

基于 GIS 与熵权的 DRASCLP 模型在地下水脆弱性评价中的应用\*

张少坤<sup>1</sup>,付 强<sup>1</sup>,张少东<sup>2</sup>,刘仁涛<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030;2. 建三江前进农场 机务科,黑龙江 佳木斯 156331)

摘 要:对于目前广泛应用于地下水脆弱性评价中的 DRASTIC 模型进行了评述,并指出了该模型存在的问题。根据三江平原的实际情况,提出了基于熵权的 DRASCLP 评价方法,该方法选取地下水埋深等 7 个评价指标作为评价因子,应用熵权系数法确定各因子的权重,并结合 GIS 的空间叠加功能对该区的地下水脆弱性进行评价。评价结果表明:三江平原地下水脆弱性从西北方向向东南方向呈现逐渐减弱趋势,该评价结果为三江平原地下水资源的开发利用和保护提供决策依据。

关键词:地下水脆弱性;DRASCLP;熵权;GIS

中图分类号:TV211.12;TP79 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2008)04-0134-04

The Application of DRASCLP Model in Groundwater Vulnerability Evaluation Based on GIS and Entropy Weight

ZHANG Shao-kun<sup>1</sup>,FU Qiang<sup>1</sup>,ZHANG Shao-dong<sup>2</sup>,LIU Ren-tao<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy & Architecture Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;  
2. Engineering Department of Qianjin Farm of Jiansanjiang Region, Jiamusi Heilongjiang, 156331, China)

**Abstract :**The DRASTIC,one of the wildly applied systems for groundwater vulnerability evaluation ,is reviewed and the main problems are analyzed. According to the practical situations of Sanjiang Plain ,an evaluation method namely DRASCLP is suggested based on the Entropy Weight. In this method ,seven indexes are selected as the parameters ,and the weight of each factor is calculated by the entropy-weight coefficient method ,and the space superposition function of GIS technology can be used to evaluate groundwater vulnerability. The results show that groundwater vulnerability presents the trend of decrease from north-west to southeast ,which provide a decision basis for utilization and protection of groundwater resource.

**Key words :**groundwater vulnerability ; DRASCLP ; Entropy Weight ; GIS

我国的地下水资源在国民经济、社会发展以及环境建设方面占有十分重要的地位。随着城市化的迅速发展及“三废”排放问题的加剧,导致地下水污染日趋严重,地下水污染问题已引起人们越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。地下水脆弱性研究是保护地下水环境工作的基础。通过地下水脆弱性研究,区别不同地区地下水的脆弱程度,评价地下水潜在的易污染性,可以警示人们在开采和利用地下水资源的同时,采取有效的措施保护地下水资源。

1 DRASTIC 评价模型及存在问题

1.1 DRASTIC 模型简介

DRASTIC 模型是由美国环境保护署 (USEPA) 于 1987 年提出的<sup>[3]</sup>,目前在很多国家都得到了广泛的应用。该模型

选取 7 个主要要素作为评价指标,分别是:地下水埋深 (D)、含水层的净补给 (R)、含水层的岩性 (A)、土壤类型 (S)、地形坡度 (T)、包气带的影响 (I) 以及含水层水力传导系数 (C)。根据每个参数对地下水脆弱性影响的相对重要程度,赋予一个权重因子(见表 1),同时根据每个参数的变化范围或其内在属性划分为不同的级别,对同一级别内的指标给以相同的定额,以此来反映指标对地下水脆弱性影响的差异<sup>[4-6]</sup>。

表 1 DRASTIC 模型中 7 项指标的权重

指标	D	R	A	S	T	I	C
权重	5	4	3	2	1	5	3

对某一地段,地下水脆弱性特征值为上述 7 项指标定额与对应权重的加权求和,表示为

$$DRASTIC = 5D + 4R + 3A + 2S + 1T + 5I + 3C \quad (1)$$

\* 收稿日期:2007-10-25  
基金项目:国家自然科学基金(No. 30400275)  
作者简介:张少坤(1982-),女,黑龙江佳木斯人,硕士,主要从事系统工程建模、GIS 软件的应用研究。E-mail:zhangshaokun4.26@163.com  
通信作者:付强(1973-),男,辽宁锦州人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。E-mail:fuqiang100@371.net

在正常情况下,地下水脆弱性指数的范围在 23~226 之间,它只是一个相对的概念,脆弱性特征值越大,相应区域的地下水脆弱性就越高,则该区域的地下水相对来说就更容易遭受污染;反之,越不易受到污染。

1.2 存在问题

尽管 DRASTIC 方法应用比较广泛,但仍然有许多局限性,不能盲目照搬<sup>[7]</sup>。

(1)DRASTIC 评价方法属于经验性方法,其评价模型是线性的,缺乏理论上的严谨性。

(2)DRASTIC 模型中的指标因素是固定不变的,而在不同地区地下水脆弱性影响因素的相对重要程度是不同的,因此指标因素也会有所不同。

(3)DRASTIC 方法中参数的权重值为定值,但是影响地下水脆弱性的实际水文地质情况相当复杂,所以应根据各地区的实际水文地质条件,并运用经验知识和指标数据来确定指标权重。

(4)由于各指标的定额为离散值,同一级别内的不同属性值被赋予相同的定额,因而在对指标进行分级的过程中忽略了指标本身连续变化这一客观事实,导致指标的实际变化对地下水脆弱性的影响得不到真实的反映,进而影响到最终评价结果的客观性。

以上几个方面是 DRASTIC 模型在实际应用中存在的明显不足。因此,根据三江平原的实际情况和具体问题选取适当的评价因子,建立了 DRASCLP 模型,并通过熵系数法确定各评价指标的权重,结合 GIS 空间分析对该地区的地下水脆弱性进行评价。

2 基于熵权与 GIS 的 DRASCLP 评价方法

2.1 DRASCLP 模型

由于三江平原地势平坦,地形坡度变化极小,对地下水脆弱性影响不大;而渗流区介质类型在三江平原难以收集到数据,所以这两项因子在地下水脆弱性评价中不予考虑。考虑到三江平原以农业为主,所以增加土地利用<sup>(L)</sup>和人口密度<sup>(P)</sup>这两项对地下水脆弱性影响较大的指标。综上,初步建立三江平原的地下水脆弱性评价指标体系 DRASCLP 模型,即:地下水埋深<sup>(D)</sup>、含水层的净补给<sup>(R)</sup>、含水层的介质类型<sup>(A)</sup>、土壤介质类型<sup>(S)</sup>、含水层水力传导系数<sup>(C)</sup>、土地利用<sup>(L)</sup>和人口密度<sup>(P)</sup>。

可直接定量获得的 5 项指标,即  $D, R, C, L, P$  的分级范围和定额见表 2。

不能直接定量获得的另两项指标,即  $A, S$  的分级范围和定额见表 3。

表 2 可直接定量获得指标的分级及定额

$D$		$R$		$C$		$L$		$P$	
分级范围/ $m$	定额	分级范围/ $cm$	定额	分级范围/ $(L^2 \cdot d^{-1})$	定额	分级范围/ $\%$	定额	分级范围/ $(人 \cdot km^{-2})$	定额
0~1.53	10	0~6	1	1~10	1	<30	1	<20	1
1.53~4.58	9	6~12	3	10~300	2	30~50	3	20~40	3
4.58~9.15	7	12~21	6	300~700	4	50~70	5	40~100	6
9.15~15.25	5	21~30	8	700~1000	6	70~80	7	100~200	8
15.25~22.88	3	30	9	1000~2000	8	80~90	9	200~400	9
22.88~30.50	2			2000	10	>90	10	>400	10
30.50	1								

表 3 不可直接定量获得指标的分级及定额

A(含水层介质类型)		S(土壤介质类型)	
分类	定额	分类	定额
大面积页岩	2	很薄或裸露	10
变质岩/喷出岩	3	砂	9
风化的变质岩/喷出岩	4	珍珠岩	8
冰渍物	5	收缩黏土	7
沉积砂岩	6	沙质亚黏土	6
块状砂岩	6	亚黏土	5
块状灰岩	6	粉砂质亚黏土	4
砂砾石	8	黏土质亚黏土	3
玄武岩	9	腐殖质	2
岩溶石灰岩	10	未收缩的黏土	1

2.2 熵值法确定权重系数

在信息论中,熵值反映了信息的无序化程度,可以用来度量信息量的大小,某项指标携带的信息越多,表示该指标对决策的作用越大。熵值越小,则系统无序度越小。因此可用信息熵评价所获信息的有序度及其效用,即由评价指标值构成的判断矩阵来确定各评价指标权重。其主要计算步骤

如下<sup>[8-9]</sup>:

步骤 1:设有  $n$  个待评价的样本,每个样本有  $m$  个评价指标,则根据实测数据构造评价指标特征值矩阵:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

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

(2)

步骤 2:由于参与评价的各项指标有越大越优型、越小越优型。故需对矩阵(3)中的特征值进行归一化处理,方法如下。

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{ij} / \max x_{ij} & \text{越大越优型} \\ x_{ij} = \min x_{ij} / x_{ij} & \text{越小越优型} \end{cases}$$

(3)

据此得到归一化矩阵  $X$

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

(4)

步骤 3:计算第  $i$  个评价指标下第  $j$  个待评样本评价指标特征值比重

$$P_{ij} = X_{ij} / \sum_{j=1}^n x_{ij} \tag{5}$$

步骤 4:计算第  $i$  个评价指标的熵

$$e_i = - \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \tag{6}$$

步骤 5:计算第  $i$  个评价指标的权重

$$a_i = (1 - e_i) / \sum_{j=1}^m (1 - e_i) \tag{7}$$

2.3 应用 GIS 进行地下水脆弱性评价

地理信息系统 (Geographic Information System, 简称 GIS) 是由计算机硬件、软件 and 不同方法组成的,具有支持空间数据的获取、管理、分析、建模和显示功能并可解决复杂的规划和管理问题的信息系统<sup>[10]</sup>。由于 GIS 日益成熟,不仅具有综合分析和空间建模的能力,而且可以随时修改与更新数据库,使评价过程变得简便、容易。目前 GIS 已广泛应用于环境评价、生态保护、城市规划等领域<sup>[11]</sup>,并且在地下水

脆弱性评价中也得到了应用。

基于 GIS 的地下水脆弱性评价基本步骤是: 根据具体情况及获得的数据资料,建立空间数据库,同时利用 GIS 的图形矢量化功能,编绘各个因子的图形。 建立各个因子在各个评价单元上的评分,得到研究区各个因子的评分图。应用 GIS 软件的地理分析功能对这 7 个因子对应的评分图按各自对应的相对权重值进行图层间的叠加分析,得到各单元的地下水脆弱性指数。

3 应用实例

3.1 研究区 DRASCLP 模型及权重确定

三江平原位于黑龙江省东北部,地理坐标位于 43°49'55" - 48°27'40" N,129°11'20" - 135°05'26" E,其范围东起乌苏里江、西接汤旺河及牡丹江分水岭,南至大兴凯湖及绥芬河分水岭,北界黑龙江,包括黑龙江、松花江与乌苏里江汇流的三角地带以及倭肯河与穆稜河流域和兴凯湖平原。现将三江平原 7 个指标的实测数据列于表中,见表 4、5。

表 4 三江平原地下水脆弱性评价指标体系中不可直接测得的指标

分区	A	S
萝北地区	细砂、中砂、砂砾石	薄层粉质黏土及厚层砂砾石
同抚地区	中粗砂、含砾中粗砂、砂砾石	厚度为 8~15 m 的粉质黏土及厚层砂砾石
挠力河地区	粉细砂、中细砂、砂砾石	厚度为 10~17 m 的粉质黏土及厚层砂砾石
安邦河地区	中粗砂、含砾中粗砂、砂砾石	薄层粉质黏土、粉土及厚层砂砾石
倭肯河地区	中粗砂、含砾中粗砂、砂砾石	粉质黏土、粉土、砂及砂砾石
穆稜河地区	中粗砂、含砾粗砂、砂砾卵石	薄层粉质黏土及粉土、厚层砂及砂砾石

表 5 三江平原地下水脆弱性评价指标体系中可直接测得的指标数据

分区	D/m	R/mm	C/(m·d <sup>-1</sup> )	L/%	P/(人·km <sup>-2</sup> )
萝北地区	5.3	15.79	15.33	85.83	83.82
同抚地区	6.5	16.1	24.65	72.11	42.59
挠力河地区	6.0	14.15	12.60	86.49	26.63
安邦河地区	2.6	6.42	2.15	77.68	315.55
倭肯河地区	2.3	13.81	10.20	85.03	143.48
穆稜河地区	3.5	4.05	1.28	87.67	80.55

根据表 2 和表 3 中指标的分级标准和定额的确定形式,得出三江平原地下水脆弱性指标体系的定额(见表 6)。

表 6 三江平原地下水脆弱性评价指标体系的定额

分区	D	R	A	S	C	L	P
萝北地区	7	6	8	10	4	9	6
同抚地区	7	6	7	9	4	7	6
挠力河地区	7	6	8	9	4	9	3
安邦河地区	9	3	7	10	1	7	9
倭肯河地区	9	6	7	8	2	9	8
穆稜河地区	9	1	7	10	1	9	6

由式(6)得到各评价指标的熵

$$e_i = (0.0425 \quad 0.0400 \quad 0.0426 \quad 0.0426 \quad 0.0392 \quad 0.0425 \quad 0.0415)$$

由式(7)得到各评价指标的权重

$$a_i = (0.1427 \quad 0.1431 \quad 0.1427 \quad 0.1427 \quad 0.1432 \quad 0.1427 \quad 0.1420)$$

则该地区地下水脆弱性指数为

$$DRASCLP = 0.1427D + 0.1431R + 0.1427A + 0.1427S + 0.1432C + 0.1427L + 0.1429P$$

3.2 基于 GIS 绘图

根据获得的数据资料及以上研究形成的三江平原地下

表(6)中数据,由式(2)得到评价指标特征值矩阵。

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} 7 & 7 & 7 & 9 & 9 & 9 \\ 6 & 6 & 6 & 3 & 6 & 1 \\ 8 & 7 & 8 & 7 & 7 & 7 \\ 10 & 9 & 9 & 10 & 8 & 10 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 2 & 1 \\ 9 & 7 & 9 & 7 & 9 & 9 \\ 6 & 6 & 3 & 9 & 8 & 6 \end{bmatrix}$$

由式(5)得到待评价样本评价指标特征值比重矩阵

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.1458 & 0.1458 & 0.1458 & 0.1875 & 0.1875 & 0.1875 \\ 0.2143 & 0.2143 & 0.2143 & 0.1071 & 0.2143 & 0.0357 \\ 0.1818 & 0.1591 & 0.1818 & 0.1591 & 0.1818 & 0.1591 \\ 0.1786 & 0.1607 & 0.1607 & 0.1786 & 0.1429 & 0.1786 \\ 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.0628 & 0.1250 & 0.0625 \\ 0.1800 & 0.1400 & 0.1800 & 0.1400 & 0.1800 & 0.1800 \\ 0.1579 & 0.1579 & 0.0789 & 0.2368 & 0.2105 & 0.1579 \end{bmatrix}$$

水脆弱性评价方法,分别建立各个因子在各个评价单元的评分<sup>[12]</sup>,得到研究区各个因子评分图(图 1 - 7),再应用 GIS 软

件的空间分析功能对 7 个因子进行叠加分析,得到三江平原的地下水脆弱性评价图(图 8)。

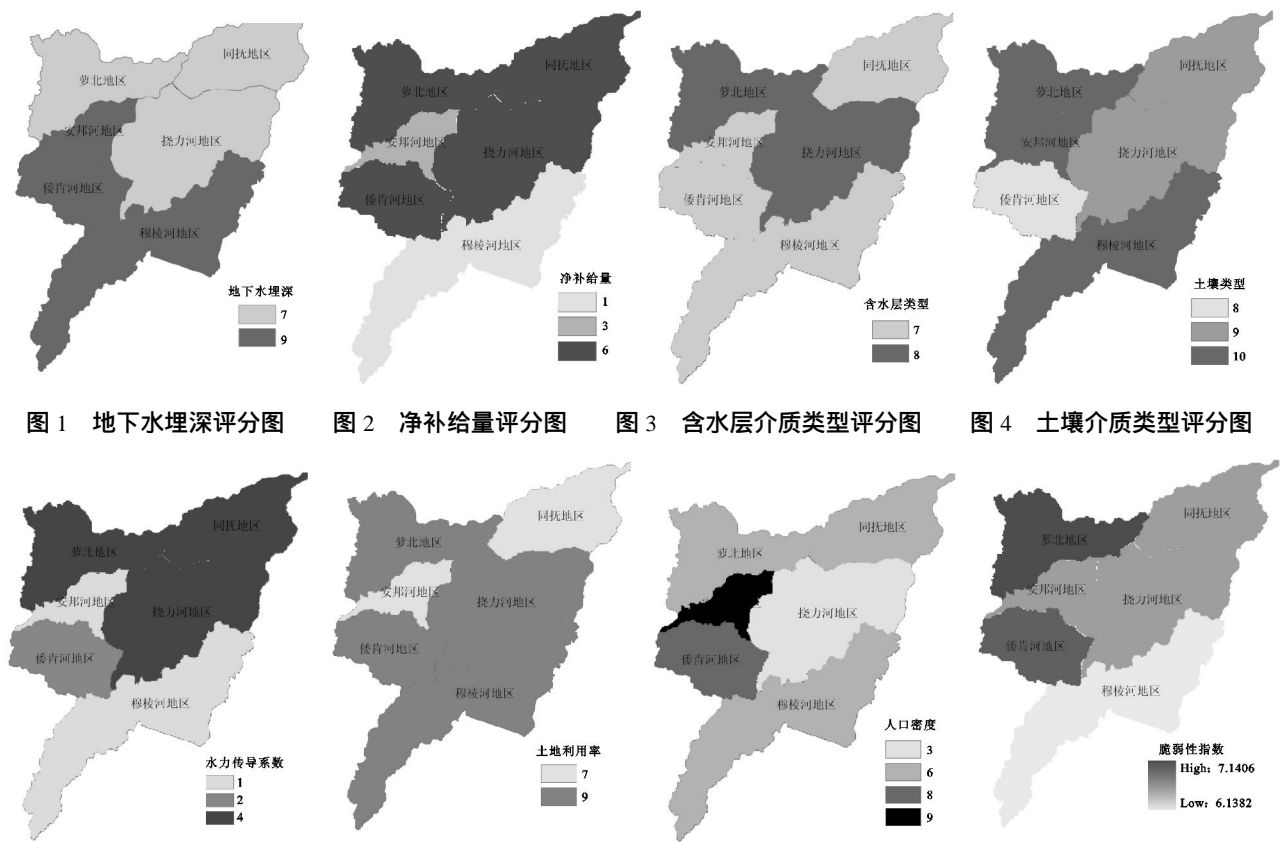


图 1 地下水埋深评分图

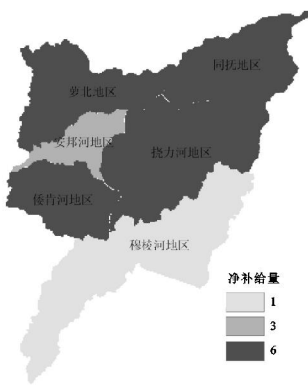


图 2 净补给量评分图



图 3 含水层介质类型评分图

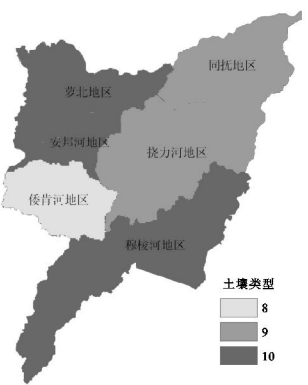


图 4 土壤介质类型评分图



图 5 水力传导系数评分图



图 6 土地利用率评分图

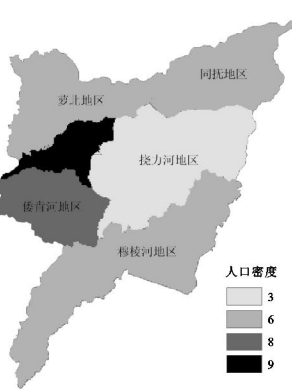


图 7 人口密度评分图

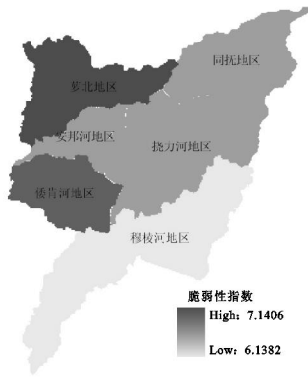


图 8 地下水脆弱性综合评价图

3.3 评价结果分析

通过颜色的深浅表示区域地下水脆弱性指数的大小,一般颜色越深,脆弱性指数越大,表示该区域脆弱性越高,反之脆弱性越低(见图 8)。从图 8 中可以得出三江平原地下水脆弱性的相对程度及分布情况:研究区内地下水脆弱性从西北方向向东南方向逐渐减弱,即脆弱性相对较高的地区主要分布在平原西部萝北、倭肯河地区;脆弱性相对较低的地区主要分布在平原南部穆稜河地区;其余地区为脆弱性相对比较中等的地区。

投影寻踪评价模型得到的各个地区综合评价的投影值:  
 $z^* = (11.3152 \ 10.7301 \ 10.0539 \ 7.0867 \ 11.0341 \ 5.5340)$

通过与投影寻踪模型的结果( $z^*$ )进行比较,说明运用以上方法对三江平原进行地下水脆弱性评价,其结果较好的反应了研究区的实际情况,同时也验证了该评价方法的客观性与准确性。

4 结 论

(1)根据三江平原地区的实际情况,参照 DRASTIC 方法的思路,首次建立 DRASCLP 模型并结合熵权与 GIS 对其地下水脆弱性进行评价,得出研究区地下水脆弱性的分布特征:高脆弱性区为萝北、倭肯河地区;低脆弱性区为穆稜河地区;其余地区为中等脆弱性区。与投影寻踪模型的评价结果进行比较,评价结果基本一致,表明该评价模型在三江平原有很好的应用效果,其结果比较客观。

(2)针对 DRASTIC 模型中需要人为确定各项指标权重的缺点,将熵权系数法用于三江平原各因子权重的确定。由

于各项指标的权重由客观数据计算得到,使得权重的确定有了一定的理论依据,消除了人为确定权重的主观误差,使评价结果更加合理。

(3)基于 GIS 的空间分析功能将各个因子的评分图进行叠加得到地下水脆弱性评价图,通过结果图可以看出各区域的地下水脆弱性的相对程度及分布情况,为该地区地下水资源的合理开发利用、保护等方面提供决策依据。而随着 GIS 技术理论和方法上的不断完善,它在水资源领域将会占有越来越重要的地位。

(4)目前,将指标划分为不同的级别和范围时,没有细分定额范围,评分标准过于粗糙,致使定额的确定存在较大的人为因素,从而影响结果的准确性。

参考文献:

[1] Chen Shouyu, Zhu Wenbin, Wang Guoli. Proceedings of International Conference on Sustainable Development for the 21st Century[C]// Main Title\_Economy Energy Environment, Dalian, China, 1996:20-25.

[2] 梦宪萌,束龙仓,卢耀如. 基于熵权的改进 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 水利学报, 2007(1):94-99.

[3] Aller L, Bennet T, Lehr J H, et al. A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydro geological Settings [M]. Oklahoma: U. S. Environmental Protection Agency, 1987.

表 5 德州市 2002 - 2006 年生态足迹供需盈亏状况					
	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
人均生态足迹	1.74	2.44	2.32	3.53	3.70
人均生态承载力	0.50	0.432	0.47	0.60	0.56
生态赤字	1.18	1.94	1.70	2.85	3.07

2.3.4 万元 GDP 生态足迹计算

万元 GDP 生态足迹指的是产生每一万元 GDP 所占用的生态足迹。万元 GDP 生态足迹越高说明资源的利用效率越低,这个指标较好地反映了资源利用的效率。利用德州市统计年鉴历年 GDP 数据和生态足迹计算结果,得出 2002 - 2006 年的万元 GDP 生态足迹分别为 2.048,2.339,1.88,2.35,2.06 hm<sup>2</sup>,高于山东省(2002 年 1.56 hm<sup>2</sup>),低于全国水平(2002 年 2.037 hm<sup>2</sup>)。万元 GDP 占用的生态足迹较高说明了德州市生产制造工艺相对落后,新技术的投入使用还不高,农业用地和化石能源用地压力较大。分析其原因,一是德州市人口密度远远高于全国平均水平,近年来人口一直保持相对较快的增长速度,各种资源的人均占有量逐渐降低,经济发展和环境压力的矛盾日益突出。二是德州市自然资源相对比较贫乏,使得农业用地人均生态承载力有下降趋势,建材、纺织是重要耗能产业,常规能源品种单一且储量少,能源缺口大。农业自然灾害频繁,城市污水与垃圾处理水平低,农业生态环境比较脆弱。

表 6 德州市 2002 - 2004 年生态足迹供需盈亏对比 <sup>[10]</sup>				
年份	人均生态足迹/hm <sup>2</sup>		人均生态承载力/hm <sup>2</sup>	
	德州市	山东省	德州市	山东省
2002 年	1.735	3.473	0.494	0.461
2003 年	2.435	3.649	0.432	0.462
2004 年	2.323	3.935	0.465	0.455

3 讨 论

- (1) 由于人口增长、资源结构不合理和经济发展对资源索取的巨大压力,德州市近 5 a 来生态赤字快速增长,人口与环境间的矛盾不断加剧;经济结构的调整、科技投入是改变目前经济发展与资源利用不可持续的基本策略。
- (2) 生态足迹分析法紧扣可持续发展理论,在目前可持续发展生态评估的生物物理量衡量方法中广泛应用。但该

在理论和方法上存在一些不足:第一,用生态赤字进行区域可持续发展评价,往往会得出生态足迹越高,生态赤字越大,可持续性越差,经济发展与可持续发展之间对立的结论;第二,生态足迹模型隐含假设了各类生物生产性土地在空间上的相互排斥性,而不能具有两种及其以上的生物生产功能,从而产生生态足迹供给计算结果偏低的系统误差<sup>[11]</sup>;第三,把能源足迹产生的压力完全由消费区域承担,这显然与实际是不相符合的。因此,在评价区域可持续发展过程中,要考虑影响区域可持续发展的自然、社会和经济等多种因素通过生态足迹模型计算,量化指标,从而做出的评价更科学。

参考文献:

[1] 赵先贵,等.基于生态足迹的可持续评价指标体系的构建[J].中国农业,2006,39(6):1202-1207.

[2] Hamilton C. The Genuine Progress Indicator Methodological Developments and Results from Australia[J]. Ecological Economics,1999,30:13-28.

[3] 叶文虎.联合国可持续发展指标述评[J].中国人口·资源与环境,1997,7(3):83-87.

[4] 李利锋,郑度.区域可持续发展评价:进展与展望[J].地理科学进展,2002,21(3):237-248.

[5] 张志强,徐中民,程国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济,2000(10):8-10.

[6] 徐中民,张志强,等.甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J].地理学报,2000,55(5):608-616.

[7] 卢远,华瑾.广西 1990 - 2002 年生态足迹动态分析[J].中国人口·资源与环境,2004,14(3):49-53.

[8] Hardi P,Barg S,Hodge T,et al. Measuring sustainable development:Review of current practice[R]. Occasional paper number17,1997(IISD):1-2,49-51.

[9] Wackernagel M,Onisto L,Bello P,et al. National natural capital accounting with ecological footprints concept[J]. Ecological Economics,1999,29:375-390.

[10] 李中才.山东省生态的测算及可持续发展评价[J]国土与自然资源研究,2007(2):19-20.

[11] 李明月,江华.生态足迹分析模型的假设条件缺陷及应用偏差[J].农业现代化研究,2005,26(1):6-9.

(上接第 137 页)

[4] 王国利,周惠成,杨庆.基于 DRASTIC 的地下水易污染性多目标模糊模式识别模型[J].水科学进展,2000(2):173-179.

[5] 范琦,王贵玲,等.地下水脆弱性评价方法的探讨及实例[J].水利学报,2007(5):606-605.

[6] 周惠成,王国利.基于 DRASTIC 模型含水层易污染性模糊综合评价[J].大连理工大学学报,2000(2):212-215.

[7] 钟佐燊.地下水防污性能评价方法探讨[J].地学前缘,2005(4):3-11.

[8] 郑秀慧,张清,罗敏.熵权系数法在投资项目风险决策的应用[J].科技与管理,2000(2):73-75.

[9] 付强.农业水土资源系统分析与综合评价[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

[10] 陆守一.地理信息系统[M].北京:高等教育出版社,2004:8.

[11] 孙伟,马国栋,等.基于 GIS 的地下水脆弱性评价[J].信息技术,2006(3):18-20.

[12] 雷静,张思聪.唐山市平原区地下水脆弱性评价研究[J].环境科学学报,2003(1):94-95.