

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.019

基于突变理论的吉林西部灌区地下水环境风险评价*

张端梅¹ 梁秀娟¹ 李钦伟² 姜雪¹ 翟天放^{1,3}

(1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130021; 2. 吉林省电力勘测设计院, 长春 130022;

3. 吉林省水利科学研究院, 长春 130022)

摘要: 地表水作为灌区的灌溉水源,灌溉回归水补给容易引起土壤的次生盐渍化。选取了自然状态、水环境、土壤环境、社会经济环境这4个评价要素和相应的17个评价因子,构建了吉林西部灌区地下水环境风险指标体系,采用突变理论对其进行了评价。分析结果表明,五家子灌区、大安灌区和松原灌区均属于轻险,风险值分别为0.9206、0.9303、0.9196。吉林西部灌区的地下水环境存在风险。

关键词: 灌区 地下水环境风险 突变理论 评价指标体系

中图分类号: P641; X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0095-06

Risk Assessment of Groundwater Environment for Irrigation District in Western Jilin Province Based on Catastrophe Theory

Zhang Duanmei¹ Liang Xiujuan¹ Li Qinwei² Jiang Xue¹ Zhai Tianfang^{1,3}

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China

2. Jilin Electric Power Survey and Design Institute, Changchun 130022, China

3. Water Resources Research Institute of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: As irrigation water for irrigation area, irrigation return water supply from surface water was prone to soil secondary salinization. Four evaluating elements and seventeen evaluating factors, including the natural condition, water environment, soil environment and socio-economic environment, were chosen to constitute the index system of groundwater environment for irrigation district in western Jilin province. The catastrophe theory was used in analyzing the groundwater environment. The analysis results show that Wujiazi irrigation district, Daan irrigation district and Songyuan irrigation district belong to the slight risks. The risk values were 0.9206, 0.9303 and 0.9196, respectively. Groundwater environment for irrigation district in western Jilin had some risk.

Key words: Irrigation district Groundwater environment risk Catastrophe theory Assessment index system

引言

环境风险评价兴起于20世纪70年代,随着地下水环境问题的日益突出,地下水环境风险评价受到越来越多学者的重视。付素蓉等提出了DRAMIC

模型并结合GIS技术建立了城市地下水污染敏感性指标体系^[1];武强等通过研究地质构造、地下油气赋存面积及储量、采油井及注水井分布、地下水开采量等对油气田区承压含水层地下水污染进行了脆弱性评价^[2];方樟等运用基于DRASTIC的模糊综合评

收稿日期:2012-08-16 修回日期:2012-09-05

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ08B09-01、2006BAB04A09-02、2007BAB28B04-05)、吉林省科技引导计划资助项目(20080543)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200801830044)

作者简介:张端梅,博士生,主要从事水资源与水环境研究,E-mail:zhangduanmei@163.com

通讯作者:梁秀娟,教授,博士生导师,主要从事水资源与水环境研究,E-mail:lax64@126.com

价方法,对松嫩平原潜水的脆弱性进行了评价^[3];范弢等应用 DRASTIC 指标体系并结合 GIS 技术,对云南省丽江古城所在的丽江盆地地下水脆弱性进行评价^[4];冶雪艳等构建了地下水开发风险评价体系,对黄河下游 13 个沿黄地区地下水开发风险进行评价^[5];李绍飞等利用地下水资源存储量、深浅层超采程度及其危害、水质状况构建了地下水评价指标体系,对海河流域的地下水环境风险进行评价^[6-7]。现有的针对灌区的地下水环境风险评价比较少。本文构建灌区的地下水环境风险评价体系,采用突变理论对吉林西部具有代表性的 3 个灌区进

行风险评价。

1 环境风险评价方法

1.1 突变理论

突变理论主要以拓扑学为工具,以结构稳定性理论为基础,专门研究非连续变化和突变现象。其特点是根据系统的势函数将系统的临界点分类,研究分类临界点附近非连续变化状态的特征,从而归纳出若干个初等突变模型,并以此为基础探索自然和社会中的突变现象^[8-11]。常用的突变模型见表 1。

表 1 常用突变模型的势函数及归一化公式

Tab.1 Potential functions and normalized formulas for frequent catastrophe model

突变模型	控制变量维数	势函数	归一化公式
折迭型突变	1	$f(x) = x^3 + ax$	$X_a = a^{1/2}$
尖点型突变	2	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}$
燕尾型突变	3	$f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	$X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4}$
蝴蝶型突变	4	$f(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$	$X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4}, X_d = d^{1/5}$

1.2 评价步骤

利用突变理论进行风险评价时,主要计算步骤如下:

(1) 构建评价指标体系,即按系统的内在作用机理,将系统分解为由若干评价指标组成的多层子系统。

(2) 对指标层进行原始数据规格化,即采用隶属度函数法将各指标原始数值转换为 $[0,1]$ 之间的无量纲数值。

(3) 利用突变系统的归一化公式和突变级数值取均值的“互补”、“小中取大”的“非互补”、“过阈互补”准则进行综合量化递归运算,求取目标层的综合评价价值。

(4) 根据风险状态等级参考表进行评价区的风险评价。

1.3 确定综合评价指标体系

地下水环境风险指标众多,各种影响因素互相作用。地表水作为灌区的灌溉水源,作物生长所需水分主要靠地表水,受灌溉水的回归补给,地下水位可能较浅,容易引起土壤的次生盐渍化,地下水的环境风险主要在于灌溉水的污染。根据对灌区影响较大的几种因素,建立适合灌区的地下水环境风险指标体系。具体见表 2。表中,地下水天然防护能力 C_1 包括潜水水位埋深、净补给量、含水层介质、土壤介质、地形坡度、包气带介质和含水层渗透系数。

地下水天然防护能力是综合性指标,可利用 DRASTIC 指标法计算。通过计算以上 7 项水文地

质因素评价指标的加权值,对地下水环境脆弱性进行分析。DRASTIC 地下水天然防护能力计算公式为

$$C_1 = 5D + 4R + 3A + 2S + T + 5I + 3C \quad (1)$$

式中 D ——含水层埋深

R ——含水层净补给量

A ——含水层介质类型

S ——土壤介质类型

T ——地形坡度 I ——包气带介质类型

C ——含水层渗透系数

C_1 表示不同评价区地下水的相对污染敏感性,其值越大,该评价区相对于其他评价区越容易被污染,则地下水的天然防护能力越弱。

干旱指数 C_2 指年蒸发量与年降水量的比值,是气候干旱程度的指标。干旱指数越大,则该评价区的干旱程度就越严重。

地下水补给模数 C_3 反映了评价区地下水系统的补给条件好坏和地下水资源的丰富程度。

地下水可采模数 C_4 主要是指浅层地下水可采资源,反映了评价区地下水系统的富水性及开发条件。

水位埋深 C_5 表示潜水的埋藏深度。从生态环境的角度分析,地下水位埋深应趋于一个理想的范围,如果地下水保持在该水位就会使生态环境向良性方向发展,否则就会向恶性方向发展。如果埋深过大,则地表易产生沙漠化,地下水埋深过小,则易产生沼泽化、盐渍化。

表 2 灌区地下水环境综合评价指标体系

Tab. 2 Comprehensive evaluation index system of groundwater environment for irrigation district

体系	指标	微险	轻险	中险	重险	特险	
自然状态 A_1	含水介质特征 B_1 地下水天然防护能力 C_1	< 120	120 ~ 130	130 ~ 140	140 ~ 150	150 ~ 450	
	气候特征 B_2 干旱指数 C_2	< 1	1 ~ 1.25	1.25 ~ 4	4 ~ 6	6 ~ 18	
	资源量特征 B_3 地下水补给模数 C_3 / $m^3 \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	$5.0 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$	$3.0 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$	$< 1.0 \times 10^5$	
	地下水可采模数 C_4 / $m^3 \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$	$5.0 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$	$3.0 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$	$< 1.0 \times 10^5$	
灌区地下水环境风险 A_2	地下水埋深 C_5 /m	3.0 ~ 5.0	5.0 ~ 6.0	6.0 ~ 8.0	8.0 ~ 10.0	10.0 ~ 30.0	
	地下水状况 B_4	潜水矿化度 C_6 / $g \cdot L^{-1}$	2.0 ~ 3.0	1.5 ~ 2.0	1.0 ~ 1.5	0.5 ~ 1.0	< 0.5
		地下水开采程度 C_7 /%	< 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	5 ~ 15
	灌溉水状况 B_5	盐度 C_8 / $mol \cdot L^{-1}$	< 40	40 ~ 70	70 ~ 100	100 ~ 120	120 ~ 150
		碱度 C_9 / $mol \cdot L^{-1}$	< 0.015	0.015 ~ 0.025	0.025 ~ 0.040	0.040 ~ 0.060	< 0.180
矿化度 C_{10} / $g \cdot L^{-1}$		< 0.004	0.004 ~ 0.008	0.008 ~ 0.012	0.012 ~ 0.016	0.016 ~ 0.048	
土壤环境 A_3	土壤含盐量 C_{11} /%	< 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	5 ~ 15	
	B_6	碱化度 C_{12} /%	< 0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.7	0.7 ~ 2.1
		土壤有机质含量 C_{13} /%	< 5	5 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 100
社会经济环境 A_4	渠系布置 C_{14}	1.0 ~ 4.5	0.8 ~ 1.0	0.7 ~ 0.8	0.6 ~ 0.7	< 0.6	
	B_7	很好	很好	好	一般	较差	差
		化肥施用强度 C_{15} / $kg \cdot hm^{-2}$	< 1500	1 500 ~ 2 000	2 000 ~ 2 500	2 500 ~ 3 000	3 000 ~ 9 000
		农药施用强度 C_{16} / $kg \cdot hm^{-2}$	< 30	30 ~ 50	50 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 300
	环境保护意识 C_{17}	很好	好	一般	较差	差	

潜水矿化度 C_6 指地下水中各种离子、分子、化合物的总量,是反映地下水中含盐量的一个重要指标。在易于产生盐渍化的地区,如果水位埋深小于返盐临界深度,潜水矿化度越大,土壤盐渍化就越重;反之就越轻。

地下水开采程度 C_7 指地下水开采量与地下水可开采量的百分数,表征地下水开采潜力大小。

盐度 C_8 指每升水中所含溶解性盐类物质的量。灌溉水质中 NaCl 和 Na_2SO_4 的含量影响灌区作物和土壤。

碱度 C_9 指每升水中能与强酸发生中和反应的物质总量。灌溉水质中 Na_2CO_3 和 $NaHCO_3$ 含量影响灌区作物和土壤。

矿化度 C_{10} 指单位体积灌溉水中所含各种离子、分子与化合物的总量。矿化度影响地下水资源质量和作物生长。

土壤含盐量 C_{11} 指土壤中盐分的质量占干土质量的百分比。土中盐分,特别是易溶盐的含量及类型对土的物理、水理、力学性质影响较大。

碱化度 C_{12} 指土壤胶体上吸附的交换性 Na^+ 占阳离子交换量的百分率。碱化度是盐碱土分类、利用和改良的重要指标。

土壤有机质含量 C_{13} 表示单位体积土壤中含有的各种动植物残体与微生物及其分解合成的有机物

的数量。一般以有机质占干土质量的百分数表示。土壤有机质含量是土壤肥力和土壤质量的重要指标。

渠系布置 C_{14} : 合理的渠系布置能够控制地下水位,防止土壤次生碱化。

化肥施用强度 C_{15} 、农药施用强度 C_{16} 分别表示每公顷耕地上化肥、农药施用程度,反映了农业生产活动对环境的潜在危险。

环境保护意识 C_{17} : 提高民众的环保意识,改善生态环境条件,对于灌区可持续发展有着重要的意义。

2 实例分析

2.1 研究区概况

五家子灌区、大安灌区和松原灌区均分布于吉林省西部低平原,属于干旱半干旱地区。五家子灌区多年平均降水量为 388.2 mm,多年平均蒸发量为 1 792.5 mm,属于冲积湖积低平原区,海拔高度在 135 ~ 140 m 之间,区内土壤主要有淡黑钙土、盐化淡黑钙土、草甸淡黑钙土和盐土。大安灌区多年平均降水量为 419.3 mm,多年平均蒸发量为 1 690.5 mm,属于冲积湖积低平原区,区内地势东北最高,高程达 149.3 m;西北略高,高程为 141 ~ 143 m;中央最低,高程为 129 ~ 131.5 m,区内土壤主

要有淡黑钙土、草甸土、盐土、碱土 4 种类型。松原灌区多年平均降水量近 424 mm, 年平均蒸发量为 1 671.2 mm, 属于冲积湖积低平原区, 区内地势较平坦, 微有起伏, 地面高程多在 135 ~ 145 m 之间, 区内土壤主要以冲积土、水稻土和草甸土为主。3 个灌区主要引用地表水灌溉。

2.2 指标数据选取及无量纲化

根据研究区水文地质条件、气象气候条件、土壤环境和社会经济环境等, 对五家子灌区、大安灌区和松原灌区基础资料的整理和分析, 得出评价区域地下水环境的原始指标值, 见表 3。

表 3 灌区地下水环境风险评价原始指标值及综合评价指标转化值

Tab.3 Original index value and integrated evaluation index transformation value of groundwater environment risk assessment for irrigation district

指标		灌区名称			分级标准				
		五家子灌区	大安灌区	松原灌区	微险	轻险	中险	重险	特险
C_1	原始指标值	144	127	128	120	130	140	150	450
	指标转化值	0.320 0	0.282 2	0.284 4	0.266 7	0.288 9	0.311 1	0.333 3	1.000 0
C_2	原始指标值	2.73	2.24	2.13	1.00	1.25	4.00	6.00	18.00
	指标转化值	0.151 7	0.124 4	0.118 3	0.055 6	0.069 4	0.222 2	0.333 3	1.000 0
C_3	原始指标值	8.24	11.35	9.40	50.00	30.00	20.00	10.00	0
	指标转化值	0.945 1	0.924 3	0.937 3	0.666 7	0.800 0	0.866 7	0.933 3	1.000 0
C_4	原始指标值	3.94	4.43	4.29	50.00	30.00	20.00	10.00	0
	指标转化值	0.973 7	0.970 5	0.971 4	0.666 7	0.800 0	0.866 7	0.933 3	1.000 0
C_5	原始指标值	3.3	4.0	4.2	5.0	6.0	8.0	10.0	30.0
	指标转化值	0.011 1	0.037 0	0.044 4	0.074 1	0.111 1	0.185 2	0.259 3	1.000 0
C_6	原始指标值	1.2	0.8	0.6	2.0	3.0	4.0	5.0	15.0
	指标转化值	0.080 0	0.053 3	0.040 0	0.133 3	0.200 0	0.266 7	0.333 3	1.000 0
C_7	原始指标值	22	40	32	40	70	100	120	150
	指标转化值	0.146 7	0.266 7	0.213 3	0.266 7	0.466 7	0.666 7	0.800 0	1.000 0
C_8	原始指标值	0.68	0.69	0.70	15.00	25.00	40.00	60.00	180.00
	指标转化值	0.003 8	0.003 8	0.003 9	0.083 3	0.138 9	0.222 2	0.333 3	1.000 0
C_9	原始指标值	0.47	0.46	0.48	4.00	8.00	12.00	16.00	48.00
	指标转化值	0.009 8	0.009 6	0.010 0	0.083 3	0.166 7	0.250 0	0.333 3	1.000 0
C_{10}	原始指标值	0.13	0.12	0.15	2.00	3.00	4.00	5.00	15.00
	指标转化值	0.008 7	0.008 0	0.010 0	0.133 3	0.200 0	0.266 7	0.333 3	1.000 0
C_{11}	原始指标值	0.55	0.69	0.33	0.10	0.30	0.50	0.70	2.10
	指标转化值	0.261 9	0.328 6	0.157 1	0.047 6	0.142 9	0.238 1	0.333 3	1.000 0
C_{12}	原始指标值	20.00	25.00	10.45	5.00	15.00	30.00	45.00	100.00
	指标转化值	0.200 0	0.250 0	0.104 5	0.050 0	0.150 0	0.300 0	0.450 0	1.000 0
C_{13}	原始指标值	4.35	2.22	4.10	1.00	0.80	0.70	0.60	0
	指标转化值	0.033 3	0.506 7	0.088 9	0.777 8	0.822 2	0.844 4	0.866 7	1.000 0
C_{14}	原始指标值	好	好	好	很好	好	一般	较差	差
	指标转化值	0.25	0.25	0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00
C_{15}	原始指标值	272	272	272	1 500	2 000	2 500	3 000	6 000
	指标转化值	0.045 3	0.045 3	0.045 3	0.250 0	0.333 3	0.416 7	0.500 0	1.000 0
C_{16}	原始指标值	1.89	1.89	1.89	30	50	80	100	200
	指标转化值	0.009 5	0.009 5	0.009 5	0.150 0	0.250 0	0.400 0	0.500 0	1.000 0
C_{17}	原始指标值	好	好	好	很好	好	一般	较差	差
	指标转化值	0.25	0.25	0.25	0	0.25	0.50	0.75	1.00

由于各指标值量纲不统一, 无法进行比较, 为了使各指标具有可比性, 必须对各指标进行处理。对于定性指标, 采用 0、0.25、0.50、0.75、1.00 分别表示很好、好、一般、较差、差; 对于定量指标, 采用隶属度函数法将各指标原始值和其他级标准值转换为

0 ~ 1 的突变级数。

对越大越优型指标有

$$Y = \begin{cases} 1 & (0 \leq X \leq a_1) \\ (a_2 - X) / (a_2 - a_1) & (a_1 < X < a_2) \\ 0 & (a_2 \leq X) \end{cases} \quad (2)$$

对越小越优型指标有

$$Y = \begin{cases} 1 & (X \geq a_2) \\ (X - a_1) / (a_2 - a_1) & (a_1 < X < a_2) \\ 0 & (0 \leq X \leq a_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 a_2, a_1 ——函数的上、下界

采用式(2)、(3)对灌区原始指标值和其他级标准值进行无量纲化处理。结果见表 3。

2.3 突变理论计算

根据表 3 综合指标转化值,按突变理论多准则

评价方法,采用各突变系统的归一公式逐步向上综合计算(图 1),得到地下水环境风险评价等级标准(表 4)和灌区的风险评价价值。计算出的风险值范围在 0~1 之间,1 表示风险最大状态,0 表示风险最小状态。

计算得五家子灌区、大安灌区和松原灌区的综合评价价值分别为 0.920 6、0.930 3 和 0.919 6。按照表 4 地下水环境风险状态等级参考表,五家子灌区、大安灌区和松原灌区均属于轻险。

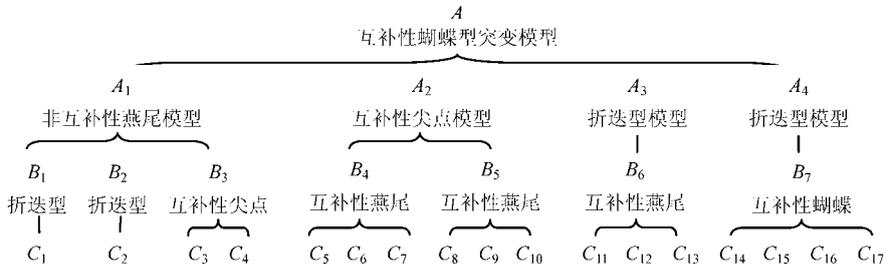


图 1 灌区地下水环境风险评价突变模型

Fig. 1 Catastrophe model of risk assessment of groundwater environment for irrigation district

表 4 突变模型评价法的综合评价价值与风险级别对应关系

Tab. 4 Corresponding relations between risk states and integrated evaluation values of catastrophe evaluation method

风险等级	微险	轻险	中险	重险	特险
风险值	<0.907 8	0.907 8 ~ 0.944 9	0.944 9 ~ 0.960 7	0.960 7 ~ 0.972 6	>0.972 6

2.4 结果分析

研究区气候干燥、降水量小、蒸发量大,地势较为平坦、地下水径流较缓,河流稀少,土壤不同程度盐碱化等因素都对灌区地下水环境产生影响,进一步分析研究区各方面的条件可知:①从气候条件上看,五家子灌区的降水量最小、不足 400 mm,而蒸发量最大;松原灌区的降水量最大,而蒸发量最小。②从地下水水质上看,地下水水质是反映灌区的生态环境指标之一。按照地下水水质标准,五家子灌区和大安灌区开采含水层均主要为 IV、V 类水;松原灌区开采含水层主要是 III 类水。松原灌区水质相对最好。③从土壤特性上看,根据灌区已有的调查资料,五家子灌区盐碱地约占灌区面积的 34%,大安灌区盐碱地约占灌区面积的 46%,松原灌区盐碱地约占灌区面积的 29%,3 个灌区均出现不同程度的盐碱化,松原灌区盐碱化面积最小,大安灌区的盐碱化面积最大。

五家子和松原灌区的自然状态指标值虽然处于特险,但水环境和土壤环境指标值均处于微险,社会经济环境指标值处于轻险,整体上看,五家子和松原灌区的地下水环境风险处于轻险状态是可能的;大安灌区的自然状态指标值虽然处于特险,但水环境

指标值处于微险,土壤环境指标处于中险,社会经济环境指标值处于轻险,大安灌区的地下水环境风险处于轻险状态也是可能的。根据灌区的调查情况和已有的一些研究成果^[12],可以看出吉林西部灌区的地下水环境存在风险,突变理论的计算结果与灌区实际情况基本一致。

3 结论

(1) 突变模型评价法用于灌区的地下水环境风险只需考虑评价指标的相对重要性,无需计算各指标权重,可以减少权值确定的主观性。

(2) 建立了灌区地下水环境风险指标体系,并以吉林西部低平原 3 个代表性灌区为例,应用突变理论计算灌区的地下水环境风险。计算得出,五家子灌区、大安灌区和松原灌区均属于轻险。风险值较大的是大安灌区(0.930 3);其次是五家子灌区(0.920 6);风险最小的是松原灌区(0.919 6)。计算结果与实际情况相符。说明采用突变理论计算灌区的地下水环境风险评价是合理可行的,所建立的指标体系对于其他灌区地下水环境风险评价有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- 1 付素蓉,王焰新,蔡鹤生,等.城市地下水污染敏感性分析[J].地球科学—中国地质大学学报,2000,25(5):482~486.
Fu Surong, Wang Yanxin, Cai Hesheng, et al. Vulnerability to contamination of groundwater in urban begions [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(5): 482~486. (in Chinese)
- 2 武强,王志强,赵增敏,等.油气田区承压含水层地下水污染机理及其脆弱性评价[J].水利学报,2006,37(7):851~857.
Wu Qiang, Wang Zhiqiang, Zhao Zengmin, et al. Pollution mechanism and vulnerability assessment of confined aquifer groundwater in oil field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 851~857. (in Chinese)
- 3 方樟,肖长来,梁秀娟,等.松嫩平原地下水脆弱性模糊综合评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(3):546~550.
Fang Zhang, Xiao Changlai, Liang Xiujuan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the groundwater vulnerability in Songnen Plain [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 546~550. (in Chinese)
- 4 范弢,杨世瑜.云南丽江盆地地下水脆弱性评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(3):551~556.
Fan Tao, Yang Shiyu. Groundwater vulnerability assessment in Lijiang Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 551~556. (in Chinese)
- 5 冶雪艳,赵坤,杜新强,等.突变理论在地下水开发风险评价中的应用研究[J].人民黄河,2007,29(10):47~50.
Ye Xueyan, Zhao Kun, Du Xinqiang, et al. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment [J]. Yellow River, 2007, 29(10): 47~50. (in Chinese)
- 6 李绍飞,冯平,林超.地下水环境评价指标体系得探讨与应用[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):38~43.
Li Shaofei, Feng Ping, Lin Chao. Investigation on the index system of groundwater environment risk and its application [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(1): 38~43. (in Chinese)
- 7 李绍飞,孙书洪,王向余.突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的作用[J].水利学报,2007,38(11):1312~1317.
Li Shaofei, Sun Shuhong, Wang Xiangyu. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment for river basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1312~1317. (in Chinese)
- 8 Poston T, Lan Stewart. Catastrophe theory and application [M]. Lord: Pitman, 1978.
- 9 凌复华.突变理论及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
- 10 周绍江.突变理论在环境影响评价中的应用[J].人民长江,2003,34(2):52~54.
Zhou Shaojiang. Application of catastrophe theory in environment impact evaluation [J]. Yangtze River, 2003, 34(2): 52~54. (in Chinese)
- 11 施玉群,刘亚莲,何金平.关于突变评价法几个问题的进一步研究[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(4):132~136.
Shi Yuqun, Liu Yalian, He Jinping. Further study on some questions of catastrophe evaluation method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(4): 132~136. (in Chinese)
- 12 肖长来,贾涛,梁秀娟,等.五家子灌区引水对镇赉县低平原的环境影响[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(2):341~345.
Xiao Changlai, Jia Tao, Liang Xiujuan, et al. Environmental impact of Wujiazhi irrigation on the low plain in Zhenlai County [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(2): 341~345. (in Chinese)
- 13 王兵,刘国彬,张光辉,等.黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J].农业机械学报,2012,43(7):28~35.
Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Ecological and environmental assessment on the effects of water and soil loss comprehensive harness in meso-scale watershed in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 28~35. (in Chinese)

(上接第 105 页)

- 10 陈小华,朱洪光.农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J].农业工程学报,2007,23(3):279~283.
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 279~283. (in Chinese)
- 11 Nizami A S, Korres N E, Murphy J D. Review of the integrated process for the production of grass biomethane [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(22): 8496~508.
- 12 王晓娇,李轶冰,杨改河,等.牛粪、鸡粪和稻草混合的沼气发酵特性与工艺优化[J].农业机械学报,2010,41(3):104~108.
Wang Xiaojiao, Li Yibing, Yang Gaihe, et al. Fermentation and process optimization of mixed cow dung, chicken manure and rice straw for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 104~108. (in Chinese)
- 13 贺延龄.废水的厌氧生物处理[M].北京:中国轻工业出版社,1998:536~538.
- 14 Hanaki K, Hirunmasuwan S, Matsuo T. Protection of methanogenic bacteria from low pH and toxic materials by immobilization using polyvinyl alcohol [J]. Water Research, 1994, 28(4): 877~885.
- 15 Callaghana F J, Wasea D A J, Thayanithya K, et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 22(1): 71~77.