

# 基于 GIS 的西辽河流域生态安全空间分异特征

王耕<sup>1,2</sup>, 吴伟<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学环境与生命学院, 大连 116024; 2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029)

摘要: 生态安全评价与预警研究具有空间特性、非线性和随机性, 研究过程中必须处理大量的空间信息, 而空间分析和空间数据管理正是 GIS 的优势, 它使各环境要素的分布态势及彼此之间的拓扑关系一目了然, 并且图文并茂地展示全流域的生态安全格局. 在充分研究西辽河流域生态环境的基础上, 讨论了基于 GIS 的西辽河生态安全空间差异的评价方法. ①拟定“压力-状态-响应”(P-S-R) 指标体系, 实地调查并收集资料; ②数字化流域, 运用模糊 AHP 和综合比较法赋权并量化计算; ③建立西辽河流域生态安全指数 GRID 数据库, 通过 GIS 的空间 Interpolate 运算和 Assembly 分析, 阐述生态安全的空间分异特征.

关键词: 西辽河; 生态安全; 评价指标体系; GIS; 空间分异

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)05-0028-06

## Assessment on Ecological Security Spatial Differences of West Areas of Liaohe River Based on GIS

WANG Geng<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Life in Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. College of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Ecological security assessment and early warning research have spatiality; non-linearity; randomness, it is needed to deal with much spatial information. Spatial analysis and data management are advantages of GIS, it can define distribution trend and spatial relations of environmental factors, and show ecological security pattern graphically. The paper discusses the method of ecological security spatial differences of west areas of Liaohe River based on GIS and ecosystem non-health. First, studying on pressure-state-response(P-S-R) assessment indicators system, investigating in person and gathering information; Second, digitizing the river, applying fuzzy AHP to put weight, quantizing and calculating by fuzzy comparing; Last, establishing grid data-base; expounding spatial differences of ecological security by GIS Interpolate and Assembly.

**Key words:** west areas of Liaohe River; ecological security; assessment indicators system; GIS; spatial differences

近年来国内外许多学者从不同的学科背景针对不同区域的生态安全进行了热烈的讨论<sup>[1-5]</sup>, 尽管大多数学者在生态健康与生态风险角度趋于共识<sup>[6-9]</sup>, 但其自身的定义和评价方法与评价模型在不同学者间存在差异. 随着 GIS、RS、GPS(3S) 技术的崛起和模型技术的发展, 生态安全的研究有了新的契机<sup>[10-12]</sup>, 本文采用地理信息系统(GIS) 叠加分析、统计分析的方法, 针对辽河流域不同的生态环境, 分别对西辽河、东辽河、辽河中下游地区的生态安全做了基于“压力-状态-响应”概念框架(Pressure State Response, P-S-R)<sup>[13]</sup> 前期探索性评价研究, 其中西辽河生态安全态势对整个辽河流域水质治理与水质保护都有十分重要的理论和现实意义, 同时对小流域的水质管理也具有一定的参考价值.

### 1 研究范围

辽河是东北地区南部第一大河, 流经河北、内蒙古、吉林、辽宁 4 省区, 总长 1390 km, 流域总面积

(含浑河、太子河) 22.9 万 km<sup>2</sup>, 其中西辽河占 64.3%. 西辽河源于河北省七老图山脉的光头山, 流经宁城县等 21 个县市区(如图 1). 西辽河水质的污染严重, 干流 50% 断面为 V 类水质; 上游丘陵区水土流失严重, 土壤肥力逐年减退, 侵蚀模数达 500~5000 t/(km<sup>2</sup>·a); 且西辽河平原旱灾面积逐年扩大<sup>[14]</sup>. 可见, 西辽河流域生态系统正在退化, 水土保持能力日益减弱, 可持续发展的潜力濒临枯竭, 正处于生态系统不健康状态, 对整个流域的经济安全造成了极大的威胁.

### 2 研究方法

生态安全具有动态性和地域性, 需要引入 3S 技术. GIS 技术特征是具有空间分析、数据处理、成果

收稿日期: 2004-11-19; 修订日期: 2005-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70073003); 国家教育部博士点基金资助项目(20020141027); 辽宁省教育厅青年基金项目(2004F010).

作者简介: 王耕(1973~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事生态安全与生态管理方面的研究. E-mail: wanggeng2003@sohu.com

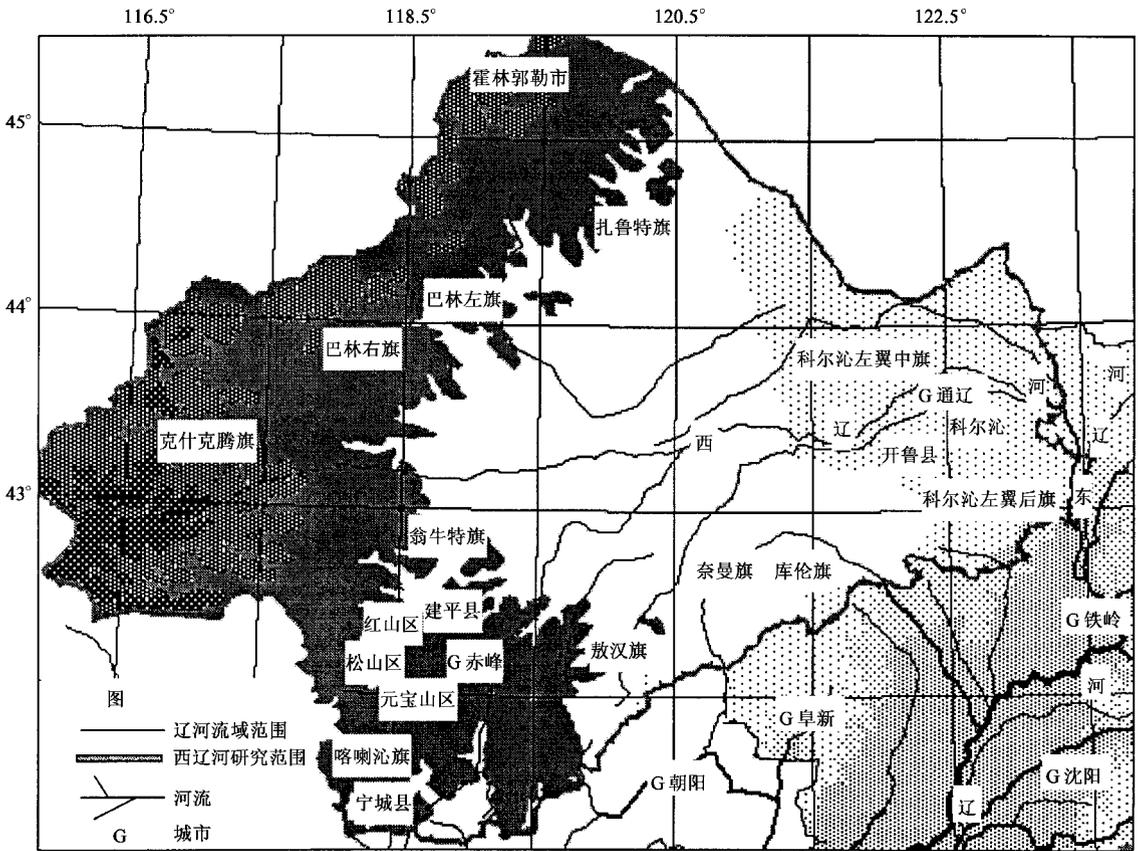


图 1 西辽河生态安全研究范围

Fig.1 Ecological security research areas of the west of Liaohe River

表达等优势;GPS 技术特点是易于空间定位;RS 适于大范围动态监测,但是应用 3S 技术的生态安全评价与预警的研究较少,目前如徐海根的应用 GIS 技术迭代法和整数规划的自然保护区生态安全设计的方法研究;左伟的基于 RS、GIS 和 Models 的长江三峡库区典型区——重庆市忠县区域生态环境系统安全评价等。笔者以为,基于 GIS 的西辽河流域生态安全评价流程可概括为 4 个阶段:①GIS 基础地图的建立与评价指标体系的确立;②指标的量化处理和基于 GIS 的空间运算过程;③GRID 数据库的建立和 GIS 空间分析;④综合指数分布图的形成(如图 2 所示)。

### 2.1 评价指标体系的确立

P-S-R 概念框架是由联合国可持续发展委员会(UNCSD)提出,它为生态安全评价指标体系的确立奠定了理论基础。流域生态安全状况是人为因子和自然因子共同影响的结果,根据系统性、指标选择的独立性、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<sup>[15-17]</sup>,根据 2002 年辽河流域野外考察

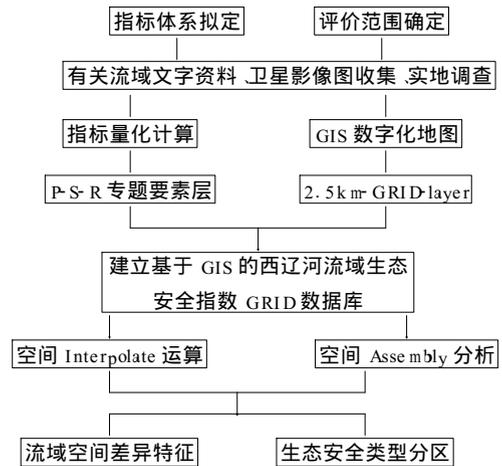


图 2 西辽河流域生态安全评价过程

Fig.2 Ecological security assessment process of the west areas of Liaohe River

和收集的最新资讯,按照层次分析法的方法<sup>[18]</sup>,构筑了基于 P-S-R 的西辽河流域生态安全多层次评价指标体系如图 3 所示。

### 2.2 GIS 数据库的建立

根据 GIS 地理空间数据(矢量数据和栅格数据)特征,其数据库建设包括图形数据库和属性数据库。

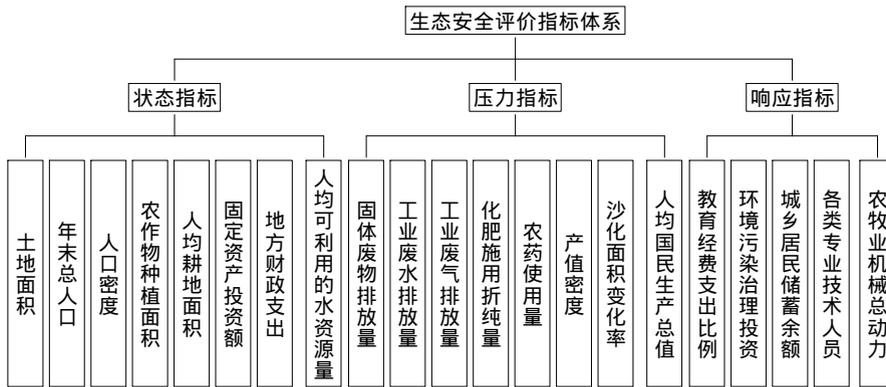


图3 生态安全评价指标体系

Fig.3 Ecological security assessment indicators system

### 2.2.1 图形数据库建立

(1) 选取最新的流域地形图 该图带有经纬网、县区界、地形、地物等,比例尺为 1:1800000。

(2) 图形数据库设计 针对每一专题的地图信息,采用 MapInfo7.5 创建基础“图层”。每个地理图层形成 4 个文件:ID 文件(\*.id),索引文件(\*.ind),地图文件(\*.map),表文件(\*.tab)。MapInfo 的属性表只能建成为单表,对于 ID 码只能建单项索引。

(3) 扫描数字化 先按经纬网配准,然后将一定比例尺流域的主要空间属性事物上图,并输入相对应的属性标志,选取有效信息,分层编辑并合并为工作空间。地图的坐标系是地球坐标系,采用经纬投影。

(4) 图形的制作 图面要素和相关功能的设计与制作,如图 1 所示。

### 2.2.2 属性数据库建立

(1) 数据资源调查和收集 充分收集研究范围内各行政县市自然地理、人文社会经济、环境生态等历史资料和原始数据。西辽河流域生态安全数据库的内容采用《2002 年辽宁统计年鉴》、《2002 年内蒙古统计年鉴》、辽宁环境公报、内蒙古环境公报、辽河办提供的各类环境规划等资料。

(2) 数据库结构设计 数据库表的字段名用中文或英文字段名,主键值不为空。

(3) 数据录入 属性数据的输入一般采用表格形式,以 ID 码实现与图形数据的连接,如耕地面积、人口、工业废水排放量等通过键盘录入到 GIS 属性数据库或 EXCEL 数据库,从而建立基础信息数据库。西辽河流域生态安全状态指标数据窗口如表 1 所示,Excel 数据库表可以通过 GIS 的 SQL 连接在两者之间实现数据导入转出。

### 2.3 指标量化

从图 3 可知,用于测度生态安全状况的指标分为 2 种情况:越大越安全的指标(如人均耕地面积)和越小越安全的指标(如工业废水排放量等)。为了综合评价,在对不同量纲指标的初始数据进行标准化处理时应把所有的指标数值转换成统一的含义,因此,参评因子的标准化量化公式为:

对于越大越安全的指标:  $X_j = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ; 对于越小越安全的指标:  $X_j = (X_{\max} - X_j) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。其中,  $X_i$  为实测值,  $X_j$  为标准化后的数值,  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别为最大值、最小值。

量化后的指标还需要依据相关科学研究成果对参评因子标准化值及其评判等级对量化数据做出相应的修正和调整。如对环境污染指标因子,可用国家标准进行修正。

### 2.4 生态安全指数计算

2.4.1 指标权重 本文生态安全评价涉及到多级赋权,采用模糊 AHP 法。这种方法是采用模糊数学来改善 AHP 法的判断矩阵尺度,可避免多个指标同时赋权的混乱,并能更好地拟合实际生态环境问题,提高评价的准确性<sup>[19]</sup>。首先运用层次分析法将任一层次上的各因子两两比较,构造比较判断矩阵,通过专家权衡,两两比较判断各指标之间的相对重要程度,然后用求和法计算权重,其比较结果用 L. saaty 的 1~9 标度法。矩阵模型<sup>[18]</sup>:

$$A = \begin{vmatrix} b_{11} & K & b_{1n} \\ & M & O & M \\ & & & & \\ & & & & b_{nn} \end{vmatrix}$$

矩阵中  $b_{ii} = 1$ , 且  $b_{ij} = 1/b_{ji}$ ,  $b_{ij} \in [1/j, j]$ ,  $j$  为整数,且  $1 \leq j \leq 9$ ,采用求和法,计算权重,再将结果归一化处理:  $A' = A_i / \sum_{i=1}^n A_i$ , 其中  $i$  为因子,  $A'$  为

表 1 西辽河流域生态安全状态指标数据库<sup>1)</sup>

Table 1 Ecological security state indicator database of the west areas of Liaohe River

编号	地区	土地面积 / km <sup>2</sup>	总人口 / 人	人口密度 / 人·km <sup>-2</sup>	耕地面积 / hm <sup>2</sup>	人均耕地面积 / hm <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup>	固定资产投 资总额/ 万元	地方财政 支出/ 万元	人均水资源可 利用量/ m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>
N-01	宁城县	4 305	589 943	137.04	102 790	0.174	23 735	24 553	759
N-02	喀喇沁旗	3 071	364 676	118.75	54 848	0.150	33 548	16 783	342
N-03	敖汉旗	8 294	578 673	69.77	171 140	0.296	28 879	19 597	689
N-04	库伦旗	4 650	171 605	36.9	106 790	0.622	18 464	12 290	213
N-05	科尔沁左翼后旗	11 476	389 920	33.98	161 720	0.415	29 113	17 347	320
N-06	奈曼旗	8 120	424 029	52.22	105 140	0.248	57 458	21 521	610
N-07	翁牛特旗	11 882	463 092	38.97	145 087	0.313	27 433	23 314	623
N-08	克什克腾旗	20 673	244 396	11.82	80 959	0.331	14 645	24 406	290
N-09	科尔沁	3 212	790 968	246.25	113 333	0.143	271 464	26 822	853
N-10	开鲁县	4 488	382 595	85.25	107 300	0.280	47 974	15 518	715
N-11	科尔沁左翼中旗	9 811	527 398	53.76	200 670	0.380	24 586	15 573	693
N-12	林西县	3 933.1	235 513	59.88	59 950	0.255	34 000	15 540	286
N-13	巴林右旗	9 837	174 955	17.79	38 900	0.222	20 003	20 707	269
N-14	巴林左旗	6 713	355 094	52.9	108 609	0.306	28 373	17 636	361
N-15	霍林郭勒市	585	68 139	116.48	15 700	0.230	19 048	7 751	420
N-16	阿鲁科尔沁旗	14 555	294 388	20.23	102 667	0.349	26 983	19 611	364
N-17	扎鲁特旗	17 193	299 704	17.43	120 270	0.401	36 745	16 995	359
N-18	松山区	5 955	531 520	89.26	136 070	0.256	36 567	23 246	516
N-19	红山区	170	300 371	1 766.89	3 770	0.013	32 020	16 991	526
N-20	元宝山区	887	287 667	324.31	20 781	0.072	26 445	17 381	246
NL-18	建平县	4 865	575 091	118.21	116 404	0.202	35 322	17 531	524

1) 辽宁省统计局《2002 年辽宁省统计年鉴》,223 ~ 466; 内蒙古统计局《2002 年内蒙古统计年鉴》,108 ~ 201

层次分析法最终所得权重,西辽河流域生态安全(响应)评价指标权重计算结果如表 2,状态指标和压力指标权重依此计算。

表 2 西辽河流域生态安全(响应)评价指标权重

Table 2 Ecological security (response) assessment indicators weight of the west areas of Liaohe River

响应指标	权重
教育经费支出比例/ %	0.22
环境污染治理投资/ 万元	0.25
城乡居民储蓄余额/ 万元	0.20
各类专业技术人员/ 人	0.18
农牧业机械总动力 × 10 <sup>4</sup> / k W·h	0.15

2.4.2 单元格生态安全指数

首先,利用 MapInfo 的 GRIDMAKER 功能生成 5 000 m × 5 000 m 的标准网格,其网格的单元面积,要根据流域范围大小而定,西辽河流域共生成 6 725 个单元格。再者,格网赋值。运行 Map basic 赋值程序,将 GIS 数据库中各项标准化的评价指标值赋给 6 725 个网格,形成格网数据库( GRID 数据库)。然后,已知 P-S-R 体系中各层权重值,运用模糊综合比较法分别计算每个单元格状态指标、压力指标、响应指标生态安全指数,并通过 GIS“更新列”归一化成生态安全百分值。模糊综合比较方法<sup>[20]</sup>:对

于一个体系,假设有  $n$  个评价因素,则建立评价集合  $(u_1, u_2 \dots u_n)$ ,  $m$  个评价单元,每个因素  $u_n$  都有一个隶属度  $R = (r_{i1}, r_{i2} \dots r_{im})$ ,于是对于  $n$  个因素就有单因子评价矩阵  $R$ ,则:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

已知因子的权重分配  $A'$ , 则  $A' = (a_1,$

$a_2 \dots a_n)$ , 其中  $a_i \geq 0$ , 且  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ , 有  $A$  与  $R$  求模

糊综合评价  $B$ ,  $B = \sum_{i=1}^n A' \cdot R$ , 求出  $B = \sum_{i=1}^m (b_1,$

$b_2 \dots b_m)$  值,其中  $b_i = \sum_{i=1}^n (a_i, b_{ij})$ , 对于多个体系的

计算,可分别求出  $B$  值,然后进行比较,最后把  $B$  值做归一化计算成百分值  $M$  (单元格生态安全指数得分)。

为了易于理解,本文从 6 725 个单元格中任选 3 个评价单元  $A_{R22}, A_{R68}, A_{R32}$  来做示例计算响应指标生态安全指数:已知响应指标的权重  $A_1 = (0.22, 0.25, 0.20, 0.18, 0.15)$ , 每个评价单元都有 5 个评价因子,它们建立相应的评价矩阵  $R_i$  (GIS 数据库中各项响应指标的量化分值组成的矩阵):

$$R_1 = \begin{matrix} & A_{R22}, & A_{R68}, & A_{R32} \\ \begin{matrix} 45.69 & 41.91 & 28.75 \\ 21.98 & 36.16 & 64.44 \\ 18.62 & 22.21 & 17.87 \\ 11.37 & 52.60 & 77.82 \\ 27.35 & 12.2 & 47.62 \end{matrix} \end{matrix}$$

由 A 与 R 求出模糊综合评价  $B_1 : B_1 = A_1 \times R_1 = (25.42, 34.01, 47.16)$ ,  $B_1$  即分别为  $A_{R22}, A_{R68}, A_{R32}$  3 个单元格的响应指数,再利用加权平均法

$$B = \sum_{j=1}^n A_j \cdot b_j$$

求出响应指标总分值,并归一化计算成百分值  $M$  (单元格生态安全指数得分)。

### 2.4.3 生态安全综合指数

已知每个单元格各项生态安全指标得分,同样利用模糊综合比较法和加权平均法求出生态安全综合指数(如表 3 所示),并归一化成百分值  $W$ (生态安全综合指数得分),录入 MapInfo 属性表中。

## 3 结果与讨论

### 3.1 生态安全等级的判别确定

按照人们对分数等级优劣的认知习惯,计算所得的综合指数值需要采用极差标准化的方法,将生态安全综合指数值转换为等级值。由于生态环境系

统的结构和服务功能、压力干扰、生态效应的机制极为复杂,而人们对它的认识水平和认识手段又极为有限,因此在实际研究工作中,通常在较大范围和较大程度上采用定性的、模糊的和模拟的表征方法。根据辽河流域生态安全数据库,利用 GIS 空间分析工具,对各单元格不同分值进行归类,通过 GIS 的叠加运算分析,生态安全指数越大,生态安全程度就越高。依生态安全指数最小值与最大值即可确定生态安全等级的判别指标(生态安全等级区间综合安全系数的临界值),即西辽河流域 21 个县(市)区按照状态、压力、响应框架各因子分成 5 个类型区:当  $W \leq 20$ ,评价单元为不安全区;当  $20 < W \leq 30$ ,评价单元为较不安全区;当  $30 < W \leq 40$ ,评价单元为生态安全过渡区;当  $40 < W \leq 60$ ,评价单元为次安全区;当  $W > 60$ ,评价单元为安全区。

### 3.2 创建格网专题地图

(1) 利用 MapInfo Professional 7.0 中创建专题地图功能,根据生态安全 GRID 数据库,选择格网类型专题地图,并选择 TIN 插值格网。

(2) 选择 GRID 图层,以及 GRID 数据库中生态安全综合指数专题变量。

(3) 通过 TIN 插值并赋给格网颜色并图形化展示西辽河流域生态安全空间分异,如图 4 所示。

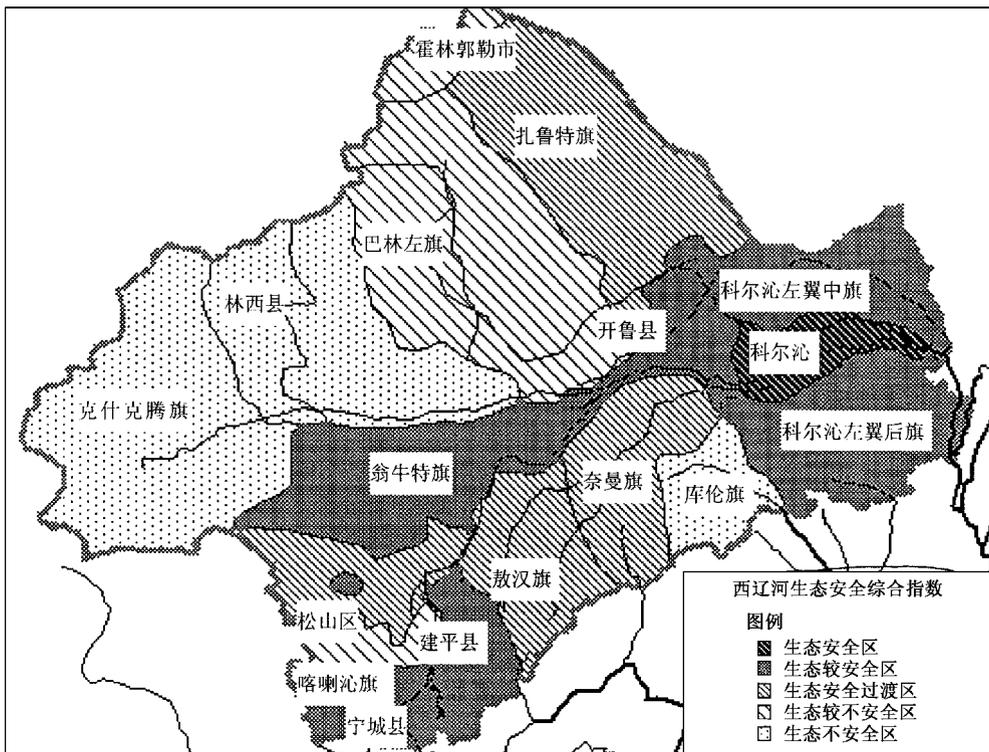


图 4 西辽河生态安全空间差异分布图

Fig. 4 Ecological security spatial differences of the west areas of Liaohe River

表 3 西辽河流域生态安全综合指数

Table 3 Ecological security synthesis index of the west areas of Liaohe River

地区	S 指标 指数	P 指标 指数	R 指标 指数	生态安全 综合指数
建平县	21.91	35.96	49.30	37.12
宁城县	32.11	44.38	52.13	44.03
喀喇沁旗	14.60	18.67	25.42	20.02
敖汉旗	22.50	37.95	33.24	32.44
库伦旗	9.18	17.93	18.52	15.95
科尔沁左翼后旗	34.80	45.64	35.12	39.25
奈曼旗	25.67	39.94	29.16	32.60
翁牛特旗	24.82	46.92	34.01	36.88
克什克腾旗	17.89	19.61	12.32	16.63
科尔沁	88.69	76.82	85.10	82.69
开鲁县	28.36	42.69	36.19	36.83
科尔沁左翼中旗	26.84	49.32	24.96	35.17
林西县	14.63	14.69	17.99	15.83
巴林右旗	10.96	9.65	15.32	11.96
巴林左旗	17.39	29.45	22.18	23.89
霍林郭勒市	4.89	13.85	39.10	20.45
阿鲁科尔沁旗	19.46	25.49	17.25	21.10
扎鲁特旗	28.97	27.12	26.43	27.34
松山区	27.56	34.81	37.47	33.93
红山区	14.98	30.64	47.16	32.51
元宝山区	28.37	24.61	44.51	32.52

#### 4 结论

基于 GIS 的生态安全空间差异评价,为人们正确分析与决策流域的生态化发展方向提供科学而直观的依据.所建评价模型具有一般性,可用于不同区域生态安全因子的评价与比较,但是有些环节处理不太理想,一是在状态指标设计中,应该加入西辽河旱灾、沙化指标,但是因为目前数据的不可得性,暂时舍去了这部分指标;二是生态安全等级的阈值选取,主观性较强,应寻求一个较好的阈值划定方法.

辽河流域在东北地区占有重要的经济地位,流域的生态安全及流域经济的生态化发展对于“振兴东北老工业基地”有着关键性的作用,流域的生态安全评价是目前亟需开展的研究内容之一.本文运用所设计的评价指标体系对西辽河流域的生态安全状况进行了实证分析,试图为流域的生态环境建设提供警示信息,确定合理的资源开发利用方式,降低经济发展作用于自然环境的负荷,从而避免由决策失误而带来的重大经济损失.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Kongjian Yu . Security Patterns and Surface Model in Landscape Ecological Planning [ J ] . Landscape and Urban Planning , 1997 , 36 : 1 ~ 17 .
- [ 2 ] Harold C Relyea . Homeland Security and Information [ J ] . Government Information Quarterly , 2002 , 19 : 213 ~ 223 .
- [ 3 ] Alex F , Mc Calla . Prospects for food security in the 21st Century : With Special Emphasis on Africa [ J ] . Agricultural Economics , 1999 , 20 : 95 ~ 103 .
- [ 4 ] Binns J A , Maconachie R A , Tanko A I . Water , Land and Health in Urban and Peri-urban Food Production : The Case of KANO , NIGERIA [ J ] . Land Degrade Develop , 2003 , 14 : 431 ~ 444 .
- [ 5 ] 肖笃宁 , 陈文波 , 郭福良 . 论生态安全的基本概念和研究内容 [ J ] . 应用生态学报 , 2002 , 13 ( 3 ) : 354 ~ 358 .
- [ 6 ] Calow P . Critics of ecosystem health misrepresented [ J ] . Ecosystem Health , 2000 , 6 ( 1 ) : 3 ~ 4 .
- [ 7 ] Ni J R , Xue A . Application of artificial neural network to the rapid feedback of potential ecological risk in flood diversion zone [ J ] . Engineering Applications of Artificial Intelligence , 2003 , 16 : 105 ~ 119 .
- [ 8 ] 孔红梅 , 赵景柱 , 姬兰柱 , 等 . 生态系统健康评价方法初探 [ J ] . 应用生态学报 , 2002 , 13 ( 4 ) : 486 ~ 490 .
- [ 9 ] 刘建军 , 王文杰 , 李春来 . 生态系统健康研究进展 [ J ] . 环境科学研究 , 2002 , 15 ( 1 ) : 41 ~ 44 .
- [ 10 ] Bell M , Dean C , Blake M . Forecasting the Pattern of Urban Growth with PUP : a Web-based Model Interfaced with GIS and 3D Animation [ J ] . Computers , Environment and Urban Systems , 2000 , 24 : 559 ~ 581 .
- [ 11 ] Pew K L , Larsen C P S . GIS Analysis of Spatial and Temporal Patterns of Human-caused Wildfires in the Temperate rain forest of Vancouver Island , Canada [ J ] . Forest Ecology and Management , 2001 , 140 : 1 ~ 18 .
- [ 12 ] Michele Crossetto , Stefano Tarantola , Andrea Saltelli . Sensitivity and Uncertainty Analysis in Spatial Modeling Based on GIS [ J ] . Agriculture Ecosystem and Environment , 2000 , 81 : 71 ~ 79 .
- [ 13 ] 王韩民 , 郭玮 , 程淑兰 , 等 . 国家生态安全 : 概念、评价及对策 [ J ] . 管理世界 , 2001 , 2 : 149 ~ 151 .
- [ 14 ] 国家环境保护总局编 . “三河”“三湖”水污染防治计划及规划 [ M ] . 北京 : 中国环境科学出版社 , 2000 . 83 ~ 87 .
- [ 15 ] 左伟 , 周慧珍 , 王桥 . 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究 [ J ] . 土壤 , 2003 , 1 : 2 ~ 7 .
- [ 16 ] 韩宇平 , 阮本清 . 区域水安全评价指标体系初步研究 [ J ] . 环境科学学报 , 2003 , 23 ( 2 ) : 267 ~ 272 .
- [ 17 ] Poudevigne I , Alard D , Leuven R S E W , Nienhuis P H . A Systems Approach to River Restoration : a Case study in the Lower Seine Valley , FRANCE [ J ] . River Research and applications , 2002 , 18 : 239 ~ 247 .
- [ 18 ] 赵焕臣 , 许树柏 , 和金生 , 等 . 层次分析法 [ M ] . 北京 : 科学出版社 . 1986 . 3 ~ 5 .
- [ 19 ] 王耕 , 王利 . 基于 MapInfo 的城市生态环境质量与影响评价研究 [ J ] . 水土保持研究 , 2004 , 1 : 13 ~ 16 .
- [ 20 ] 姜启源 . 数学模型 ( 第 2 版 ) [ M ] . 北京 : 高等教育出版社 , 1993 . 305 ~ 335 .
- [ 1 ] Kongjian Yu . Security Patterns and Surface Model in Landscape Ecological Planning [ J ] . Landscape and Urban Planning , 1997 ,