

区域生态安全预警指数 ——以辽河流域为例

王 耕¹, 吴 伟²

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 大连理工大学管理学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:生态安全不仅体现在某个时间段的状态上,还与安全隐患密切相关,区域生态安全是安全状态、隐患因素、演变趋势、时间、空间以及安全主体的函数。只有将其状态和隐患结合起来研究,才能科学而正确地对生态安全未来演变趋势做出判断,实现生态安全危险状态的预警。文章以辽河流域为例提出预警指数测算方法:①确立生态安全状态——隐患综合评价指标体系。②采用数学方法计算安全状态指数。③采用安全评价方法计算隐患指数。④根据多目标决策准则,采用状态指数和和隐患指数的并合方法计算预警评价的结果指数。评价结果与实地考察情况基本一致,可以为决策部门提供生态安全预警依据。

关键词:区域生态安全;预警指数;辽河流域

文章编号:1000-0933(2008)08-3535-08 中图分类号:Q988 文献标识码:A

Research on Region ecological security early warning index: a case of Liaohe River watershed

WANG Geng¹, WU Wei²

1 Urban and Environmental School of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 Management School of Dalian University of Technology, Dalian 116029, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3535 ~ 3542.

Abstract: Eco-security as a hot research area in Resource and Environment Science, not only assessments secure state, but also relates to potential danger factors. It is a function of secure state, potential danger, evolving trend, time, space and object. Only integrating secure state with danger, secure trend can be judged accurately, and early warning can be realized. A case study of Liaohe River has developed a method of eco-security warning in this paper. The method includes 4 steps: ①Establishing eco-security state—danger evaluation indicator system. ②Evaluating secure state index by fuzzy membership degree. ③Assessing potential danger index by accident analyzing method of Graham. ④Calculating early warning index by multi-objective decision-making rule. The results are consistent with autoptical work. The method is verified that we can better know the status of warning.

Key Words: regional ecological security; early warning index; Liaohe River watershed

生态安全作为生态学、资源与环境科学、地学的前沿任务和主要的研究领域,近年来许多学者进行了概

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70573018);国家教育部科技司重点资助项目(105054)

收稿日期:2007-05-11; 修订日期:2007-11-23

作者简介:王耕(1973~),女,辽宁沈阳人,博士,主要从事生态安全与环境管理研究. E-mail: wanggeng2003@sohu.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 70573018); Science and Technology Department of National Ministry of Education Foundation of China (No. 105054)

Received date: 2007-05-11; **Accepted date:** 2007-11-23

Biography: WANG Geng, Ph. D., mainly engaged in ecological security and ecological management. E-mail: wanggeng2003@sohu.com

念探讨^[1,2],理论分析^[3~5],以及广泛的评价研究^[6~10],如美国环保局环境监测与评价项目^①和区域生态脆弱评价项目^②,俄罗斯国家生态预报^③,我国长江三峡库区^[11]、海岛区^[12,13]和自然保护区等生态安全评价及生物保护等研究^[14,15]。虽然生态安全预警研究已做了局部的探索,而且技术和方法比较先进,但是预警系统建立的理论与方法尚不成熟,尤其是预警指数的确定一直是预警系统建立的最大困难。已经建立的预警系统要么是以状态评价结果为预警依据,要么是以风险因素评价结果为预警依据,此两者均不能解释生态安全的本质状况,甚至有时造成防御资源的浪费,因此预警总体水平较低,预警的阈值确定更有争议。本文在生态安全状态评价基础上,综合隐患因素的影响,提出状态指数和隐患指数耦合的生态安全预警指数测算方法,定量表征生态安全整体状况,以便准确而及时地掌握生态安全的负荷水平及其受损状态,适时地采取必要的调控措施,以期对我国的生态安全预警研究有一定的指导意义。

1 区域生态安全预警指数定义

1.1 生态隐患视角的生态安全理解

安全一词描述的是一种状态,即人物将不会受到伤害和损失的理想状态,但这种状态也决非是一种事故为零的所谓“绝对安全”的概念^[16]。从科学的角度讲,“绝对安全”的状态在客观上是不存在的,安全本身带有很大的模糊性、不确定性和相对性。安全所描述的状态具有动态特征,随时间而变化,并且是一个复杂物质系统的动态过程,其过程或状态的目标是使人、物将不会受到伤害或损失。从人与环境复合系统相互作用来看,“生态安全”的概念既包括相对状态(生物与环境或与其他生物之间的相对状态)安全,又包括相互关系(生物与环境或与其他生物之间的相互关系)安全的动态过程,是安全状态、隐患因素、演变趋势、时间、空间以及安全主体的函数。区域生态安全是人与环境复合系统保障由于自然因素和人类活动或二者共同作用而产生的生态安全隐患对人类生态安全空间不构成威胁的状态或演变趋势的可能性。这里生态安全状态并不是压力-状态-响应(P-S-R)概念模型中的“状态”表征,而是生态安全隐患随着时间和空间发展变化的瞬时阶段,它是生态安全空间的一个截面,即状态空间。该概念以人为评价主体,“生态”的涵义是指人与环境复合系统,既站在主体的位置来看主体自身是否安全,主体对客体是否安全,又站在客体的位置来看客体对主体是否安全。“安全”的涵义既考虑了现状确定性因素所表现的安全状态,又考虑了不确定性因素对未来安全所造成的隐患影响^[17,18]。这样区域生态安全评价的要素范围必须扩展,应既包括某一时刻或时期的状态评价,又包括未来某一时刻或时期的隐患因素影响评价。安全预警不仅要关注安全的状态,更要关注隐患因素。安全防范重点应集中在隐患因素上,才能体现本质生态安全。

1.2 生态安全预警指数

所谓预警的“警”是指事物发展过程中出现的极不正常的情况,也就是可能导致风险的情况,亦称警情。例如,经济运行严重偏离正常发展轨道就是经济发展遇到了警情^[19]。所谓“预警”,就是指对于某一经济系统未来的演化趋势进行预期性评价,以提前发现特定经济系统未来运行可能出现的问题及成因,为提前进行某项决策,实施某项防范措施和化解措施提供依据,是对危机或危险状态的一种预先信息警报或警告^[20]。生态安全是一个动态演变的过程,生态安全不仅体现在某个时间段的状态上,还与安全隐患密切相关。只有将其状态和演变趋势结合起来研究,才能科学而正确地对生态安全未来演变趋势做出判断,实现生态安全危险状态的预警。以往单凭安全状态预警以及单凭隐患的风险预警均不能客观反映生态安全的真实情况,甚至有时造成预警资源的浪费。根据以上理论分析,生态安全预警评价实质上是集状态和隐患的耦合评价,预警指数应是状态指数和隐患指数的耦合指数。系统状态评价结果为安全状态指数,隐患评价结果为隐患指数。

设状态指数级别为S, S1级、S2级、S3级、S4级、S5级分别为生态安全状态最安全、较安全、中等安全、较

① Research Strategy of Environmental Monitoring and Assessment Program. <http://www.epa.gov>

② Integrating Economic and Ecological Models across Spatial Scales to Assess Aquatic Species Vulnerability to Timber Harvest and Land Use Change in Freshwater Streams of the Southeastern U. S. <http://www.epa.gov/rev>

③ Кочуров Б. И. Экологические ситуации и их прогноз. Геогр и прир-ресурсы, 1992, 2: 5—13.

不安全、不安全;设隐患指数为 T , T_1 级、 T_2 级、 T_3 级、 T_4 级、 T_5 级分别为隐患指数最小、较小、中等、较大、最大。不同的安全状态在不同的隐患威胁下,安全性不同。当状态最安全,且隐患最小时,系统的安全性是最好的,确定为 I 级安全;当状态为较安全,隐患最小时,系统的安全性应该是 II 级安全;依此类推。反过来,当状态最安全,隐患最小,安全级别为 I 级;当状态最安全,隐患较小,安全级别为 II 级,依此类推,如表 1 所示。这样,在生态安全状态评价和隐患评价基础上求得的综合安全性,体现了生态安全在不确定性因素影响下动态演变的状态,可以为生态安全预警提供判断依据,对不同预警方案的设计,警戒线的设置有很大意义。

表 1 生态安全动态评价级别
Table 1 Eco-security dynamic evaluation grade

项目 Item	隐患级别 Danger grade				
	T_1 级(最小) T_1 grade (min)	T_2 级(较小) T_2 grade (less)	T_3 级(中等) T_3 grade (middle)	T_4 级(较大) T_4 grade (more)	T_5 级(最大) T_5 grade (max)
S1 级(最安全) S1 grade (most secure)	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
S2 级(较安全) S2 grade (more secure)	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级
S3 级(中等安全) S3 grade (middle secure)	III 级	IV 级	V 级	VI 级	VII 级
S4 级(较不安全) S4 grade (less secure)	IV 级	V 级	VI 级	VII 级	VIII 级
S5 级(不安全) S5 grade (least secure)	V 级	VI 级	VII 级	VIII 级	IX 级

2 区域生态安全预警指数测算方法

2.1 状态与隐患的耦合指数测算

状态指数和隐患指数作为生态安全评价的两个目标,各有特征。设定状态指数为 $S=1$ 时,为最安全状态; $S=0$ 时,设定为不安全状态,状态指数 S 在 $0 \sim 1$ 中的某个实数表示了不同的安全状态,即 $S \in [0 \sim 1]$ 。设隐患指数 $T=1$ 时为最大隐患指数; $T=0$ 时为最小隐患指数,隐患指数 T 在 $0 \sim 1$ 时的某个实数也表示了最可能的隐患指数。状态指数要求越大越好(安全级别越小越好),而隐患指数要求越小越好。如果以 d 表示目标满足程度的参数,则当 $d=1$ 时,表示对目标最满意,而当 $d=0$ 时表示目标最不满意,且 $0 \leq d \leq 1$,根据最简单的线性内插,按上述方法可得出不同目标函数和满意度之间的变化关系,如图 1 和图 2 所示。

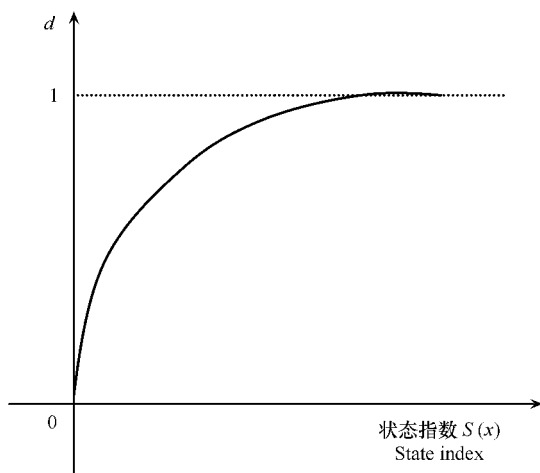


图 1 同一生态安全状态下状态指数演变趋势的变化
Fig. 1 The trend and change of state index under the same eco-security state

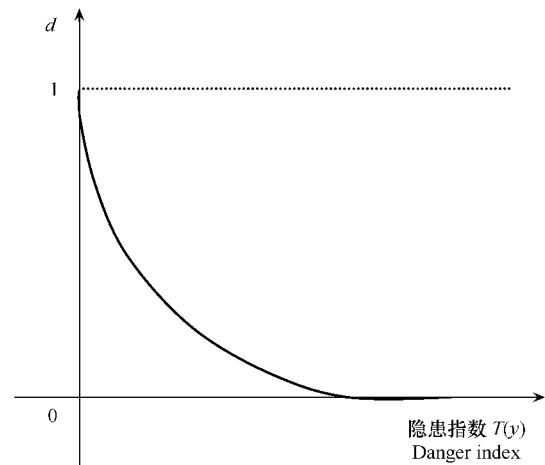


图 2 同一生态安全状态下隐患指数演变趋势的变化
Fig. 2 The trend change of danger index under the same eco-security state

在多目标决策分析中^[21],如果已知目标函数的特性曲线,对于任一多目标问题,当给定一组变量,即可以得到一组相应的 d 。在生态安全评价中,状态指数对属性 x 具有 $S(x)$ 曲线,隐患指数对属性 y 具有 $T(y)$ 曲线,而 x, y 同另一属性 z 满足某个函数关系,即约束条件 $f(x, y, z) = 0$,那么总可以设法将状态指数曲线 $S(x)$

和隐患指数 $T(y)$ 并合成相对应的某一属性 z 的耦合曲线,这样就定量地表达了状态指数和隐患指数的耦合结果。借用并合符号来表示两者的兼容:

$$ST(z) = \langle S(x) \cdot T(y) \rangle$$

$$\text{约束条件 } f(x, y, z) = 0$$

$$x \in S, y \in T, z \in ST$$

式中, $\langle \dots \rangle$ 表示并合的运算过程, S, T, ST 分别表示属性 x, y, z 允许集合。

结合图 1 和图 2, 进一步分析, 必有关系式:

$$ST(z) \leq \max_{x,y} \min_{S,T} \{S(x), T(y)\}$$

$$\text{约束条件 } f(x, y, z) = 0$$

$$x \in S, y \in T, z \in ST$$

$$\text{当 } x = y = z \text{ 时, 有 } ST(z) = \min_{S,T} \{S(z), T(z)\} \quad z \in ST$$

这类似于模糊数学中的“交”。

同样, 要使耦合结果更严格, 可引用乘法公式, 用公式表示为:

$$ST(z) = \min_{x,y} \{S(x) \times T(y)\}$$

$$\text{约束条件 } f(x, y, z) = 0$$

$$x \in S, y \in T, z \in ST$$

这类似于多目标决策准则中的一般乘法准则。当然, 如果所反映的状态指数和隐患指数重视程度有所偏重的话, 可运用加权运算来解决。

2.2 生态安全状态指数测算

生态安全状态评价模型很多, 由于安全是一个相对的概念, 在安全与不安全之间存在着模糊的界限, 而且状态评价的标准不统一, 因此本文选取模糊隶属度方法作为生态安全状态评价的模型。

2.3 生态安全隐患指数测算

隐患指数的计算根据事故隐患评估的格雷厄姆法方法而得。格雷厄姆法 (Graham) 是由美国格雷厄姆 (K. J. Graham) 和金尼 (G. F. Kinney) 提出^[22], 隐患发生危险的可能性 L 可用其触发事故或灾害的概率来表示, 不可能发生的事件为 0, 而必然发生的事件为 1。考虑概率计算数据的不完备, 这里用分值来表示发生的可能性。缓发型隐患一直存在, 且必然触发, 分数定为 1。突发型隐患发生可能性分值可采用其年发生频率值, 大于 1 的频率取值为 1。对于人出现于危险情况中的时间 E 而言, 突发型隐患发生时间短, 危险性分值较小, 缓发型隐患是连续发生的, 发生时间长, 危险性分值较大。规定连续出现在危险环境中的情况为 10, 而每年仅出现一次或相当少的时间为 1, 这二种情况之间的情况取中间值。隐患触发生后的危险程度用 C 表示。用这 3 个因素分值的乘积 $D = L \times E \times C$ 来评价隐患因素的危险性, D 值越大、隐患触发后造成的危险性也越大。

3 实例分析

3.1 辽河流域生态安全状态——隐患综合评价体系

生态安全评价的一项重要工作就是要对影响生态安全的相关因素予以筛选、分类, 以便客观地描述同类因子内部或非同类因子之间的耦合关系, 解释各因素对生态安全的影响过程、结果和调控方式, 这就需要建立一套科学、简捷、有效的评价指标体系, 而指标的确立又取决于对研究区域生态安全影响因素的把握程度。区域生态安全不仅体现在某个时间段的状态上, 还与安全隐患密切相关。生态安全评价指标不仅要反映生态系统各子系统的安全状态以及行为主体的安全意识、应对能力和应对措施的效率, 还要反映各子系统之间的隐患因素影响, 同时生态安全指标体系需要的信息必须是可得的, 所建立的指标体系必须是有意义的, 对决策者和生态系统的管理者都有切实的指导作用, 对广大社会公众具有教育意义以及对公众的行为选择和行为调整

具有指导意义。

3.1.1 基于 P-S-R 生态安全状态评价指标体系

生态安全状态是生态安全随着时间和空间发展变化的某一时刻或阶段。生态安全状态评价目的是反映评价区域内生态环境或生态系统的安全状态和存在的问题。评价对象是生态环境系统,评价指标本质上要求是描述生态环境系统特征因子的变量。本研究状态评价指标体系是根据权威的 P-S-R 框架来建立的,根据系统性、指标选择的区域性、可比性、真实性和实用性,考虑到资料收集的可能性,在广泛研究国内外生态评价指标体系案例基础上^[23,24],从国土状态、水状态、大气状态和生物状态构筑状态层指标,从人口、经济水平和经济发展压力构筑压力层指标,从人文、社会响应能力与措施构筑了响应层指标,共同构建区域生态安全状态评价指标体系(表 2)^[25,26]。

表 2 区域生态安全状态评价指标体系
Table 2 Regional eco-security state assessment indicator system

状态指标 State indicator			
国土 A	水资源 B	大气 C	生物 D
人均耕地面积(666.7m ²) A1	干旱指数 B1	SO ₂ 排放浓度(mg/m ³) C1	自然保护区占国土面积(%) D1
人口密度(人/km ²) A2	人均可利用的水资源量(m ³) B2	空气污染指数 C2	
森林覆盖率(%) A3	水资源开发强度(%) B3		
粮食亩产(kg) A4	水资源利用率(%) B4		
水土流失占国土面积比(%) A5	产水模数(10 ⁴ m ³ /km ²) B5		
	有效灌溉面积比例(%) B6		
	化肥施用折纯量(kg/hm ²) B7		
	COD 排放量(t/a) B8		
	河流水质污染级别 B9		
	地方病人口比例 B10		
压力指标 State indicator		响应指标 State indicator	
人口 E	经济水平 F	经济发展压力 G	人文社会响应 H
人口增长率(‰) E1	人均 GDP(RMB yuan) F1	GDP 年均增长率(%) G1	基本建设投资占 GDP 比例(%) H1
	失业人口比重(%) F2	第一产业增加值比例(%) G2	教育事业支出占财政支出比例(%) H2
	产值密度(10 ⁴ RMB yuan/ km ²) F3	第二产业增加值比例(%) G3	环境污染治理投资占 GDP 比例(%) H3
		万元工业产值耗水量(m ³) G4	工业废水达标率(%) H4
		农田灌溉亩均用水量(m ³) G5	城镇居民储蓄与 GDP 比值(%) H5
		农业电力消费(kwh/hm ²) G6	城镇在岗职工人均年工资总额(RMB yuan) H6
		GDP 能耗系数(ton of SCE)(t/10 ⁴ RMB yuan) G7	人均粮食生产总量(kg) H7
			农业机械总动力(kwh) H8
			学龄前儿童入学率(%) H9

A: Land; B: Water resource; C: Atmosphere; D: Biology; E: Population; F: Economic status; G: Economic development pressure; H: Society response; A1: Area of cultivated land per person; A2: Density of population; A3: Forest-coverage rate; A4: Grain yield(666.7m²); A5: Proportion of water and soil loss and sandy to land areas; B1: Arid index; B2: Utilizable water resources per person; B3: Water resources development intensity; B4: Percentage of water usage; B5: Water yield modulus; B6: Proportion of effective irrigated areas; B7: Consumption of chemical fertilizers; B8: Volume of COD discharged; B9: River water quality contamination grade; B10: Population proportion of Endemic; C1: SO₂ emission intensity; C2: Air contamination index; D1: Percentage of natural reserves to land area; E1: Population increase rate; F1: Per capita GDP; F2: Proportion of unemployed persons; F3: Gross domestic product density; G1: Ratio of value added by primary industry; G2: Ratio of value added by secondary industry; G3: Ratio of value added by tertiary industry; G4: Water usage of industrial output value of 10 000 RMB Yuan; G5: Water usage of agricultural unit of area; G6: Electricity consumed in rural area; G7: Energy consumption per 10 000 yuan; H1: Investment in capital construction as percentage of GDP; H2: Educational expenses as percentage in financial expenditures; H3: Investment in environment pollution treatment; H4: Percentage of industrial waste water up to the standards for discharge; H5: Proportion of urban and rural savings deposits to GDP; H6: Total wages of staff and workers employed in Urban and Rural; H7: Per capita grain yield; H8: Total power of agricultural machinery; H9: Percentage of school-age children enrolled

3.1.2 生态安全隐患评价指标体系

区域生态安全的研究对象是一个结构复杂的综合系统,其涵盖的层面广阔,包括自然生态系统、社会子系统、经济子系统等等,因此生态安全隐患既包括自然界隐患,如地震、洪水等,又包括人类活动带来的隐患,如环境事故等;既有突发型隐患,如自然灾害等,又有缓发型隐患,如水土流失、荒漠化等;既有污染型隐患,如大气污染、水污染等,又有资源型隐患,如水资源紧缺等。只要隐患具有可能直接或间接地产生不利的安全状态影响并具有不确定性,即是区域生态安全灾变风险研究所应考虑的。根据隐患因素之间的相互关系,充分考虑空间和时间的差异,对辽河流域 2000 年 5 月 13 日拍摄的地球资源探测 7 号卫星影像完成土地利用类型的划分,获取土地沙化、水土流失等数据,结合野外考察和收集的 latest 资料,从大气圈、水圈、岩石圈、生物圈以及人类活动的隐患因素出发,确定了多维空间结构的生态安全隐患评价指标体系(表 3)^[17],其中突发型隐患发生频次依据 1949 ~ 2004 年 55a 间区域的历史纪录统计。

表 3 辽河流域生态安全隐患评价指标体系

Table 3 Ecol-security potential danger assessment indicator system of Liaohe River watershed

五大圈层 Five sphere	隐患因子指标 Danger factor indicator
大气圈隐患因子 Atmosphere danger factor	干旱指数*,大旱频次*,重旱频次*,轻雨涝频次*,中雨涝频次*,大雨涝频次*,大风频日*,扬沙频日*,沙尘暴频次*,霜冻频次*,冰雹频日*,寒潮频次*,雪灾频次* Arid index ,Drought frequency, Heavy drought frequency, Light waterlog frequency, Middle waterlog frequency, Heavy waterlog frequency, Windstorm frequency, Sandy frequency, Sandstorm frequency, Frost frequency, Hail frequency, Cold wave frequency, Snow frequency
水圈隐患因子 Hydrosphere danger factor	大洪水频次*,重大洪水频次*,特大洪水频次*,地方病比例 Flood frequency, Heavy flood frequency, Fatal flood frequency, Endemic proportion.
岩石圈隐患因子 Geosphere danger factor	地震烈度*,地面沉降次数*,泥石流滑坡次数*,崩塌次数*,冻土深度 Earthquake intensity, Ground subsidence frequency, Debris flows frequency, Landslide frequency, Frozen earth depth
生物圈隐患因子 Ecosphere danger factor	自然保护区分布,近 20a 来植被锐减指数,草地退化程度,农业病虫害频次*,农业草害频次*,森林病虫害频次*,森林火灾次数* Percentage of natural reserves to land area, Forest decrease index in recent 20 years, Grass land degradation degree, Plant diseases and insect pests frequency, Forest fire frequency
人类活动隐患因子 Human activity danger factor	水资源余缺量,水土流失面积比,地下水开采模数,工业 SO ₂ 污染程度,降水 PH 值,COD _{Cr} 超标倍数,BOD ₅ 超标倍数,NH ₃ -N 超标倍数,环境事件 Water resource surplus and deficiency, Water and soil loss area proportion, Groundwater exploitation modulus, Volume of SO ₂ contamination degree, Precipitation PH, Times of COD _{Cr} higher than standard grade, Times of BOD ₅ higher than standard grade, Times of NH ₃ -N higher than standard grade, Environmental event

* 为突发性隐患因素 The danger unexpectedly

3.2 生态安全预警评价

由状态——隐患耦合分析,生态安全状态指数、生态安全隐患指数及生态安全预警指数如表 4 所示。

4 结论

针对生态安全预警指数缺乏的研究现状,提出预警指数的定义和测算方法,并以辽河流域为例说明该方法的应用,为生态安全预警系统的建立奠定了理论依据。所得结论如下:

(1) 在生态安全状态评价的基础上,增添了安全隐患因素的影响,根据多目标决策原则,提出状态-隐患耦合的预警指数,反映了生态安全真正安全状态,比单独生态安全状态预警和生态安全隐患风险预警更便于预警方案的设计。

(2) 根据生态安全预警指数可以创建预警等值线。由表 3,状态指数和隐患指数分别划分为 5 级,组合评价级别为 9 级,这 9 个级别细划了状态与隐患之间的组合关系,进行简单的内插,可以做出无数条凸向原点的预警指数等值线。

(3) 根据不同安全级别等值线确定不同的预警级别,可以设置预警阈值,建立预警系统。等值线绘制的

理论和方法很多,有 TIN 生成等值线法,格网法等。目前借助 GIS 的 Vertical Mapper 程序正在创建生态安全预警指数等值线或等值面,以定量表征生态安全预警状态与空间分布,为防范和决策提供科学而正确的依据^[19,27]。

表 4 辽河流域生态安全预警指数计算

Table 4 Eco-security early warning index computation of Liaohe River watershed

地区 Region	生态安全状态指数 Eco-security state index	生态安全隐患指数 Eco-security danger index	生态安全预警指数 Eco-security early warning index
四平市 Siping City	0.3374	0.0688	0.0234
辽源市 LiaoyuanCity	0.5334	0.0598	0.0319
沈阳市 ShenyangCity	0.2320	0.0847	0.0191
铁岭市 TielingCity	0.3266	0.1227	0.0397
抚顺市 FushunCity	0.3492	0.0711	0.0246
本溪市 BenxiCity	0.5776	0.0684	0.0394
辽阳市 LiaoyangCity	0.4314	0.0825	0.0356
鞍山市 AnshanCity	0.4872	0.0867	0.0420
营口市 YingkouCity	0.2135	0.0715	0.0153
盘锦市 PanjinCity	0.3747	0.0677	0.0256
锦州市 JinzhouCity	0.3249	0.1289	0.0420
阜新市 FuxinCity	0.5476	0.1208	0.0661
朝阳市 ChaoyangCity	0.8268	0.0786	0.0650
通辽市 TongliaoCity	0.3528	0.1124	0.0398
赤峰市 ChifengCity	0.3363	0.1199	0.0401

(4) 文章选取辽河流域 15 个城市进行了生态安全预警评价,评价结果与实地考察情况基本相符,并与欧盟环境综合项目的水环境研究结果基本一致,说明这种研究方法具有一定的科学性,在流域生态化建设的实践与决策中指导意义较大。

(5) 影响流域生态安全变化的因素是复杂的,动态的,评价指标体系的确立还需要不断完善,应考虑辽河口水体的富营养化及近海赤潮等问题。

References:

- [1] Liu S Y, Zuo C Q, Meng Q L. Soil and water conservation and national ecological security. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 102 — 105.
- [2] Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(3): 354 — 358.
- [3] Wang G X, Cheng G D, Qian J. Several problems in ecological security assessment research. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(9): 1551 — 1556.
- [4] Cui S H, Hong H S, Huang Y F, *et al.* Progress of the ecological security research. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 5(4): 861 — 868.
- [5] Liu H, Wang H, Zhang X W. Research review on ecological security assessment. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1): 74 — 78.
- [6] Zhao Y Z, Zou X Y, Cheng H, *et al.* Assessing the ecological security of the Tibetan Plateau: Methodology and a case study for Lhaze County. *Journal of Environmental Management*. 2005, 1 — 12.
- [7] Shi X Q, Zhao J Z, Ouyang Z Y. Assessment of eco-security in the Knowledge Grid e-science environment. *The Journal of Systems and Software*, 2006, (79): 246 — 252.
- [8] Du Q L, Xu X G, Liu W Z. Ecological security assessment for the oases in the middle and lower Heihe River. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1916 — 1923.
- [9] Guo M, Xiao D N, Li X. Changes of landscape pattern between 1986 and 2000 in Jiuquan oasis, Heihe River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 457 — 466.
- [10] Liu Y, Liu Y Z, Xu P. Evaluation on ecological security of regional Land resources: A Case Study of Jiaying City, Zhejiang Province. *Resource Science*, 2004, 26(3): 69 — 75.
- [11] Zuo W. Study on comprehensive assessment of the regional ecological safety based on RS, GIS—a case study of Zhongxian County, Chongqing City. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2004. 66 — 89.
- [12] Xue X Z, Lin T, Cao X H. Building coastal ecological safety indicator system. *Xiamen University (Natural Science)*, 2004, 43(supplement):

179—183.

- [13] Xiao R B, Ouyang Z Y, Han Y S, *et al.* Ecological security assessment of Hainan Island. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 769—775.
- [14] Xu H G, Bao H S. On the method of ecological security design for nature reserves. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(7): 1266—1270.
- [15] Li W J, Wang Z J. A method for designing buffer zone in Yancheng Biosphere Reserve: taking red crown crane as objective species. *Chin J Appl Ecol*, 2000, 11(6): 843—847.
- [16] Pirages D C, Degeest T M. *Ecological Security: An Evolutionary Perspective on Globalization*. New York: Bowman & Littlefield Publishers, 2004, 14—25.
- [17] Wang G, Wu W. Research on Mechanism and an Indicator System for Impact Factor of Regional Ecological Security. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(5): 11—15.
- [18] Wang G, Wu W. Analysis on the Evolvement Mechanism and Course of Regional Ecological Security. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(1): 16—21.
- [19] Wang G, Wu W. Design on early warning system of water security of Liaohe River based on GIS. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(2): 16—22.
- [20] Fu B J. Regional eco-environmental warning theory and application. *Chin J Appl Ecol*, 1993, 4(4): 436—439.
- [21] Dong Z J, *et al.* *System engineering and operational research*. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. 303—309.
- [22] Hua Z S. Analysis of accident danger. *Journal of Gansu Metallurgy*, 2001, 3: 38—40.
- [23] Shi X Q, Zhao J Z, Ouyang Z Y. Urban eco security and its dynamic assessment method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3237—3243.
- [24] Wang G, Nie B C, Wang L, Wu W. Research on methods of ecological security assessment of the middle and lower reaches of Liaohe River based on GIS. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2005, 3(4): 18—23.
- [25] Wang G, Wu W. Assessment on ecological security spatial differences of the west areas of Liaohe River based on GIS. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 28—33.
- [26] Wang G, Wu W. Assessment on ecological security spatial differences of east areas of Liaohe River based on GIS. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(3): 119—122.
- [27] Wang G, Wu W. Research on visual assessment of watershed ecological security based on GIS. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(5): 667—672.

参考文献:

- [2] 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.
- [3] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1551—1556.
- [4] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 等. 生态安全研究进展. *生态学报*, 2005, 25(4): 861—868.
- [5] 刘红, 王慧, 张兴卫. 生态安全评价研究述评. *生态学杂志*, 2006, 25(1): 74—78.
- [8] 杜巧玲, 许学工, 刘文政. 黑河中下游绿洲生态安全评价. *生态学报*, 2004, 24(9): 1916—1923.
- [9] 郭明, 肖笃宁, 李新. 黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析. *生态学报*, 2006, 26(2): 457—466.
- [10] 刘勇, 刘友兆, 徐萍. 区域土地资源生态安全评价——以浙江嘉兴市为例. *资源科学*, 2004, 26(3): 69—75.
- [11] 左伟. 基于 RS、GIS 的区域生态安全综合评价研究——以长江三峡库区忠县为例. 北京: 测绘出版社, 2004. 66—89.
- [12] 薛雄志, 吝涛, 曹晓海. 海岸带生态安全指标体系研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(增刊): 179—183.
- [13] 肖荣波, 欧阳志云, 韩艺师, 等. 海南岛生态安全评价. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 769—775.
- [14] 徐海根, 包浩生. 自然保护区生态安全设计的方法研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1266—1270.
- [15] 李文军, 王子健. 盐城自然保护区的缓冲带设计——以丹顶鹤为目标种分析. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 843—847.
- [17] 王耕, 吴伟. 区域生态安全机理与扰动因素评价指标体系研究. *中国安全科学学报*, 2006, 16(5): 11—15.
- [18] 王耕, 吴伟. 区域生态安全演变机制与过程研究. *中国安全科学学报*, 2007, 17(1): 16—21.
- [19] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 辽河流域水安全预警系统设计研究. *大连理工大学学报*, 2007, 47(2): 16—22.
- [20] 傅伯杰. 区域生态环境预警理论与应用. *应用生态学报*, 1993, 4(4): 436—439.
- [21] 董肇君, 等编著. *系统工程与运筹学*. 北京: 国防工业出版社, 2003. 303—309.
- [22] 华遵山. 事故隐患分析. *甘肃冶金*, 2001, 3: 38—40.
- [23] 施晓清, 赵景柱, 欧阳志云. 城市生态安全及其综合评价方法. *生态学报*, 2005, 25(12): 3237—3243.
- [25] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 的西辽河流域生态安全空间分异特征. *环境科学*, 2005, 26(3): 28—33.
- [26] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 的东辽河流域生态安全空间差异评价研究. *安全与环境学报*, 2006, 6(3): 119—122.
- [27] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 网格技术的流域生态安全可视化研究. *大连理工大学学报*, 2006, 46(5): 667—672.