

基于粗糙集理论的泥石流易发性综合评判模型

王念秦, 薛瑶琼, 李少兵, 冯鑫

(西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054)

摘 要:泥石流灾害易发性判断是泥石流灾害性评价的重要组成部分, 快捷、准确的评判对人类工程活动有着重要的指导意义。众所周知, 流域中, 地貌、地质、水文三大条件对泥石流灾害起决定性作用, 是泥石流易发性的主要影响因素。这里基于对泥石流灾害的机理认识, 将泥石流易发性分为高易发、中易发、低易发、不易发 4 个等级, 在充分考虑泥石流灾害易发性影响因素贡献的基础上, 给出各因素等级的确定标准, 运用粗糙集理论获取各级评价指标的相对重要度, 再依据专家经验确定主观权重, 结合相对重要度和主观权重确定各因素的综合权重, 进而利用模糊数学中多级模糊评判的理论和方法, 建立了一种新的泥石流易发性多级模糊综合评判模型, 并以陕西省凤县 5 条泥石流沟为例进行模型验证, 结果表明这 5 条泥石流沟易发性从低到高的排序为: 吴家沟泥石流沟、三台山泥石流沟、后沟泥石流沟、银铜梁泥石流沟、寺沟泥石流沟, 结果与实际吻合良好。

关键词: 泥石流; 评价指标; 粗糙集理论; 易发性综合评判

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)03-0246-05

Debris Flow Liability Comprehensive Evaluation Model on Rough Set Theory

WANG Nian-qin, XUE Yao-qiong, LI Shao-bing, FENG Xin

(College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The judgment of debris flow disaster liability is the important part of the debris flow disaster evaluation, and fast and accurate evaluation has important guiding significance of human engineering activity. As all as we know, topography and geomorphology, geological and hydrological conditions play a decisive role in the debris flow disaster, and are the main influence factors of debris flow liability. Based on mechanism of debris flow disasters, the debris flow liability can be divided into high liability, middle liability, low liability and not liability. Based on the full consideration of the contributions on debris flow liability factors, the factors' determine standard was given, the relative important degree of each evaluation indexes was obtained according to the rough set theory, then based on expert experience method a subjective weight was determined, the comprehensive weight was determine by combining with the relative important degree and subjective weight, then, a new kind of debris flow liability comprehensive evaluation model of multilevel fuzzy assessment was set up based on the theory and method of fuzzy mathematics on multilevel fuzzy assessment, 5 debris flow gullies of Fengxian, Shaanxi were taken as the example to verify the model. The results show that the debris flow gully liability in 5 gullies follows the order of Wujiagou, Santaishan watershed, Hougou catchment, Yintongliang catchment, Sigou catchment. The results are in good agreement with the actual situation.

Key words: debris flow; evaluation index; rough set theory; liability comprehensive evaluation

在中国, 2/3 的国土为山地, 地质条件复杂, 地质环境脆弱, 构造活动频繁, 为泥石流发育提供了有利场所, 泥石流灾害十分严重。1982 年 8 月 6 日, 甘肃省文县县城遭关家沟泥石流危害, 造成 33 人死亡,

100 多人受伤^[1]; 1996 年 8 月 4 日, 虎峪河、风峪河、九院沙河等暴发山洪泥石流, 死亡和失踪 60 人^[2]; 1891 年 8 月, 意大利贡德尔沟爆发泥石流, 摧毁了位于下游的 20 余栋民房, 致死 39 人^[3]; 2010 年 8 月 7

收稿日期: 2013-10-12

修回日期: 2013-10-28

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41130753); 国家自然科学基金项目(40972174, 41002101)

作者简介: 王念秦(1964—), 男, 河南孟津人, 教授, 工学博士, 主要从事岩土体稳定及地质灾害防治方面的教学、科研工作。E-mail: young-lock@163.com

日,舟曲突降强降雨,县城北面的罗家峪、三眼峪泥石流造成沿河房屋被冲毁,遇难 1 434 人,失踪 331 人。据不完全统计,自 1949 年以来,我国因泥石流活动直接死亡人数已超过 6 000 人,直接经济损失达 80 多亿元^[3]。泥石流灾害的严重性、危害性,推动了此项研究的不断深入。如匡乐红等^[4]基于粗糙集原理,提出了一种新的区划指标选取方法;刘勇健等^[5]将粗糙集理论和范例推理相结合,建立了基于粗糙集—范例推理的泥石流危险性评价模型;王念秦等^[6]探讨了泥石流灾害易发性评价方法;李大鸣等^[7]将范例推理技术、相似系统相似度与粗糙集理论相结合,构建了基于粗糙集理论的泥石流危险度评价模型。另外,柳金峰等^[8]、汪明武^[9]、孟凡奇等^[10]、侯兰功等^[11]、吕学军等^[12],在泥石流危险性评价、泥石流危险度区划、筛选泥石流评价因子、单沟泥石流灾害危险性评价、泥石流堆积物粒度分维等方面进行过大量研究,但对泥石流灾害的认知仍然不够深入,需要不断加强。这里拟以粗糙集理论为基础,兼顾主、客观赋权法,结合典型区域泥石流灾害特征,确定量化各评价指标综合权重,探索新的泥石流灾害易发性综合评判模型,有一定的现实意义。

1 粗糙集理论简介

粗糙集理论(Rough Set,简称 RS)是波兰华沙理工大学 Z. Pawlak 教授于 20 世纪 80 年代初提出的研究不完整、不确定知识和数据的表达、学习和归纳的理论方法^[13]。主要原理是:促使泥石流形成的各个条件属性(指标)的重要性程度是不一样的,在粗糙集里,采取先去掉某个属性,再考虑没有该属性后分类会怎样变化,若去掉该属性后相应的分类变化比较大,则该属性的强度较大,即重要性高,则其权重较大;否则,该属性的强度较小,重要性低,权重较小^[14]。粗糙集理论的主要思路是利用属性重要度来确定属性的客观权重,再根据实际情况将客观权重与由专家经验知识确定的主观权重相结合,确定最终的权重值,从而实现主观先验知识与客观情况的合理统一,克服了以往属性权重的确定过分依赖专家经验知识的不足。粗糙集理论仅根据观测数据删除冗余信息,分析不完整、不确定知识的粗糙度、属性间的依赖性与重要性,该理论与其他处理不确定和不精确问题理论最大的区别是它无需提供问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,所以对问题的不确定性描述或处理可以说是比较客观的,只和已知数据有关,避免了主观因素的影响,但是由于这个理论没有包含处理不精确或不确定原始数据的机制,所以这个理论

与概率论、模糊数学等其他处理不确定或不精确问题的理论有很强的互补性。

2 基于粗糙集理论的属性权重确定方法

首先引入粗糙集及信息系统的概念,并定义属性的重要性程度,然后根据属性的重要性程度确定其综合权重。

2.1 粗糙集及信息系统^[11-13]

定义 1:给定论域 U , R 是 U 上定义的等价关系; $[x]_R$ 是 U 上的等价关系 R 生成的 R —等价类。

定义 2:用一个四元组来定义一个信息系统 $S = (U, A, V, f)$, 其中: $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示所要讨论对象的非空有限集合,也称为论域; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 是属性集合; $V = \sum_{a \in A} V_a$ 是属性值的集合; $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数。对于每个属性子集 B , 这里定义一个不可分辨二元关系(即等价关系) $IND(B)$, 即 $IND(B) = \{(x, y) \mid (x, y) \in U^2, \forall a \in B, f(x, a) = f(y, a)\}$ 。等价关系 $IND(B) (B \in A)$ 构成了论域 U 的一个划分,记作 $U/IND(B)$,常简记为 U/B 。

2.2 属性重要性程度^[14-15]

定义 1:设一个知识库 $K = (U, R)$, $r \in R$ 为一个等价关系。称 $GD(R)$ 为知识 $r \in R$ 的粒度。

定义 2:设 $K = (U, R)$ 为一知识库, $r \in R$ 为一个等价关系。称 $Dis(R)$ 为知识 $r \in R$ 的分辨度。

$$\begin{aligned} Dis(R) &= 1 - GD(R) \\ &= 1 - \frac{|R|}{|U^2|} = 1 - \frac{|R|}{|U|^2} \end{aligned}$$

设 $IS = (U, A, V, f)$ 是一个信息系统, $A = C \cup D$, $X \in C$ 是一属性子集, $x \in X$ 是一属性,考虑 x 对于 X 的重要性程度,即 X 中增加属性 x 后分辨度的提高程度,提高程度越大,认为 x 对于 X 越重要。

定义 3:设 $X \in C$ 是一属性子集, $x \in C$ 是一属性,记 x 对于 X 的属性重要性程度为 $\gamma_X(x)$,其定义为

$$\gamma_X(x) = 1 - \frac{|X \cup \{x\}|}{|X|}$$

$$\begin{aligned} \text{设 } \frac{U}{IND(X)} &= \frac{U}{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \text{ 则 } |X| \\ &= |IND(X)| = \sum_{i=1}^n |X_i|^2. \end{aligned}$$

2.3 基于粗糙集的属性权重确定方法

在信息系统 $S = (U, A, V, f)$ 中,条件属性集 $C \in A$ 中每个属性的重要程度是不同的,应该赋予它们不同的权重。综合权重为:

$$\omega = \alpha q + (1 - \alpha) p \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

式中: α ——经验因子,反映了决策过程中决策者对主

观权重和客观权重的偏好程度, $0 \leq \alpha \leq 1$; q ——主观权重, 由专家经验知识确定; p ——客观权重, $p_i = \frac{\gamma_{x_i}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \gamma_{x_i}(x_i)}$ 。

3 泥石流易发性模糊综合评判模型

3.1 模糊综合评判因素集的确定

综合分析影响泥石流形成的条件, 以泥石流详细野外调查的实际资料为基础, 选择形貌条件、地质条件、水文条件 3 方面 7 个特征要素为指标, 建立泥石流易发性评价因素集(图 1)。

由图 1 可知, 泥石流易发性评价可在两个层次上进行, 第一层, 总目标因素集 $u = (u_1, u_2, u_3)$; 第二层, 子目标因素集 $u_1 = (u_{11}, u_{12}, u_{13}), u_2 = (u_{21}, u_{22}), u_3 = (u_{31}, u_{32})$ 。

3.2 建立综合评判评语集

评语集是对各层次评价指标的一种语言描述, 是

对各评价指标所给出的评语集合。这里将泥石流的易发性(V)划分为 4 个等级, 建立评价依据标准, 如表 1 所示。

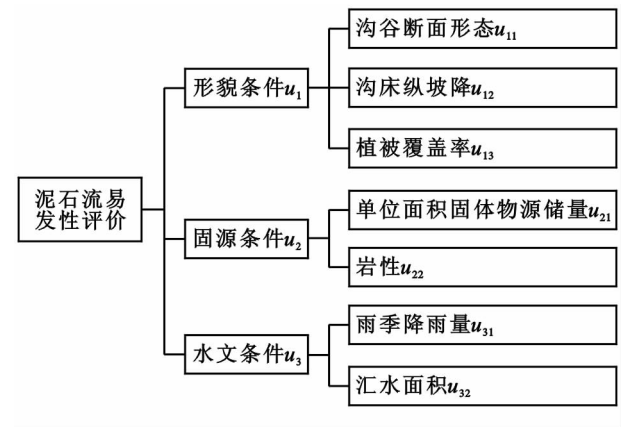


图 1 泥石流灾害易发性模糊综合评判因素集

$V = (v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4)$
= (高易发 中易发 低易发 不易发)
设相对于各等级 v_j 规定的参数列向量 C 为:
 $C(c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4)^T = (0.4 \quad 0.3 \quad 0.2 \quad 0.1)^T$

表 1 各因素等级评价标准

项目	不易发(1)	低易发(2)	中易发(3)	高易发(4)
沟谷断面形态	岸坡坡度 $<10^\circ$, 沟道宽缓	岸坡坡度 $10^\circ \sim 30^\circ$, 沟道宽缓	岸坡坡度 $30^\circ \sim 50^\circ$, 拓宽的 U、V 型	岸坡坡度 $>50^\circ$, 狭窄的 U、V 型
沟床纵坡降	$<5\%$	$5\% \sim 10\%$	$10\% \sim 20\%$	$>20\%$
植被覆盖率	$>60\%$	$40\% \sim 60\%$	$20\% \sim 40\%$	$<20\%$
单位面积固体物源储量/ (万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	5 m 以下高边坡松散 堆积, 堆积量 <1	5~10 m 高边坡松散 堆积, 堆积量 1~10	10~30 m 高边坡松散 堆积, 堆积量 10~50	30 m 以上高边坡松散 堆积, 堆积量 >50
岩性	未风化硬质岩	微风化硬质岩	软硬相间	软岩、全风化硬质岩、黄土
雨季降雨量/mm	<50	50~100	100~500	>500
汇水面积/ km^2	<1	1~5	5~10	>10

3.3 应用粗糙集理论求权重

选择西秦岭腹地的陕西省凤县境内的 5 条泥石流沟^[16]为例, 地质因素评价结果见表 2。根据粗糙集理论及表 2 可得: $\omega_{11}=0.38; \omega_{12}=0.32; \omega_{13}=0.3; \omega_{21}=0.6; \omega_{22}=0.4; \omega_{31}=0.45; \omega_{32}=0.55$

一级评判指标也照此方法计算得: $\omega_{11}=0.3; \omega_{12}$

$=0.4; \omega_{13}=0.3$

3.4 泥石流易发性模糊评判

(1) 各泥石流沟单因素模糊评判。根据各影响因素的等级确定标准(表 1), 以 20 分为总分给每个因素进行打分, 评判结果见表 3。

表 2 各泥石流沟评价信息

泥石流沟 名称	评价指标赋值						
	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{21}	u_{22}	u_{31}	u_{32}
银铜梁	3	3	2	4	4	3	2
吴家沟	3	3	1	3	1	2	3
寺沟	4	4	2	4	4	4	4
三台山	4	3	2	3	4	3	2
后沟	3	3	1	2	3	3	3

(2) 评语集的计算。

①以银铜沟为例

由表 3 可得:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.60 & 0.05 & 0 \\ 0.30 & 0.55 & 0.05 & 0.1 \\ 0.25 & 0.25 & 0.45 & 0.05 \end{bmatrix}$$

$$R_2=\begin{bmatrix}0.55 & 0.30 & 0.10 & 0.05 \\ 0.60 & 0.35 & 0.05 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3=\begin{bmatrix}0.35 & 0.50 & 0.15 & 0 \\ 0.30 & 0.25 & 0.45 & 0 \end{bmatrix}$$

表 3 各泥石流易发性单因素模糊评价

泥石流沟	等级	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{21}	u_{22}	u_{31}	u_{32}
银铜沟	高易发	7	6	5	11	12	7	6
	中易发	12	11	5	6	7	10	5
	低易发	1	1	9	2	1	3	9
	不易发	0	2	1	1	0	0	0
吴家沟	高易发	1	1	0	1	2	0	0
	中易发	9	8	2	8	3	4	8
	低易发	4	5	5	6	5	9	6
	不易发	6	6	13	5	10	7	6
寺沟	高易发	10	11	4	11	11	12	13
	中易发	8	6	6	6	7	7	5
	低易发	2	2	9	3	2	1	2
	不易发	0	1	1	0	0	0	0
三台山	高易发	10	8	6	5	11	5	2
	中易发	6	9	5	9	6	9	7
	低易发	3	3	8	5	3	5	9
	不易发	1	0	1	1	0	1	2
后沟	高易发	4	5	4	5	7	5	8
	中易发	11	8	4	6	8	11	9
	低易发	4	4	3	8	5	4	3
	不易发	1	3	9	1	0	0	0

那么由 $A_2=(0.38 \quad 0.32 \quad 0.3)$, $A_3=(0.6 \quad 0.4)$, $A_3=(0.45 \quad 0.55)$ 可得到形貌条件、地质条件、水文条件评价向量为:

$$B_1=A_1\times R_1=(0.304 \quad 0.479 \quad 0.17 \quad 0.047)$$

$$B_2=A_2\times R_2=(0.570 \quad 0.320 \quad 0.080 \quad 0.030)$$

$$B_3=A_3\times R_3=(0.322 \quad 0.363 \quad 0.315 \quad 0.000)$$

所以

$$R=\begin{bmatrix}0.304 & 0.479 & 0.170 & 0.047 \\ 0.570 & 0.320 & 0.080 & 0.030 \\ 0.322 & 0.363 & 0.315 & 0.000 \end{bmatrix}$$

再由 $A=(0.3 \quad 0.4 \quad 0.3)$, 就可以得到“泥石流易发性”的综合评价向量:

$$B=A\times R=(0.416 \quad 0.381 \quad 0.178 \quad 0.026)$$

同理可计算得到其余 4 个泥石流流沟的综合评价向量。

②吴家沟

$$B=A\times R=(0.09 \quad 0.32 \quad 0.283 \quad 0.307)$$

③寺沟

$$B=A\times R=(0.536 \quad 0.318 \quad 0.137 \quad 0.009)$$

④三台山

$$B=A\times R=(0.321 \quad 0.374 \quad 0.26 \quad 0.045)$$

⑤后沟

$$B=A\times R=(0.28 \quad 0.404 \quad 0.243 \quad 0.073)$$

(3) 综合评判结果。由于各等级 V_j 规定的参数列向量为: $C=(0.4 \quad 0.3 \quad 0.2 \quad 0.1)^T$, 则各泥石流流沟的评判结果为

$$P'=B'\times C=\begin{bmatrix}0.319 \\ 0.205 \\ 0.338 \\ 0.297 \\ 0.289 \end{bmatrix}$$

从计算结果可以看出, 5 条泥石流流沟易发性从低到高的排序为: 吴家沟泥石流流沟、三台山泥石流流沟、后沟泥石流流沟、银铜梁泥石流流沟、寺沟泥石流流沟。评价结果与实际情况较吻合, 说明基于 RS 理论的模糊定权法在泥石流易发性评价的应用是有效、实用、可行的。

4 结 论

(1) 在野外泥石流详细调查和前人研究工作的基础上, 运用 RS 理论计算出影响泥石流易发性各指标的相对重要度, 再结合专家经验确定主观权重, 将其权值化, 作为模糊综合评判中参评因素的权重系数, 建立新的泥石流易发性评判模型。该模型同时兼顾主、客观赋权法, 使用综合定权法, 提高了评价指标权重值的科学、客观性, 使得到的指标权重值更合理。

同时以陕西省凤县5条泥石流沟为例验证模型有效性,评价结果与实际吻合良好。

(2) 模型依据影响泥石流易发性的各因素及当地的地质构造和环境,将影响泥石流易发性的因素概化为三个方面(地貌条件、地质条件、水文条件)7个指标(沟谷断面形状、沟床纵坡降、植被覆盖率、单位面积固体物源储量、岩性、雨季降雨量、汇水面积),体现了一定的综合性,但由于泥石流灾害本身的复杂性,评价指标的选取尚不能程序化、模式化、标准化,评价指标与评价对象之间的密切性和各指标之间的独立性方面还有待于深入研究。

参考文献:

- [1] 史正涛,祁龙. 甘肃省文县关家沟泥石流综合治理[J]. 山地研究,1997,15(2):124-128.
- [2] 谢洪,钟敦伦,韦方强,等. 我国山区城镇泥石流灾害及其成因[J]. 山地学报,2006,24(1):79-87.
- [3] 曾思伟,王得楷. 泥石流研究与展望[J]. 甘肃科学学报,2003,15(S1):10-14.
- [4] 匡乐红,徐林荣,刘宝琛,等. 基于粗糙集原理的泥石流危险度区划指标选取方法[J]. 地质力学学报,2006,12(2):236-242.
- [5] 刘勇健,刘义建. 基于粗糙集的范例推理在泥石流危险

性评价中的应用[J]. 山地学报,2008,26(2):223-229.

- [6] 王念秦,姚勇. 基于模糊数学和权的最小平方方法的泥石流易发性评价方法[J]. 灾害学,2008,23(2):5-9.
- [7] 李大鸣,罗浩,刘江川. 基于粗糙集理论的泥石流危险度评价模型[J]. 中国农村水利水电,2012(6):34-39.
- [8] 柳金峰,欧国强. 泥石流危险性评价的耗散结构分析[J]. 水土保持研究,2004,11(1):123-125.
- [9] 汪明武. 基于神经网络的泥石流危险度区划[J]. 水文地质工程地质,2000,27(2):18-19.
- [10] 孟凡奇,李广杰,李明,等. 逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用[J]. 岩土力学,2010,31(9):2925-2929.
- [11] 侯兰功,崔鹏. 单沟泥石流灾害危险性评价研究[J]. 水土保持研究,2004,11(2):125-128.
- [12] 吕学军,余猛. 泥石流堆积物粒度分维的讨论[J]. 水土保持研究,2007,14(4):105-108.
- [13] Pawlak Z. Rough set approach to knowledge-based decision support[J]. European Journal of Operational Research,1997,99(1):48-57.
- [14] 曹秀英,梁静国. 基于粗糙集理论的属性权重确定方法[J]. 中国管理科学,2002,10(5):98-100.
- [15] 王洪凯,姚炳学,胡海清. 基于粗糙集理论的权重确定方法[J]. 计算机工程与应用,2003,36(2):20-21.
- [16] 薛喜成. 西秦岭矿山泥石流发育规律与环境效应[D]. 西安:西安科技大学,2010.

(上接第245页)

(4) 渠道是叶尔羌河灌区灌溉最主要输水方式,而传统的土渠输水渗漏损失量大,因此,在叶尔羌河灌区发展渠道防渗技术,降低渠道输水损失是缓解水资源紧缺的重要途径。通过发展高效节水工程及渠系防渗工程,减少渗漏,提高渠系水利用系数,将有效降低农业灌溉用水的损失,提高农业用水效率。但目前叶尔羌河流域渠系水利用系数还不到0.45,田间灌溉技术应用率较低,应用工程技术措施的节水潜力仍比较大。

参考文献:

- [1] 卢晓杰,张克斌,李瑞. 柴达木盆地香日德绿洲水资源优化配置研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):232-236.
- [2] 董永仲. 叶尔羌河流域水资源的合理开发和有效利用[J]. 水利建设与管理,2007,27(1):82-83.
- [3] Mohan S, Rangacharya N C. A modified method for drought identification[J]. Hydrological Sciences Journal,1991,36(1):11-21.
- [4] Dracup J A, Lee K S, Paulson E G. On the statistical characteristics of drought events[J]. Water Resour. Res.,1980,16(2):289-296.

- [5] Lampros V, Athanasios L, Nikos L. A Water Balance Derived Drought Index for Pinios River Basin, Greece[J]. Water Resource Manage,2011,25(4):1087-1101.
- [6] 韦博成,林金官,谢锋昌. 统计诊断[M]. 北京:高等教育出版社,2009:71-78.
- [7] 耿福明,薛联青,吴义锋. 基于净效益最大化的区域水资源优化配置[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):149-152.
- [8] 任政,郑旭荣,罗明. 石河子地区水资源时空合理配置模型研究[J]. 水土保持研究,2007,14(5):174-177.
- [9] 邸利,窦学成,成自勇,等. 甘肃省生态环境建设与水资源合理配置研究[J]. 水土保持研究,2007,14(2):176-178.
- [10] 黄金林,丁元芳,迟宝明. 岔路河流域水资源合理配置研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):235-238.
- [11] 刘长顺. 流域水资源合理配置与管理研究[D]. 北京:北京师范大学,2004.
- [12] 沈晓娟,徐向阳,刘翔. 三标度法在水资源配置方案优选上的应用[J]. 水电能源科学,2006,24(4):16-18.
- [13] Ojekunle Z O, Lin Z, Manzhou L I, et al. Application of WEAP Simulation Model to Hengshui City Water Planning[J]. 天津大学学报,2007,13(2):142-146.