于生态管理目标的实现;且不同生态资产可相互比较,为管理者和研究者提供了生态系统测度的统一工具,便于科学家和决策者之间进行交流。*EVR* 值比较明确地测度了人类对自然负面影响的程度,可以在生态系统管理和公众了解生态影响中起到作用。

(3)实例研究结果给出了 *EVR* 值具体计算过程,也是 *EVR* 方法的一个应用。研究结果表明,研究区在 95% 置信水平下的 1 年生态价值损失上限与 2005 年度总生态服务价值的比在 2.6% 左右,3a 约为 4.4%。以

上结果对研究区生态资产的了解和监控是有意义的。但由于生态系统服务功能价值的研究还不完善,使得 *EVR* 方法给出的结果存在一定的误差。

(4) 由于是一种探索性的研究,只是在生态资本资产未来价值相对变化量呈正态分布的简单假设下建立了 *EVR* 的计算公式。针对所研究的区域生态系统,一旦获得生态资产变化的历史数据,也可以采用其它模型研究价值变化分布,然后根据所得分布计算 *EVR* 值。在本文的实例研究中,由于所得价值变化不满足正态分布,也是采用了修正的估计方法。在其它分布下的 *EVR* 计算公式有待于进一步的研究。多种生态资产相互作用的 *EVR* 方法将另文讨论。

(5) 生态资本资产的定量化可以有多种方法,如初级生产力的估计,能值估计等。尽管本文是在生态系统服务价值的基础上建立了生态资产风险分析方法,对其它生态资本定量化方法该风险分析方法也可以使用。当然,生态资本定量化研究目前还在发展阶段,估计结果十分粗糙,用精确的风险分析方法来估计不精确的原始数据本身有可以质疑的地方。但相信在生态经济学和生态系统生态学的发展下,对生态资本资产定量化的研究工作未来会更精确,而 *EVR* 方法将会显示出在生态系统管理中的价值。

References:

- [1] Palmer M A, Bernhardt E S, Chornesky E A, *et al.* Ecological science and sustainability for the 21st century. *Frontiers in Ecology and Environment*, 2005, 3(1):4—11.
- [2] Suter G W II, Vermier T, Munns W R Jr, *et al.* Framework for the integration of health and ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9:281—302.
- [3] Chen H, Liu J S, Cao Y, *et al.* Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1158—1566.
- [4] Power M, McCarty L S. Trends in the development of ecological risk assessment and management frameworks. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(1):7—18.
- [5] USEPA (U. S. Environmental Protection Agency). Framework for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-92/001. Washington, D C, USA, 1992.
- [6] USEPA (U. S. Environmental Protection Agency). Proposed Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002b, Washington, D C, USA, 1996.
- [7] USEPA (US Environmental Protection Agency). Stressor identification guidelines for ecological risk assessment. EPA/822-B-00/025. Office of Water, Washington D C, USA, 2000.
- [8] Sergeant A. Management objectives for ecological risk assessment -developments at US EPA. *Environmental Science Policy*, 2000, 3(2):95—98.
- [9] Li G Q, An S Q, Chen X L. Review on ecological risk research. *China Journal of Ecology*, 1999, 18(4):57—64.
- [10] Yin H W. Ecological risk assessment. Shanghai: East China Science and Technology University Press, 2001.
- [11] Valiela I, Tomasky G, Hauxwell J, *et al.* Producing sustainability: management and risk assessment of land-derived nitrogen loads to shallow estuaries. *Ecological Application*, 2000, 10: 1006—1023.
- [12] Rachel N W, Bruce K H. Quantitative consideration of ecosystem characteristics in an ecological risk assessment: A case study. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(7):1805—1814.
- [13] Forbes V, Calow P. Applying Weight-of-evidence in retrospective ecological risk assessment when quantitative data are limited. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8: 1625—1639.
- [14] Wayne G L. The frontier in ecological risk assessment at Expanding spatial and temporal scales. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9: 1415—1424.
- [15] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W II, *et al.* Assessing ecological risk on regional scale. *Environmental Management*, 1990, 14:325—332.
- [16] Robert B W, Hallett J H, David S D. An Assessment of Ecosystem Risks in the St Croix National Scenic Riverway. *Environmental Management*, 2000, 25(6): 599—611.
- [17] Li W D, Li Z Z, Wang J Q. Evaluation of oasis ecosystem risk by reliability theory in an arid area: A case study in the Shiyang River Basin, China. *Journal of Environment Science*, 2007, 19(4): 508—512.
- [18] Findlay C S, Zheng L G. Estimating ecosystem risks using cross-validated multiple regression and cross-validated holographic neural networks. *Ecological Modelling*, 1999, 119(1): 57—72.
- [19] Sierra R, Campos F, Chamberlin J. Assessing biodiversity conservation priorities: ecosystem risk and representativeness in continental Ecuador. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 59 (2): 95—110.
- [20] Oka T, Matsuda H, Kadono Y. Ecological Risk-Benefit Analysis of a Wetland Development Based on Risk Assessment Using “Expected Loss of

- Biodiversity". *Risk Analysis*, 2001, 21(6): 1011—1024.
- [21] Medaniel T L, Axelrod L J, Slovic P. Perception of ecological risk to water environments. *Risk Analysis*, 1997, 17(3): 291—298.
- [22] Rosana M, Sverker M. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETER). *Human and Ecological Risk Assessment*, 2004, 10(2): 349—371.
- [23] Walker R, Landis W, Brown P. Developing a regional risk assessment: A case study of a Tasmania agricultural catchments. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7(2): 417—439.
- [24] Angela M O, Wayne G L. A regional multiple stressor risk assessment of the Codorus Creek watershed applying the relative risk model. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(2): 405—428.
- [25] Fu Z Y, Xu X G, Lin H P. A regional ecological risk assessment of the swamp at Liaohe River delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 365—373.
- [26] FU Z Y, XU X G. Regional ecological risk assessment. *Geoscience Development*, 2001, 16(2): 267—271.
- [27] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. A regional ecological risk assessment of the swamp at Yellow River delta. *Journal of Peking University (Nat. Sci. Ed.)*, 2001, 37(1): 111—120.
- [28] Chen P, Pang X L. Ecological risk analysis of regional landscape in inland river watershed of arid area—a case study of Sangong River Basin in Fukang. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(4): 116—120.
- [29] Daily G C. *Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington D C: Island Press, 1997.
- [30] Costanza R, d'Arge R, Rudolf de G, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253—260.
- [31] Zhang Z Q, Xu Z M, Cheng Q D. Value of the Ecosystem Services in the Heihe River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, (4): 360—366.
- [32] Zhang Z Q, Xu Z M, Cheng Q D. Valuation of ecosystem service and natural capital. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, (11): 1918—1926.
- [33] Xu Z M, Cheng Q D, Wang G X. A study on the estimation of economic loss from ecological deterioration—take Zhangye Prefecture as an example. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(5): 498—504.
- [34] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. Pilot study of China's land ecosystem service functions and its ecological economics value. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607—613.
- [35] Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, *et al.* Evaluation of the ecosystem services of grassland in China. *Journal of Natural Resource*, 2001, 16(1): 47—53.
- [36] Wang C F. *Management of Financial Market Risk*. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.
- [37] Britten M J, Schaefer S M. Non-Linear Value-at-Risk. *European Finance Review*, 1999, 2: 161—187.
- [38] Shao N P, Liu X P, Qu X Y. Valuation of Lake Wetland ecosystem services of Yinchuan City. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9): 1625—1630.
- [39] Gong G L. *Probability and Statistics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

参考文献:

- [3] 陈辉,刘劲松,曹宇,等.生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558—1566.
- [9] 李国旗,安树青,陈兴龙,等.生态风险研究述评. *生态学杂志*, 1999, 18(4): 57—64.
- [10] 殷浩文. *生态风险评价*. 上海:华东理工大学出版社, 2001.
- [25] 付在毅,许学工,林辉平,等.辽河三角洲湿地区域生态风险评价. *生态学报*, 2001, 21(3): 365—373.
- [26] 付在毅,许学工.区域生态风险评价. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 267—271.
- [27] 许学工,林辉平,付在毅,等.黄河三角洲湿地区域生态风险评价. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(1): 111—120.
- [28] 陈鹏,潘晓玲.干旱区内陆流域区域景观生态风险分析——以阜康三工河流域为例. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 116—120.
- [31] 张志强,徐中民,程国栋.黑河流域生态系统服务的价值. *冰川冻土*, 2001, (4): 360—366.
- [32] 张志强,徐中民,程国栋.生态系统服务与自然资本价值评估. *生态学报*, 2001, (11): 1918—1926.
- [33] 徐中民,程国栋,王根绪.生态环境损失价值的初步研究. *地球科学进展*, 1999, 14(5): 498—504.
- [34] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607—613.
- [35] 谢高地,张钊铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47—53.
- [36] 王春峰. *金融市场风险管理*. 天津:天津大学出版社, 2001.
- [38] 邵宁平,刘小鹏,渠晓毅.银川湖泊湿地生态系统服务价值评估. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1625—1630.
- [39] 龚光鲁. *概率论与数理统计*. 北京:清华大学出版社, 2006.