

中国北方 13 省市区生态安全动态变化分析

李月臣^{1,2}

(1 重庆师范大学地理科学学院, GIS 应用研究重庆市重点实验室, 重庆 400047;

2 重庆大学资源及环境学院, 重庆 400044)

摘要: 为了寻求我国北方生态安全条件的土地利用/覆盖优化格局, 加强区域生态安全研究, 在 GIS 技术的支持下, 利用景观分析和空间变异分析方法对北方 13 省(市、区)生态安全动态变化及其空间变异特征进行了分析。结果表明研究区生态安全指数具有较强的空间相关性。人类活动等随机因素对生态安全的作用强度在增大, 但是结构性因素引起的空间相关仍然是该区生态安全空间分异的决定性因素。10 年间研究区生态环境质量整体表现出下降趋势; 空间上, 中西部地区生态安全程度低于东部地区; 13 个省(市、区)的生态安全指数的变化表现为三种类型: 先升后降型、先降后升型和持续下降型。

关键词: 生态安全; 动态变化; 北方 13 省(市、区)

文章编号: 1000-0585(2008)05-1150-12

1 引言

人类活动依托于所栖息的生态环境, 生态系统为人类提供了必不可少的生命维持系统和从事各种活动所必需的最基本的物质资源。目前, 全球范围的生态环境问题越来越突出, 严重威胁着人类社会的可持续发展, 保障生态安全已经成为迫切的社会需求^[1~3]。广义的生态安全是指在人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会次序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态, 包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全, 组成一个复合人工生态安全系统^[4,5]。狭义的生态安全是指自然和半自然生态系统的安全, 即生态系统完整性和健康的整体水平反映, 其研究是从人类对自然资源的利用与人类生存环境辨识的角度来分析与评价自然和半自然的生态系统^[6]。生态安全是一个相对的和动态的概念, 是在受到人类活动和外界环境变化的影响下处于不断的动态变化之中。

目前, 区域生态安全研究尚处在发展阶段, 各国学者为促进该领域的发展开展了相应的研究。1997 年联合国粮农组织 (FAO) 建立的压力—状态—响应 (P-S-R) 框架模型成为国内外区域生态安全研究最为常用的概念性模式^[7]; Tran 等基于模糊决策分析方法 (FDA) 研究了大西洋中部地区的生态安全问题^[8]; Rees 运用生态承载力方法来判断城市生态是否安全^[9]。近些年来, 景观生态学方法逐渐成为区域生态安全研究的重要手段^[5]。景观格局及其变化是自然和人为多种因素相互作用所产生的一定区域生态环境体系的综合

收稿日期: 2007-10-11; 修订日期: 2008-03-03

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJ070811); 重庆师范大学博士科研启动基金 (06XLB004); 中国科学院杰出海外学者基金 (2001-F-13)

作者简介: 李月臣 (1974), 男, 山东德州人, 博士, 副教授。主要从事资源环境遥感与 GIS 研究。

E-mail: liyuechen@cqu.edu.cn

反映。土地利用/覆盖是地球表层系统最突出的景观标志，土地利用/覆盖变化的生态影响具有区域性和累积性特征，不仅客观记录了人类改变地球表面特征的空间格局，而且还再现了地球表层景观的时空动态变化过程，并且可以直观地反映在区域生态系统的结构和组成上^[10]。土地利用/覆盖格局及其变化既是各种干扰因素相互作用的结果，又影响着该区域的生态过程。因此，区域土地利用/覆盖格局的研究，是揭示该区域土地利用/覆盖以及生态状况和空间变异特征的有效手段，可以揭示区域综合性生态影响的程度和分布范围^[11~14]。李晓燕，张浩，郭明以及刘明华等分别应用景观分析方法研究了吉林西部、珠江三角洲快速城市化地区、酒泉绿洲和河北秦皇岛地区的生态安全的时空特征^[15~18]。这些成果丰富了生态安全问题的研究。但大多是在小区域范围内进行的。区域生态环境问题的根源多为大尺度发生或区域性存在自然环境要素的改变以及人类的干扰^[19]。因此，探讨大区域尤其是生态相对敏感区域生态安全问题，对进一步深入分析区域生态环境的变化机制与特征具有十分重要的意义。

北方 13 省（市、区）是我国境内对全球变化反应较为敏感的生态系统地带，生态环境相对比较脆弱^[20,21]。长期以来，人们的土地利用活动主要以短期经济效益为主，不合理的土地利用造成的地表植被破坏、土壤沙化、沙尘暴肆虐等生态环境问题一直比较突出。因此，以土地利用/覆盖格局变迁为基础，研究区域生态安全的时空动态变化特征，为寻求我国北方生态安全条件的土地利用/覆盖优化格局，保持区域生态环境服务功能的可持续性，促进环境、经济与社会的协调发展提供借鉴，具有重要的理论和现实意义。本文在遥感与 GIS 技术的支持下，在土地利用/覆盖格局变化研究的基础上，运用景观分析和空间变异分析方法，从狭义的生态安全角度出发对北方 13 省（市、区）的区域生态安全动态变化及其空间变异特征进行了分析。

2 研究区概况

北方 13 省(市、区)位于东经 73~ 136°，北纬 31~ 54°，包括北京、天津、河北、山西、内蒙古、吉林、辽宁、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆。全区总面积 535.5 万 km²，约占全国陆地地总面积的 55.8%，人口约 33270 万人^①。该区地跨湿润、半湿润、半干旱和干旱 4 个干湿地带。多年平均年气温 - 5~ 16℃，多年平均年降雨 40~ 1100mm。气候的地域差异性和过渡性明显，地表植被类型多样。有大面积的耕地、林地、草原和裸地，大部分地区处在我国北方农牧交错带上。在土地利用上有农有牧，许多地区农牧交错，时农时牧。近年来由于北方脆弱的生态地理条件和不合理的人类活动叠加的结果，导致区域生态环境问题突出，不仅严重影响着区域自身的经济发展和社会进步，而且其潜在的对其他区域和全球的生物、物理和化学过程变化的影响和响应也逐渐引起了人们的关注^[22]。

3 研究方法

3.1 基于土地利用/覆盖格局的区域生态安全指数的构建

目前应用比较广泛的景观格局指标有景观破碎度、景观的多样性指数、均匀度、优势度、分离度指数等^[10]。本文主要选取其中几种重要指标对研究区的土地利用/覆盖格局作

① 研究区范围依据国家重点基础研究发展规划项目我国北方土地利用变化与模拟与预测研究（编号：G1999043406- 03）确定

出分析，在参考相关研究成果的基础上构建了干扰度指数和景观脆弱性指数。

3 1 1 基于景观格局的区域生态环境状况指数

(1) 景观干扰度指数 (I): 不同景观类型对外界干扰的抵抗能力不同，以景观格局分析为基础，构建一个景观格局指数 I ，通过各个指数的叠加来反映不同景观所代表的生态系统受到干扰 (主要是人类开发活动) 的程度，通过比较分析各景观指数，选取了破碎度、分离度和优势度三个指标来表征研究单元土地利用/覆盖格局受到各种干扰因素影响的程度^[12]，表达式为:

$$I_i = aC_i + bS_i + cD_i \tag{1}$$

式中， a 、 b 、 c 为各指标对应的权重， $a + b + c = 1$ ， I_i 为土地利用/覆盖类型 i 的干扰度指数； C_i 、 S_i 、 D_i 分别为土地利用/覆盖类型 i 的破碎度、分离度和优势度，三个景观指数的计算参见文献 [23]。以上三种指数，由于量纲不同，须进行归一化处理。对于三个指数的权重 a 、 b 、 c ，在借鉴已有研究成果以及咨询相关专家进行分析权衡的基础上，分别赋值为 0.5、0.3、0.2。对于未利用地来说，优势度越大，其连通性越强，脆弱性越强，因而优势度最能代表干扰下的生境状况，因此，对三个指数权重的赋值分别为 0.3、0.2、0.5^[12, 14, 24]。

(2) 景观脆弱性指数 (F): 这里用脆弱性指数 F 表示不同生态系统的易损性。不同的景观类型在维护生物多样性、保护物种、完善整体结构和功能、促进景观结构自然演替等方面的作用是有差别的，同时对外界干扰的抵抗能力也不同。由于人类活动是该区生态系统的主要干扰因素之一，而土地利用程度不仅反映了土地利用中土地本身的自然属性，而且反映了人为因素与自然因素的综合效应。研究中把土地利用/覆盖类型与景观脆弱性相关联，将土地利用/覆被分为 6 大类，即耕地、林地、草地、水体、城镇及建设用地和未利用地。研究区 6 种类型代表的生态系统，以未利用地最为脆弱，而城镇及工矿建设用地则最为稳定^[10, 12, 14]。参考相关研究以及研究区实际特征分别为各种土地利用/覆盖类型确定脆弱性指数：未利用地- 6，水体- 5，草地- 4，耕地- 3，林地- 2，城镇及工矿建设用地- 1。为了与其他指数一致，对其进行归一化处理，最终得到标准化后的景观脆弱性指数^[22] (表 1)。

表 1 土地利用/覆盖要素的脆弱性指数
Tab 1 Fragility index of each land use/ cover type

类型	未利用地	水体	耕地	草地	林地	城建用地
F_i	0.2857	0.2381	0.1905	0.1429	0.0952	0.0476

(3) 景观风险指数 (H): 景观风险指数 H_i 表示在遭遇干扰或自然条件改变时，各土地利用/覆盖类型所受到的生态损失的差别，也即其自然属性损失的程度，是某一景观类型的干扰度指数和脆弱性指数的综合，用下式表示:

$$H_i = I_i \times F_i \tag{2}$$

3 1 2 区域生态安全综合指数的建立 生态安全作为生态风险的反表征，干扰度越大，景观脆弱性越强，区域生态环境安全程度就越低。为建立景观结构与区域综合生态环境状况之间的联系，利用景观组分的面积比重，根据生态风险与景观格局之间的经验关系，确定生态安全与景观格局之间的关系，描述一个样地内综合生态安全的相对大小，以便通过采样方法将景观空间结构转化成空间化的生态环境变量。其计算方法为:

$$ES_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{TA_k} (1 - H_i)$$

式中， ES_k 为第 k 个研究单元的生态安全综合指数，数值越大表明生态系统越安全，反之则越不安全； n 为该单元的土地利用/覆盖类型总数； A_{ki} 为第 k 个研究单元土地利用/覆盖类型 i 的面积； TA_k 为第 k 个研究单元的总面积。当所有研究单元的生态安全指数计算完成后，可以对所有研究单元的生态安全指数进行归一化处理，以便更好地反映区域各研究单元的相对生态安全程度。

3.2 区域生态安全的空间分析方法

通过土地利用/覆盖与生态环境之间的经验关系，建立景观格局指数与区域生态安全之间的定量化表达，在此基础上借助地统计学空间化变量的方法对研究区生态安全的空间分异特征及动态变化进行分析。

3.2.1 评价单元的确定 研究中通过采样方法将景观空间结构转化成空间化的生态环境变量，用100km × 100km的正方形单元对生态安全综合指数进行空间化，采样方式为等间距系统采样法，整个研究区共划分为573个评价单元。以每个研究单元的生态安全综合指数的计算结果作为该单元中心点的生态安全水平的表征。

3.2.2 空间分析方法 变异函数分析作为景观空间异质性定量分析的成熟工具，可揭示景观格局特征的空间变异性，对有效解释格局变化与生态系统功能与过程之间的相互关系发挥重要作用。区域生态安全综合指数是一种空间化变量，空间变化特征具有结构性和随机性，因此可以借助地统计学中半方差函数进行区域生态环境安全程度的空间分析。半变异函数是地理现象分布的空间依赖性与空间异质性的一个综合性衡量指标，有3个重要参数(图1)：块金值(Nugget)、基台值(Sill)、变程

(Range)。当间隔距离 $h=0$ 时 $r(h) = C_0$ ，该值称为块金值(C_0)，块金值表示随机因素引起的空间异质性，一般是指测定误差。当 h 增大到 A_0 时 $r(h)$ 从非零值达到一个相对稳定的常数，该常数称为基台值 $C_0 + C$ ， A_0 为变程，变程值反映了空间变异特性，在变程值以外，景观特性具有空间独立性，而在变程值以内，景观特性是空间非独立的。 C 表示空间自相关部分引起的空间异质性；基台值($C_0 + C$)是指在不同间距中存在的半方差极大值，表示最大变异程度，基台值越大表示总的空间差异性程度越高；块金值与基台值之比 $C_0/(C_0 + C)$ 则反映了随机因素引起的异质性占总空间异质性的比重。

实际上，理论变异函数模型 $r(h)$ 是未知的，往往需要从有效空间取样数据中去估计，对各种不同的 h 值可以计算出一系列 $r'(h)$ 值。因此，需要用理论模型去拟合。目前，最为常用的半变异函数理论模型主要有线性模型、球状模型、指数模型、高斯模型等。变异函数理论模型的最优选择用决定系数 R^2 来决定，并综合考虑RSS、块金值和有效距离^[25]。在半变异函数分析的基础上，本文利用克里金(Kriging)插值法绘制了研究区各时期的生态安全图，以直观反映研究区内生态环境安全状态的空间分布及其动态变化情况。

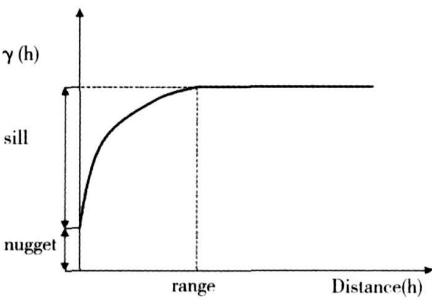


图 1 半变异函数图

Fig 1 Semivariogram

4 结果与分析

4.1 北方 13 省（市、区）生态安全的空间分异特征

在上述生态安全指标方法和空间采样方法的基础上，计算了研究区生态安全的实验变异函数。并对实验变异函数进行了理论变异函数模型的拟合。表 2 是根据常用的几种理论变异模型模拟得出的相应参数。选择最优拟合的理论模型时，首先要考虑决定系数 R^2 的大小，其次是考虑残差 RSS 的大小，然后再考虑变程和块金值的大小^[25]。根据这个原则对几个理论模型的拟合参数进行比较，1989 年选择 Gaussian 模型，1994 年和 1999 年选择 Spherical 模型作为研究区生态安全的变异函数理论模型较为合适。

研究区生态安全指数的空间分异可以分解为两部分，即自相关部分和随机部分。由空间自相关部分引起的空间分异位于空间相关变程范围之内。由随机部分引起的空间分异可以认为是小于采样尺度的变异总和，因此，它可由块金方差 C_0 表示，值越大表明随机因素引起的空间异质性越强。

表 2 研究区生态安全指数的理论变异函数

Tab 2 The theoretical semivariogram of the ecological security index of the study area							
年份	模型	C_0	$C_0 + C$	A_0	$C_0 / (C_0 + C)$	R^2	RSS
1989	Spherical	0.0145	0.1460	9422.00	0.099	0.721	4.398E-03
	Exponential	0.0132	0.2554	10110.00	0.052	0.718	4.451E-03
	Linear to sill	0.0163	0.1986	9418.00	0.082	0.717	4.462E-03
	Gaussian	0.0223	0.1076	2936.00	0.207	0.748	3.979E-03
1994	Spherical	0.0211	0.0852	3858.00	0.248	0.768	2.162E-03
	Exponential	0.0144	0.0958	1903.00	0.150	0.747	2.364E-03
	Linear to sill	0.0325	0.1650	9253.00	0.197	0.662	3.0147E-03
	Gaussian	0.0293	0.0856	1905.00	0.342	0.738	2.440E-03
1999	Spherical	0.0231	0.0922	3328.00	0.251	0.655	4.125E-03
	Exponential	0.0139	0.0938	1195.00	0.148	0.623	4.499E-03
	Linear to sill	0.0430	0.1680	9287.00	0.256	0.461	6.433E-03
	Gaussian	0.0326	0.0922	1623.00	0.354	0.629	4.436E-03

块金值通常表示由实验误差和小于采样尺度引起的变异，较大的块金方差值表明较小尺度上的各种过程不容忽视。虽然三个年份生态安全指数的块金方差值略有波动，但就总体而言，1989~1999 年研究区生态安全指数的块金效应在增大，由 1989 年的 0.0223 增加为 1999 年的 0.0231，块金方差与基台值之比 ($C_0 / (C_0 + C)$) 也由 20.7% 变化为 25.1% (表 2，图 2)。这说明在小于 100km 的尺度下，影响研究区生态安全指数分异的过程作用在增强。基台值通常表示系统内总的变异，块金方差与基台值的比例可以表明系统变量的空间相关性的程度。如果比值小于 25%，说明系统具有强烈的空间相关性；如果比例在 25%~75% 之间表明系统具有中等的空间相关性；大于 75% 说明系统空间相关性很弱^[26]。1989 年研究区生态安全指数的块金值与基台值之比为 20.7%，1994 年为 24.8% 和 1999 年为 25.1%。可见，研究区生态安全指数具有较强的空间相关性。这是因为区域生态安全是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。结构性因素包括气温、降水、地形地貌、土壤类型等可以导致区域生态安全的空间相关性；而随机因素包括土地利用方式的变化等各种人类干扰活动使得区域生态安全的空间相关性减弱。从数据变化上可

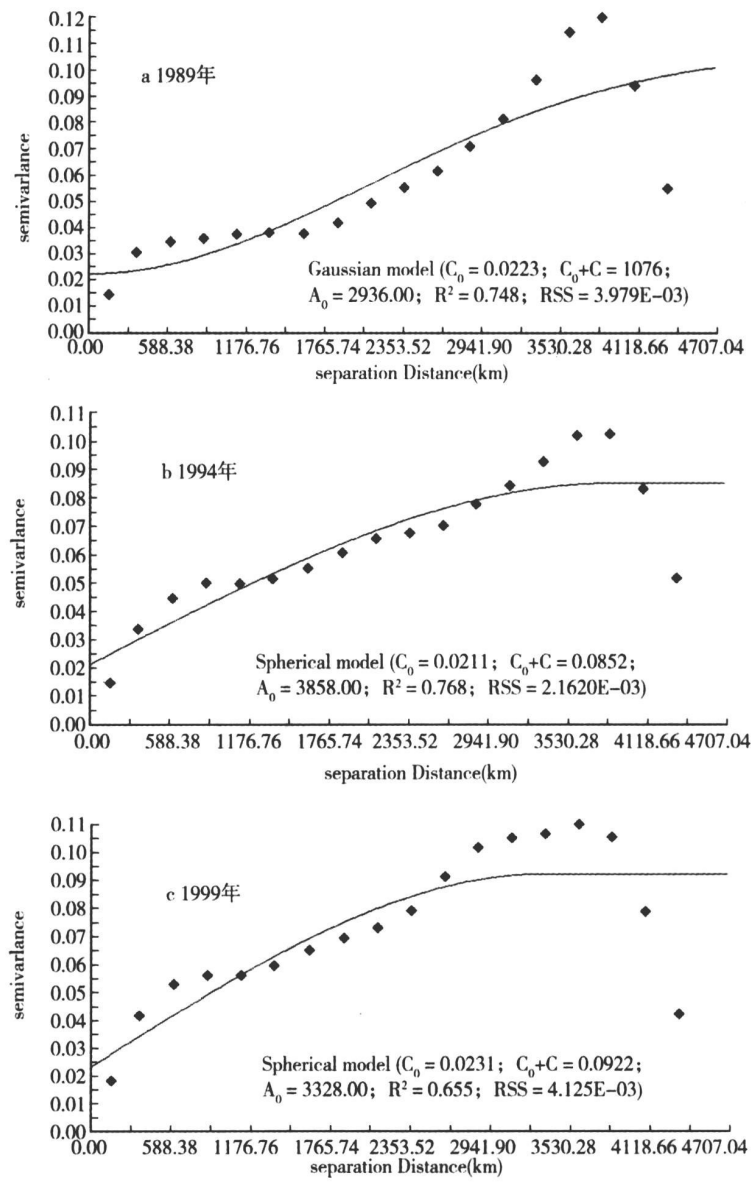


图 2 1989、1994、1999 年研究区生态安全指数空间变异的理论模型差图

Fig 2 The theoretic models and semivariograms of ecological security index of the study area in 1989, 1994 and 1999

以看出，1989~ 1999 年人类活动等随机因素对研究区生态安全的作用强度在增大，削弱了结构性因素造成的强自相关作用，但是结构性因素引起的空间相关仍然是该区域生态安全空间分异的主要决定性因素，三个时期块金值与基台值之比基本在 25% 以下。变程是变异函数的一个重要参数，是指变异函数达到基台值所对应的距离，它表明了研究对象空间自相关的范围，变程的变化也反映出引起生态安全变异的主要过程的变化。研究区 1989 年，1994 年和 1999 年三个时期变程呈现明显减小趋势（Guassian 模型的变程为 $\sqrt{3}$

A₀)，意味着研究区生态安全空间分布的均一性减弱，受人类各种活动的影响局域范围内的变异加强，生态安全空间整体分布趋向复杂。

4.2 北方 13 省（市、区）生态安全的时序变化特征分析

对计算得到的三个时期各评价单元的生态安全指标进行分级统计和对比分析(图 3，表 3)。分析表明生态较为安全的地区面积都有不同程度的减少，而生态安全较差的地区的面积则大幅度增加。1989~ 1999 年，生态安全指数大于 0.80 的地区的面积比由 17.45% 下降为 15.01%，与研究初期相比面积减少了 12.00%；生态安全指数介于 0.60 和 0.80 之间的地区的面积比例下降了 2.09%，与研究初期相比面积减少了 4.02%；生态安全指数为 0.40~ 0.60 的地区面积减少最多，与 1989 年相比面积减少了 33.93%，在整个研究区的面积比也减少了 5.41%；相反，生态安全指数较低的地区面积则有明显的增长，1989~ 1994 年生态安全指数为 0.20~ 0.40 的地区面积比由 1989 年的 3.66% 增长到 1994 年的 9.60%，1994~ 1999 年则有所降低。虽然该类型区三个时期面积变化有所波动，但总趋势明显表现为增长态势，与 1989 年相比研究末期其面积增加了 123.04%，占研究区总面积的比例也由初期的 3.66% 增长到末期的 8.20%，在几个类型中变化最明显；生态安全指数最小的地区(< 0.20)面积持续增长，10 年间，其面积增加了 70.37%，在研究区中所占的比例增加了 5.41%。这些变化表明研究区生态环境质量在 10 年间整体表现出较为明显的下降趋势，图 3 和表 3 很直观地反映了生态环境质量的这种退化趋势。就整体趋势而言，生态安全较高的地区生态环境质量退化程度较小，这主要是因为这些地区本底生态环境质量较高，生态环境阈值弹性大，抗干扰能力和自我恢复能力强，生态系统稳定。

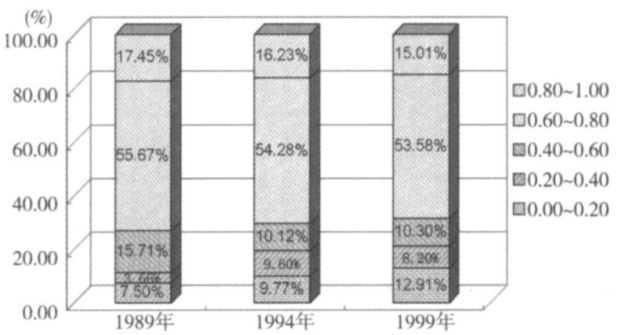


图 3 1989~ 1999 年研究区生态安全的数量变化
Fig. 3 The change of ecological security in the study area between 1989 and 1999

表 3 研究区生态安全指数的分级
Tab 3 The grade of the ecological security index of the study area

生态安全分级		1989					增加比例
		0.00~0.20	0.20~0.40	0.40~0.60	0.60~0.80	0.80~1.00	
1999	0.00~0.20	39.13	13.04	32.61	15.22	0.00	70.37
	0.20~0.40	17.24	13.79	65.52	3.45	0.00	123.07
	0.40~0.60	5.41	2.70	32.43	59.46	0.00	-33.93
	0.60~0.80	1.05	1.05	4.71	84.82	8.38	-4.02
	0.80~1.00	0.00	0.00	1.85	12.96	85.19	-12.00

注：除增加比例列外，表中要素 x_{ij} 表达的是 1999 年 i 类地区由 1989 年 j 类地区转化而来的比例，其各行元素之和为 1；增加比例表示的是 1999 年各类地区的面积与 1989 年相比增长或减少的比例。

分析其生态环境退化的主要原因可以从自然要素和人文要素两方面进行。自然方面通过图 4 可以看出，1989~ 1999 年，研究区气温升高，而降水则整体呈现降低趋势。表明

10 年来北方 13 省市经历了个干旱化过程 (虽然仅利用气温和降水两个因子来分析区域气候的变化趋势存在一定的不确定性,但仍能在一定程度上反映区域气候变化的宏观特征)。气候的干旱化为区域生态环境质量在大的自然地理背景上造成了一定的压力。人文要素方面主要从人口和经济发展进行分析。图 5 是研究区 1989~1999 年间人口和 GDP 的增长趋势图。从图 5 上可以看出 10 年中研究区的人口和 GDP 表现出极为显著的增加趋势。人口的增加,经济的发展一定程度上对区域生态环境造成干扰。因此,在自然和人文因素的综合作用下,研究区的生态环境质量仍表现出一定的退化趋势。

4.3 北方 13 省 (市、区) 生态安全的空间分布及变化特征分析

在 3.2 节生态安全空间变异特征分析的基础上,对 1989 年、1994 年和 1999 年三个时期研究区的生态安全指数利用 Kriging 方法进行了插值处理,从而对研究区生态安全的空间分布特征进行分析 (图版 3 图 6a, b, c)。从空间分布的总体特征上看,研究区中西部地区生态安全程度明显较东部地区低。这与研究区大的结构性要素的分布特征有着密切联系。气温和降水是影响区域生态安全的两个重要的结构性要素。可以发现研究区生态安全的总体空间分布特征正是这些结构性要素叠加效应的结果。尤其是降水作为研究区生态环境的主导影响因素,区域生态安全与之有着较为一致的空间分布特征。10 年间,生态环境质量较差,安全程度较低的地区,以塔克拉玛干沙漠为中心向东然后向南北扩展。图版 3 图 6d 反映了 1989~1999 年间研究区生态安全增减变化的空间分布情况。可以看出研究区绝大多数地区生态安全变化程度介于-0.1~+0.1 之间。生态安全水平有所提高的地区主要分布在东北地区的内蒙古东部、黑龙江大部 and 吉林省,陕西省的关中盆地、秦岭山地和汉中盆地,青海省东南部的江河源地区,以及塔里木盆地北、西和南部周边地区。生态环境质量明显退化,生态安全水平显著降低的地区主要分布在准格尔盆地向东南、塔里木盆地向东、哈顺戈壁和库姆塔格沙漠向南达柴达木盆地西北部地区,以及内蒙古西部阿拉善高原和鄂尔多斯高原的沙漠区。这些地区生态安全指数平均降低 0.2 以上,生态环境恶化趋势十分明显。

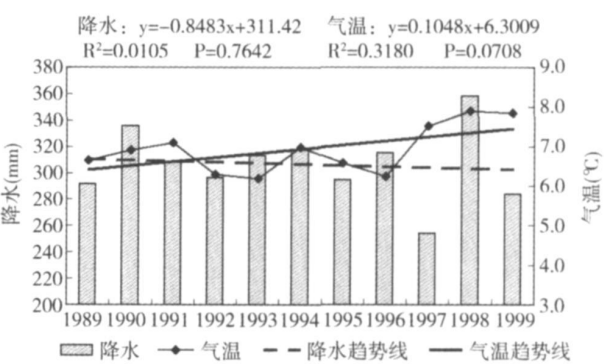


图 4 1989~1999 年研究区气温与降水的变化趋势
Fig. 4 The change of temperature and precipitation in study area between 1989 and 1999

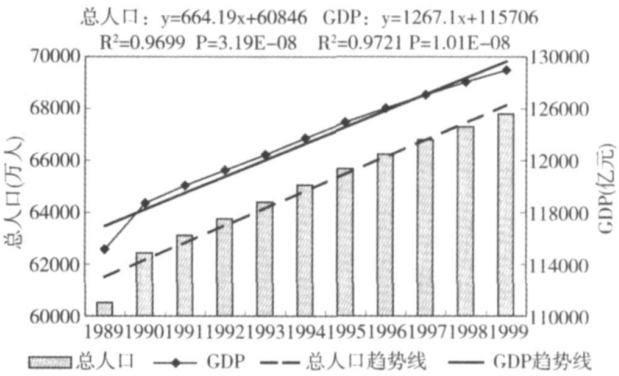


图 5 1989~1999 年研究区人口与 GDP 的变化趋势
Fig. 5 The change of population and GDP in the study area between 1989 and 1999

表 4 各省(市、区)平均生态安全指数
Tab 4 Ecological security indexes in different provinces

年份	东北三省				华北三省市				内蒙古	山西陕西两省			西北四省区				
	黑龙江	吉林	辽宁	总体	北京	天津	河北	总体		山西	陕西	总体	甘肃	宁夏	青海	新疆	总体
1989	0.847	0.785	0.74	0.809	0.746	0.757	0.741	0.749	0.650	0.708	0.675	0.687	0.575	0.581	0.618	0.456	0.512
1994	0.837	0.772	0.776	0.807	0.795	0.665	0.700	0.703	0.584	0.729	0.672	0.693	0.544	0.559	0.638	0.418	0.493
1999	0.854	0.840	0.668	0.812	0.736	0.652	0.677	0.679	0.601	0.681	0.648	0.635	0.533	0.578	0.594	0.394	0.456

此外,考虑区域景观差异性和一致性以及生态系统建设的可操作性的基础上,参考中国自然区划原则,将研究区分为 5 个子区域,分别为华北地区(北京、天津、河北),东北地区(黑龙江、吉林、辽宁),内蒙古,黄土高原地区(陕西、山西),西北地区(宁夏、青海、新疆、甘肃)。从各地的平均生态安全水平来看,也存在不同程度的差异(表 4)。13 个省市中,黑龙江省的生态安全指数最高,三个时期均在 0.8 以上;生态安全指数最低的是新疆,在 0.45 以下。总体上,西北地区各省区的生态安全水平最低,三个时期基本在 0.5 以下;其次是内蒙古地区,生态安全指数在 0.65 以下;再次是位于黄土高原的山西、陕西两省,三个时期的平均生态安全指数在 0.7 以下;华北三省市的生态安全水平要高于以上三个区域,平均生态安全指数基本在 0.7 以上;生态安全水平最高的是东北三省,三个时期的生态安全指数稳定在 0.8 以上。研究区 13 个省市区的生态安全指数的变化可以分为三种类型:一是先升后降型:包括北京、辽宁、山西和青海四个省市;二是先降后升型:包括黑龙江、吉林、内蒙古、宁夏;三是持续下降型:包括天津、河北、陕西、甘肃、新疆。1989~1999 年 10 年里,除东北地区生态安全基本保持稳定外,其余几个地区生态安全水平均不同程度的下降。其中,华北三省市生态安全指数降低幅度最大,为 0.07。这一地区生态安全水平的降低主要是受人文因素的影响。该地区人口密度大,经济最发达,人类活动对自然生态环境的影响最大。在人类经济活动的作用下很多生态用地被转化为生态功能较低的其他用地类型,从而导致生态安全水平的降低。内蒙古地区、西北地区和位于黄土高原地区的山西、陕西两省生态安全指数降低幅度也基本在 0.05 左右。区域生态环境质量的退化,安全水平的降低是自然和人文因素叠加的结果。这些地区本底生态环境质量较差,生态阈值低,抗外界干扰和自我恢复能力弱,在气候干旱化以及人口增长,经济发展等社会经济因素的共同作用下导致这些地区生态安全水平有所降低。

5 结论与讨论

区域生态安全描述了区域尺度上生态环境为人类所提供的服务功能的大小,现有的区域生态安全研究,基本上以地理单元或流域为单元,采用环境承载力、生态足迹及多指标综合的方法,实际中操作性比较差。研究表明,利用多时段土地利用/覆盖结构信息,借助空间统计方法可以半定量地描述不同区域生态环境的相对安全程度,揭示区域生态安全的空间分布和时序变化特征。本文基于土地利用/覆盖格局的生态安全评价方法,对我国北方 13 个省市区的生态安全进行了分析。结果表明,研究区生态安全指数具有较强的空间相关性。这是因为区域生态安全是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。人类活动等随机因素对研究区生态安全的作用强度在增大,削弱了结构性因素造成的强自相关作用,生态安全空间整体分布趋向复杂,但是结构性因素引起的空间相关仍然是该区域生态安全空间分异的主要决定性因素;1989~1999 年 10 年间研究区生态环境质量整体表现出

较为明显的下降趋势; 研究区中西部地区生态安全程度明显较东部地区低。这与研究区大的结构性要素的分布特征有着密切联系, 与降水有着较为一致的空间分布特征; 13 个省市区中黑龙江省的生态安全指数最高, 新疆最低; 东北地区生态安全略有改善, 其余几个地区生态安全水平均不同程度地下降。

研究表明, 区域土地利用/覆盖格局分析及区域生态安全指数能够较好地定量评价区域生态环境的空间分布状况, 并反映局部生态环境的演变方向, 同时还可以有效揭示生态安全内在机制的一些空间细节信息, 为建立土地利用/覆盖结构、自然环境背景以及人类社会经济活动与区域生态安全之间的有机联系, 以及区域生态环境建设提供更为科学合理的依据。需要说明的是, 本文设计的生态安全指数只是生态安全程度的综合性概率度量, 是相对安全程度, 不具有绝对性。由于区域土地利用/覆盖格局的改变势必引起区域生态功能的变化, 因此, 通过研究不同土地利用/覆盖类型间的迁移变化及其空间格局的演变特征来识别区域生态环境的变化趋势及其内在因素, 对认识威胁区域生态安全的关键因素、进行合理的生态保护和建设具有十分重要的意义。

致谢: 感谢导师宫鹏教授和陈晋教授的指导。

参考文献:

- [1] 肖笃宁. 景观生态学: 理论、方法及应用. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [2] Turner M G. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, 20: 171~ 197.
- [3] 刘彦随, 陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆盖变化研究. *地理研究*, 2002, 21(3): 324~ 330.
- [4] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. *Ecosystem Health: New Goal for Environmental Management*. Washington D C: Island Press, 1992.
- [5] Dobson, Andy P, *et al.* Hopes for the future: Restoration ecology and conservation ecology. *Science*, 1997, 277: 515~ 524.
- [6] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念与研究方法. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 354~ 358.
- [7] FAO Proceedings. Land Quality Indicators and Their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development, Proceedings of the Workshop organized by the Land and Water Development Division FAO Agriculture Department, 1997, 2: 5
- [8] Tran L T, Knight C G, O' Nell R V, *et al.* Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the Mid-Atlantic region. *Environmental Management*, 2002, 29(6): 845~ 859.
- [9] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environ Urban*, 1998, 4: 121~ 130.
- [10] 杨庆媛. 西南丘陵山区土地整理与区域生态安全研究. *地理研究*, 2003, 22(6): 698~ 708.
- [11] 曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分. *中国环境科学*, 1999, 19(5): 454~ 457.
- [12] 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.
- [13] 陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆河流域区域景观生态风险分析. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 116~ 120.
- [14] Tobias P, Fernando J P, Harald S. Effects of land-use and landscape structure on holm oak recruitment and regeneration at farm level in *Quercus ilex* L. *Dehesas*. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 345~ 364.
- [15] 李晓燕, 张树文. 基于景观结构的吉林西部生态安全动态分析. *干旱区研究*, 2005, 22(1): 57~ 62.
- [16] 张浩, 汤晓敏, 王寿兵, 等. 珠江三角洲快速城市化地区生态安全研究——以佛山市为例. *自然资源学报*, 2006, 21(4): 615~ 624.
- [17] 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.
- [18] 刘明华, 董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价. *地理研究*, 2006, 25(5): 930~ 938.

- [19] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761~ 768.
- [20] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, 2000, 20(1): 9~ 12.
- [21] 李克让, 曹明奎, 於俐, 等. 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估. 地理研究, 2005, 24(5): 653~ 663.
- [22] 史培军, 宋常青, 景贵飞. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究. 地球科学进展, 2002, 17(2): 161~ 168.
- [23] 李月臣. 中国北方土地利用/覆盖变化问题研究. 北京师范大学博士论文, 2006.
- [24] 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.
- [25] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [26] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 55(5): 555~ 566.

The dynamic changes of ecological security in northern China

LI Yue-chen^{1,2}

(1 College of Geographical Science, Key Laboratory of GIS Application,
Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2 College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Regulation and rebuilding of landscape structure are the keys to redevelop the regional safe ecological pattern. The eco-environment of the 13 provinces in northern China is relatively fragile. In order to understand the eco-environment feedback mechanism and seek a way to optimize landuse/cover spatial pattern under ecological security, the temporal and spatial dynamic changes of the ecological security in northern China during the 11-year period from 1989 to 1999 is analyzed based on the landscape ecology theoretic, semi-variogram and GIS in this paper. The results show that:

(1) The eco-environmental quality in the study area showed an obvious decreasing trend. The eco-environmental quality in the areas with high ecological security decreased more slowly on the whole. The main reasons are that the eco-environment is better, flexible and steady. So it has higher capability to resist the outside disturbances.

(2) The level of ecological security in the east region was more secure than that in the west and central regions. For each sub-region, the level of ecological security in Northwest China was the lowest; Inner Mongolia was secondly; Shaanxi and Shanxi provinces that lie in the Loess Plateau were in the third place; North China was higher than the above three sub-regions; and the three provinces in Northeast China were the highest.

(3) The changes of the indexes of ecological security could be divided into three types: ①the indexes of the level of ecological security increased firstly and then decreased, including Beijing, Liaoning, Shanxi and Qinghai; ②the indexes of the level of ecological security decreased and then increased, including Heilongjiang, Jilin, Inner Mongolia, Ningxia; ③the indexes of the level of ecological security decreased continuously, including Tianjin, Hebei, Shaanxi, Gansu, and Xinjiang. During the ten years, the levels of ecological security decreased at different speeds except Northeast China.

Key words: ecological security; dynamic changes; 13 provinces in northern China

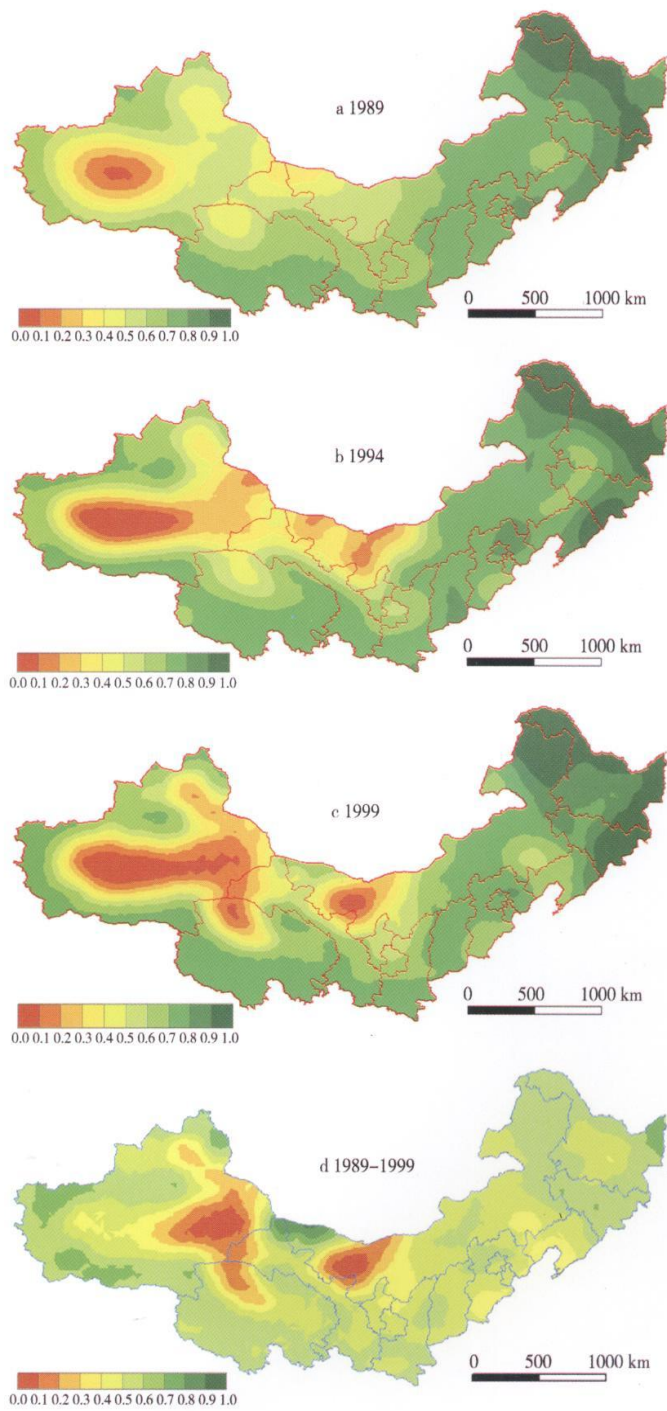


图 6 研究区三个时期生态安全空间分布及变化

Fig.6 Spatial distribution of ecological security of the study area in 1989, 1994 and 1999 and the change of ecological security from 1989 to 1999