

运用数理统计和模糊数学评价秦皇岛 洋戴河平原的海水入侵程度

章 斌^{1,2}, 宋献方¹, 韩冬梅¹, 郭占荣³, 肖国强⁴, 杨吉龙⁴

(1.中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2.环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 3.厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005;
4.天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 运用数理统计方法获取秦皇岛洋戴河平原地下潜水和海水的水化学统计特征, 据此优选出4项海水入侵评判指标, 建立各评判指标的背景值及指标等级体系, 并将模糊数学综合评价法和地理信息系统结合起来评价研究区潜水含水层的海水入侵程度。研究结果表明: 氯离子 Cl^- 、电导率EC、溶解总固体TDS和潜在盐度是指示本区潜水含水层海水入侵程度的最佳指标, 其判别海水入侵发生的下限值分别为250 mg/L、1 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、700 mg/L和8.5 meq/L; 洋戴河平原潜水含水层的海水入侵程度总体上为中等水平, 洋、戴河间浦河一带的潜水含水层海水入侵程度最为强烈。

关 键 词: 秦皇岛; 洋戴河平原; 数理统计; 模糊数学; 海水入侵程度

中图分类号: X824 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)03-0342-07

滨海地区海水入侵程度的空间分布研究有助于人们认识海水入侵的形成机理, 是生产生活用水的重要参考依据^[1,2]。目前, 海水入侵程度评价方法主要有单指标法、多指标综合评判法、模糊数集理论法、人工神经网络分析法、灰色系统理论法等, 但迄今为止, 还没有那一种水质评价模型被广泛地接受或采用^[3,4]。模糊综合评价法是以模糊数学为基础, 应用模糊关系合成的原理, 将一些边界不清、不易量化的因素量化, 从而进行综合评价的一种方法^[3,5-11]。自然界各水体的水质是一个综合多种指标和类别的模糊概念, 模糊数学综合评价法可有效解决模糊边界的划定和评价误差的控制问题^[12,13], 尤其是已经发生海水入侵的滨海地区, 由于滨海含水层存在咸淡水过渡带, 即存在向海方向由淡逐渐变咸的水质渐变带, 其海水入侵的界限和程度具有非确定性和模糊性^[14], 适合运用模糊综合评价方法进行评价和分析。

将模糊综合评价法运用于海水入侵程度的评价在国外鲜见有文献报道, 1998年以来, 国内赵建

等学者陆续开展一些研究^[1,10,15-18]。由于在不同的海水入侵区, 在特定的地下水化学形成作用控制下会形成截然不同的地下水化学特征, 因此, 海水入侵识别指标的选择和等级划分, 应结合研究区具体地下水化学特征进行。本文以秦皇岛洋戴河平原海水入侵区为例, 将多种数理统计方法、模糊数学方法和地理信息系统结合, 尝试建立一套系统、有效的海水入侵程度评价思路和方法。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

秦皇岛位于河北省东北部, 渤海西侧, $39^{\circ}24' \sim 40^{\circ}37' \text{N}$, $118^{\circ}33' \sim 119^{\circ}51' \text{E}$, 处于环渤海经济圈的中心地带。研究区位于洋戴河平原, 主要分布于秦皇岛北戴河区以西, 是秦皇岛境内分布较为广阔的第四纪冲洪积平原。研究区属于暖温带半湿润大陆性季风气候区, 春季少雨干燥, 夏季湿润多雨, 秋季晴朗干爽, 冬季寒冷少雪。区内地貌表现为西北东三面环山, 中为平原, 南部临海的特征, 地形地势

收稿日期: 2012-06-25; 修订日期: 2012-08-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428805)资助。

作者简介: 章 斌(1985-), 男, 福建宁化人, 助理工程师, 硕士, 主要从事水文地球化学方面的研究。E-mail: zhangbinem@gmail.com

通讯作者: 宋献方, 研究员。E-mail: songxf@igsnrr.ac.cn

相应表现为西部陡峻而高,东北平缓且低,中部平原略向海倾斜的特征。区内水系以洋河和戴河主,两河均发源于燕山山脉,贯穿洋戴河平原,于平原南部入海。研究区受区域多期地质构造运动的控制,主要发育一组NE走向昌黎断裂、两组NW走向隐伏断裂,区内地层出露较为简单,平原地区广泛沉积第四纪冲洪积松散堆积物,厚约5~80 m,山前和沟谷地带多堆积洪坡积物,周围群山出露侏罗系凝灰岩及安山岩、太古宇片麻岩、中生界花岗岩侵入岩、侏罗系混合花岗岩、新近系霓辉钠长混合岩等。

1.2 数据来源

为获取洋戴河平原地下水的水化学空间分布特征,在研究区地下水流动系统的整体流向上,于2010年8月,实施网络式系统采样,合计采集不同深度的第四纪松散岩类孔隙潜水水样23组、海水样1组。采样现场采用Sensorteknik Meinsberg TM39酸度计测定原水的酸碱度(pH)和水温(T),用WTW Vario Cond手持式电导率测试仪、WTW Oxi3310便携式溶氧仪、Horiba D-25便携式氧化还原电位计分别测定原水电导率(EC)、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)。室内水化学分析在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心完成,金属元素(包括主要阳离子)采用电感耦合等离子体-发射光谱仪(Perkin-Elmer Optima 5300DV ICP-OES)分析,主要阴离子采用离子色谱仪(Shimadzu LC-10AD)测定,重碳酸根于采样当天采用稀硫酸-甲基橙滴定法测定。氢氧稳定同位素组成测定在中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室完成,采用液态水同位素分析仪(Los Gatos Research Inc DLT-100)分析,测定结果以相对于维也纳标准平均海水(Vienna Standard Mean Oceanic Water, VSMOW)的千分偏差形式表示,测定精度分别为 $\pm 0.6\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。

2 海水入侵指标等级体系的建立

2.1 海水入侵初步评判指标的筛选

海水入侵评判指标的选择是海水入侵程度评价首先要解决的问题。作为海水入侵的初步评判指标至少应满足两个基本条件:①海水入侵评判指标在地下淡水和海水中的差异十分显著;②从地下淡水到地下微咸水、咸水,最后到海水,海水入侵评判指标呈增大或减小的渐变式变化,能够指示海水入侵程度的差异。为初步挑选出合适的

海水入侵评判指标。首先,我们测定及计算研究区23组地下潜水水样的50项指标值,包括阴阳离子组成(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^-)、氢氧同位素组成(δD 、 $\delta^{18}O$)、特征离子比(K/Cl 、 Na/Cl 、 Ca/Cl 、 Mg/Cl 、 $(Na+K)/Cl$ 、 $(Ca+Mg)/Cl$ 、 $(Na+K)/(Ca+Mg)$ 、 $Ca/(HCO_3+SO_4)$ 、 Ca/SO_4 、 Ca/Mg 、 Ca/Sr 、 Cl/HCO_3)、水质综合指标[硬度、钠吸附比SAR、钠百分率SSP、溶解总固体TDS(公式表示为 T_{TDS})、潜在盐度)、物理化学参数(电导率EC、酸碱度pH、温度T、氧化还原电位ORP、溶解氧DO)以及某些元素含量(Al、B、Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Li、Mn、Mo、Ni、P、Pb、Se、Sr、V、Zn)。其次,对以上50项指标值按淡水($T_{TDS}<1\text{ g/L}$, $N=11$)、微咸水($1\text{ g/L}\leq T_{TDS}<10\text{ g/L}$, $N=12$)和海水($T_{TDS}=27.6\text{ g/L}$, $N=1$)三组分别统计平均值,初步获取这些水化学信息在不同矿化度水体中的变化规律,并依据前文提出的两个基本条件初步筛选出24项指标(表1)。

表1 海水入侵的初步评判指标

Table 1 Preliminary evaluation indicators for seawater intrusion degree

指标类型	海水入侵的初步评判指标
物理化学参数	EC、pH、ORP
水化学成分	K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-
同位素	D、 ^{18}O
微量元素	B、Li、Sr
特征离子比	Ca/Cl 、 Mg/Cl 、 $(Ca+Mg)/Cl$ 、 Ca/Sr 、 Cl/HCO_3
水化学指标	硬度、SAR、TDS、潜在盐度

2.2 海水入侵判别指标的选择

在海水入侵评价中,过少的指标容易造成结果误判,引入无效指标会降低海水入侵识别的效率和干扰正确评价。地下水水化学组分中, Cl^- 不被植物摄取及土粒表面吸附,其氯盐溶解度大、不易沉淀析出,是地下水中最稳定、最保守的离子^[19],同时也是指示海水入侵的有效指标^[20]。沈照理等^[21]认为溶质间的相关性可用于揭示地下水盐分的来源和成因。对于整个海水入侵区而言,地下水中的 Cl^- 主要来源于海水,人为污染或其他来源是次要的,因此,某个指标与 Cl^- 的相关程度越高则表明这个指标与 Cl^- 的来源和成因越为一致,就越能够可靠地指示海水入侵的程度。现对本区地下水($N=23$)作各初步判别指标与 Cl^- 的Pearson相关性分析(表2)。

据表2可知,对于本区地下潜水,与 Cl^- 相关性较好(Pearson相关性 ≥ 0.8)的指标有EC、TDS和

表2 海水入侵初步评判指标与Cl⁻的Pearson相关系数和显著性(双侧)

Table 2 The Pearson correlation coefficient and related significant level (two-sided test) between preliminary evaluation indicators and chloride concentration

统计量	EC(μs/cm)	pH	ORP(mv)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Pearson 相关系数	0.890**	0.06	0.17	0.32	0.694**	0.646**	0.676**	0.4
显著性(双侧)	0	0.8	0.44	0.13	0	0	0	0.06
统计量	NO ₃ ⁻ (mg/L)	δD(‰)	δ ¹⁸ O(‰)	B(mg/L)	Li(mg/L)	Sr(mg/L)	Ca/Cl	Mg/Cl
Pearson 相关系数	0.420*	0.501*	0.462*	-0.06	0.690**	0.674**	-0.458*	-0.17
显著性(双侧)	0.05	0.01	0.03	0.78	0	0	0.03	0.44
统计量	(Ca+Mg)/Cl	Cl/HCO ₃	Ca/Sr	TDS(mg/L)	硬度(mg/L)	SAR	潜在盐度(meq/L)	
Pearson 相关系数	-0.447*	0.467*	-0.16	0.888**	0.690**	0.39	0.983**	
显著性(双侧)	0.03	0.02	0.45	0	0	0.06	0	

* 0.05 水平上(双侧)显著相关; ** 0.01 水平上(双侧)显著相关

潜在盐度,与Cl⁻相关性中等(0.5≤Pearson 相关性<0.8)的指标有Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、δD、Li、Sr 和硬度,与Cl⁻相关性较差(Pearson 相关性<0.5)的指标有pH、ORP、K⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻、δ¹⁸O、B、Ca/Cl、Mg/Cl、(Ca+Mg)/Cl、Cl/HCO₃、Ca/Sr 和 SAR。EC、TDS 和潜在盐度均是反映水体总含盐量的指标,其与Cl⁻相关性较好,表明随着高含盐量海水混合比率的增加,地下混合水的总含盐量也随之升高,而其他大部分评判指标与Cl⁻的相关性相对较差,则表明在过渡带不仅存在咸淡水的机械混合,还存在阳离子交替吸附等复杂的水文地球化学作用和其他水体的混合影响。本区地下水中的EC、TDS 和潜在盐度与Cl⁻的相关性最佳,在此,我们选择Cl⁻、EC、TDS 和潜在盐度作为本区海水入侵的评判指标。

2.3 海水入侵区地下水背景值的确定

地下水化学成分的背景值是指未受人为污染的情况下,地下水中各种化学成分的天然特征值^[22]。研究区内的地下潜水或多或少都受到人为的污染或其他水体的混合影响,因此,本文提出的海水入侵区地下水背景值具有相对性,是指受到一定程度人为污染或其他水体混合,但未明显受到海水入侵影响的地下水化学指标范围值。此外,依据有限的海水入侵区地下水背景水样,只能给出地下水背景值的估计值。

确定海水入侵区地下水背景值首先要判定地下水背景水样。判别分析是根据某一研究对象各种特征值判别其类型归属问题的一种分析方法^[23]。由于地下水背景水样与已经受到海水浸染的地下水样具有明显不同的水化学统计特征,如果能够确定本区明显未受海水入侵侵染和已经受到海水入侵侵染的水样,那么,运用判别分析方法,以入

侵和未入侵水样作为训练样品,则可识别两类水样的水化学统计特征以构建分类函数,从而初步判定出未受海水入侵侵染的地下水背景水样,减小人为判定的误差。根据研究区具体的水文地质条件和地下水样的水化学特征,可挑选出海水入侵判别分析的训练样本(表3)。

利用表3所示的训练样本可求解得到Fisher线性判别式函数:

$$S_A=0.023\times C_{Cl}-0.007\times E_{EC}+0.020\times T_{TDS}-0.857\times P_{PS}-1.895$$
(1)

$$S_B=0.005\times C_{Cl}-0.028\times E_{EC}+0.055\times T_{TDS}+1.550\times P_{PS}-22.606$$
(2)

式中,C_{Cl}、E_{EC}、T_{TDS}、P_{PS}分别为水样氯离子含量、电导率、总溶解固体和潜在盐度,S_A、S_B分别为A类(未入侵)和B类(已入侵)地下水样海水入侵评判分。

将待判定水样的海水入侵判别指标值代入式(1)和式(2)中,计算各水样的A类、B类分类得分S_A、S_B,计算出的哪类分值大,则归属于哪类(表4)。

背景水样的判别结果显示(表4),训练样本的判别完全正确,说明判定结果是可靠的,现将以上判别结果作为海水入侵区地下水背景值的代表水样。由于样本容量较小(N=8),现针对小样本背景水样的指标Cl⁻、EC、TDS 和潜在盐度值作Shapiro-Wilk 正态检验,P 值分别为0.733、0.982、0.999、0.451,均大于0.05,符从正态分布,现以各成分含量的算术平均值加减一倍标准偏差的值范围来表示地下水背景值(表5)。

2.4 海水入侵指标等级的划分

海水入侵指标等级是定量评价海水入侵程度的依据。实际上,海水入侵程度I级的上限值应当反映地下水背景值的上限,而海水入侵程度II~IV

表3 海水入侵判别分析训练样本

Table 3 Training samples for seawater intrusion degree discriminant analysis

水样分类	水样编号	地下水化学类型	Cl ⁻ (mg/L)	EC(μs/cm)	TDS(mg/L)	潜在盐度(meq/L)	分类编号
未入侵	G2	Cl·HCO ₃ -Ca	58.51	444	235.23	2.08	A
	G3	Cl-Ca	177.1	1014	563.53	6.19	A
	G4	HCO ₃ -Cl-Ca	135.4	934	507.272	4.49	A
	G11	HCO ₃ -Cl-Ca	74.32	624	369.19	2.55	A
已入侵	G12	Cl-Ca·Na	443.5	1563	896.15	13.48	B
	G16	Cl-Na·Ca	463.5	2290	1342.96	15.99	B
	G17	Cl-Na·Ca	769	4060	2048.02	24.49	B
	G19	Cl-Na·Ca	655.6	3490	2013.46	22.16	B
	G20	Cl-Na·Mg·Ca	675.4	2490	1488.48	21.88	B
	G21	Cl·SO ₄ -Na·Mg·Ca	540.1	2850	1644.17	19.80	B
	G22	Cl-Na·Mg	856.9	3230	1690.37	26.24	B
	G23	SO ₄ -Cl-Na	307.8	2750	1693.94	15.77	B

表4 地下水判别分析结果(A类,未入侵)

Table 4 Discriminant analysis results of groundwater (classification A, water samples without seawater intrusion)

水样编号	地下水化学类型	Cl ⁻ (mg/L)	EC(μs/cm)	TDS(mg/L)	潜在盐度(meq/L)	判别结果
G1	Cl·NO ₃ -Ca·Mg·Na	248.00	1438	763.33	8.66	A
G2*	Cl·HCO ₃ ,NO ₃ -Ca·Na	58.51	444	235.23	2.08	A
G3*	Cl·NO ₃ ,SO ₄ -Ca·Mg	177.10	1014	563.53	6.19	A
G4*	HCO ₃ -Cl-Ca	135.40	934	507.27	4.49	A
G10	Cl·HCO ₃ -Na	277.70	1152	663.52	8.51	A
G11*	HCO ₃ -Cl-Ca	74.32	624	369.19	2.55	A
G13	Cl·HCO ₃ -Ca·Na·Mg	118.00	741	411.98	4.10	A
G18	Cl·SO ₄ -Na·Ca·Mg	218.40	939	569.81	7.28	A

* 训练样本

表5 海水入侵区地下水背景值计算结果

Table 5 The calculation results of groundwater background values in seawater intrusion region

统计量	Cl ⁻ (mg/L)	EC(μs/cm)	TDS(mg/L)	潜在盐度(meq/L)
平均值	163.43	911	510.48	5.48
标准偏差	80.37	311	168.66	2.57
背景值	83.06~243.8	600~1222	341.82~679.14	2.92~8.05

级的划分,则应反映海水入侵区地下水质的整体分布情况和海水入侵危害程度的大小,并且各指标间的等级划分应具有对应性。目前,海水入侵各指标等级的划分还没有统一的标准,以Cl⁻为例,赵建^[15, 24]、涂向阳^[14]、王丹^[1]等将Cl⁻划分为<250、250~600、600~1 500、>1 500 mg/L这4个海水的入侵指标等级(I~IV),罗文艺^[17]、韩冬梅^[22]等则将Cl⁻划分为<100、100~250、250~1 000、>1 000 mg/L这4个海水入侵指标等级(I~IV),并据此划分出了未入侵、轻微入侵、中度入侵、严重入侵4个海水入侵等级和淡水、影响淡水、微咸水和咸水4个水质等级。参考本区地下水Cl⁻浓度的背景值,以250 mg/

L作为海水入侵程度I级的上限值,综合考虑以上两种划分方案以及本区地下水Cl⁻浓度的频数分布,以地下水Cl⁻平均浓度值(463 mg/L)的接近值500 mg/L作为海水入侵程度II级的上限值,以1 000 mg/L作为海水入侵程度III级的上限值,由此,将Cl⁻划分为<250、250~500、500~1 000、>1 000 mg/L这4个指标等级(I~IV)。根据EC、TDS、潜在盐度与氯离子的线性关系,基于Cl⁻海水入侵程度II~IV级的界限值,可划分EC、TDS、潜在盐度相应入侵程度等级的界限值和代表值(表6),其中,海水入侵程度I级的下限值参考本区地下水背景值的上限值,代表值取相邻两级临界值的平均值。

表6 海水入侵指标等级划分

Table 6 Indicator values of different seawater intrusion degrees

指标	I		II		III		IV	
	无或轻度入侵		轻度入侵		中度入侵		严重入侵	
	淡水或影响淡水		影响淡水或微咸水		微咸水		微咸水或咸水	
	值范围	代表值	值范围	代表值	值范围	代表值	值范围	代表值
Cl ⁻ (mg/L)	<250	125	250~500	375	500~1000	750	>1000	1500
EC(μs/cm)	<1250	625	1250~2300	1775	2300~4200	3250	>4200	6075
TDS(mg/L)	<700	350	700~1300	1000	1300~2300	1800	>2300	3275
潜在盐度(meq/L)	<8.5	4.25	8.5~16.5	12.5	16.5~32	24.25	>32	47.25

3 海水入侵程度的评价

3.1 模糊数学综合评价的步骤

- 1) 给出评判指标集 $U=\{C_{Cl^-}, E_{EC}, T_{TDS}, \text{潜在盐度}\}$ 。
- 2) 给出评判指标等级集 $V=\{I, II, III, IV\}$ 。
- 3) 根据评判指标集 U 和隶属度函数 $\mu(x)$ (降半梯形分布, 图1), 建立模糊评判矩阵 R 。

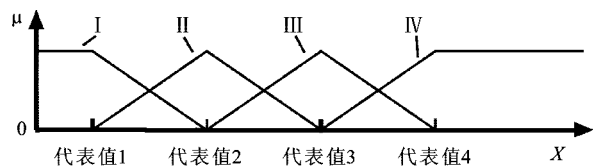


图1 降半梯形分布
Fig.1 Lower semi-trapezoid distribution diagram

$$\mu:U\rightarrow R\in V \tag{3}$$
$$R=(r_{ij})_{n\times m}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m) \tag{4}$$

- 4) 确定指标权重模糊矩阵 A 。指标权重反映各指标对各个海水入侵等级的贡献程度大小,其值大小可由各指标值与各入侵等级(I~IV)代表值平均值的比值归一化后得到。
- 5) 求解模糊综合评价矩阵 $B, B=AR$,模糊算子采用 (\cdot, \vee) 取大乘积法,评价结果 B 须经过归一化处理。
- 6) 根据模糊综合评价结果集 B ,哪一列值最大则归属于那一级。潘峰^[10]、熊德国^[16]等提出了模糊综合评价的改进方法,可将评价结果量化。具体方法是,将评价集 B 中的各级隶属度 b_j 与相应评价等级的加权之和[式(5)]作为海水入侵程度评价结果的量化值 H, H 值与海水入侵等级1~4(整数)哪个更为接近,则归属哪一级。

$$H=\sum_{i=1}^4 ib_j \tag{5}$$

式中, H 为海水入侵评价结果的量化值, b_j 为评价集 B 中的各级隶属度, i 为评价等级,因为评价结果集 B 已经归一化处理,故 $1\leq H\leq 4$ 。

3.2 海水入侵程度评价结果

根据表7(见下页)显示,上文两种海水入侵等级划分方法的划分结果完全一致。评判结果中,23个水样,有6个属于I级(26%),7个属于II级(30%),10个属于III级(44%),海水入侵程度II级和III级水占到74%,表明本区潜水含水层的海水入侵程度总体上为中等水平。根据研究区地下潜水的海水入侵程度综合评价量化指标 H ,借助ArcGIS空间插值工具(IDW插值算法),可绘制图2。由于海水是以楔形体的形式入侵到含水层当中的,同一地点不同深度的海水入侵程度必然不同,因此,该海水入侵程度的平面分布图仅作参考意义。图2明显看到,总体上,洋戴、河间浦河一带的潜水含水层海水入侵程度最强烈。值得注意的是,高庄东南部的咸水带被判别为海水入侵程度较高的地区,说明该区可能和海水的混入有一定的关系,但由于距离海岸较远,实际上并非海水入侵所致,具体形成原因将另文探讨。

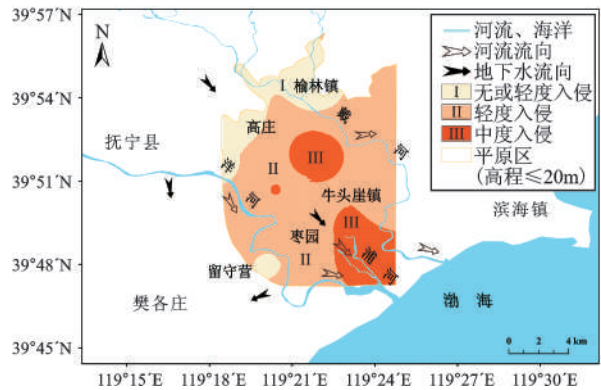


图2 海水入侵程度的平面分布
Fig.2 The distribution map of seawater intrusion degree

表7 海水入侵程度评价结果

Table 7 Evaluation results of seawater intrusion degree

水样编号	I	II	III	IV	H 值	Cl ⁻ (mg/L)	EC(μ S/cm)	TDS(mg/L)	潜在盐度(meq/L)	评价结果
G1	0.397	0.603	0.000	0.000	1.603	248	1438	763.3	8.66	II
G2	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	58.51	444	235.2	2.08	I
G3	0.715	0.285	0.000	0.000	1.285	177.1	1014	563.5	6.19	I
G4	0.830	0.170	0.000	0.000	1.170	135.4	934	507.3	4.49	I
G5	0.000	0.052	0.739	0.208	3.156	646.6	4400	2216.0	24.87	III
G6	0.000	0.000	0.530	0.470	3.470	1168	4600	2292.2	35.54	III
G7	0.000	0.468	0.532	0.000	2.532	621.2	2380	1360.1	19.48	III
G8	0.147	0.853	0.000	0.000	1.853	344.6	1500	908.3	11.76	II
G9	0.000	0.005	0.864	0.132	3.127	906.1	3220	1953.7	28.66	III
G10	0.483	0.517	0.000	0.000	1.517	277.7	1152	663.5	8.51	II
G11	0.990	0.010	0.000	0.000	1.010	74.32	624	369.2	2.55	I
G12	0.080	0.848	0.072	0.000	1.992	443.5	1563	896.2	13.48	II
G13	0.942	0.058	0.000	0.000	1.058	118	741	412.0	4.10	I
G14	0.081	0.901	0.018	0.000	1.937	401.3	1513	930.1	12.47	II
G15	0.008	0.786	0.206	0.000	2.198	541.9	1733	1028.1	15.63	II
G16	0.000	0.667	0.333	0.000	2.333	463.5	2290	1343.0	15.99	II
G17	0.000	0.000	0.867	0.133	3.133	769	4060	2048.0	24.49	III
G18	0.662	0.338	0.000	0.000	1.338	218.4	939	569.8	7.28	I
G19	0.000	0.095	0.841	0.064	2.969	655.6	3490	2013.5	22.16	III
G20	0.000	0.318	0.682	0.000	2.682	675.4	2490	1488.5	21.88	III
G21	0.000	0.338	0.662	0.000	2.662	540.1	2850	1644.2	19.80	III
G22	0.000	0.035	0.904	0.061	3.026	856.9	3230	1690.4	26.24	III
G23	0.038	0.412	0.549	0.000	2.511	307.8	2750	1693.9	15.77	III

4 结 论

将多种数理统计、模糊数学方法和地理信息系统结合起来评价海水入侵程度,提供了一套系统、有效的海水入侵程度评价思路和方法。在秦皇岛洋戴河平原海水入侵区,地下水氯离子Cl⁻、电导率EC、溶解总固体TDS和潜在盐度是指示本区潜水含水层海水入侵程度的最佳指标,其判别海水入侵发生的下限值分别为250 mg/L、1 250 μ S/cm、700 mg/L和8.5 meq/L。洋戴河平原潜水含水层的海水入侵程度总体为中等水平,洋、戴河间浦河一带潜水含水层是海水入侵程度最强烈地区。

致 谢: 赵长荣、杨丽虎、龙西亭、吕航参与野外样品的采集工作,张宏志和曹磊为室内水化学和同位素测定工作给予指导与帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 王 丹,陶志刚,李昌存.唐山沿海海水入侵地下水水质评价[J].海洋地质动态,2006,22(6):10~14.
- [2] Dahiya S,Singh B,Gaur S,et al.Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation[J].Journal of Hazardous Mate-

rials,2007,147:938-946.

- [3] 李如忠.水质评价理论模式研究进展及趋势分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(4):369~373.
- [4] Liu X B,Li G F,Liu Z G,et al.Water Pollution Characteristics and Assessment of Lower Reaches in Haihe River Basin[J].Procedia Environmental Sciences,2010,2:199-206.
- [5] Zadeh L A.Fuzzy sets[J].Information and Control,1965,8(3):338-353.
- [6] Guleda O E,Ibrahim D,Halil H,et al.Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation[J].Atmospheric Environment,2004,38(23):3809-3815.
- [7] Mujumdar P P,Sashikumar K.A fuzzy risk approach for seasonal water quality management of river water[J].Water Resource Research,2002,38(1):(5-1)-(5-9).
- [8] 王计平,邹欣庆,左 平.基于社区居民调查的海岸带湿地环境质量评价——以海南东寨港红树林自然保护区为例[J].地理科学,2007,27(2):249~255.
- [9] 侯英姿,陈晓玲,王方雄.基于GIS的水环境价值模糊综合评价研究[J].地理科学,2008,28(1):89~93.
- [10] 潘 峰,付 强,梁 川.模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J].环境工程,2002,20(2):58~61.
- [11] 左 伟,王 桥,王文杰,等.区域生态安全综合评价模型分析[J].地理科学,2005,25(2):209~214.
- [12] Içaga Y.Fuzzy evaluation of water quality classification[J].Eco-

- logical Indicators, 2007, **7**: 710-718.
- [13] Liu L, Zhou J H, An X L, et al. Using fuzzy theory and information entropy for water quality assessment in Three Gorges region, China[J]. Expert Systems with Applications, 2010, **37**: 2517-2521.
- [14] 涂向阳, 高学平. 模糊数学在海水入侵地下水水质评价中的应用[J]. 水利学报, 2003, (8): 64-69.
- [15] 赵 建. 海水入侵水化学指标及侵染程度评价研究[J]. 地理科学, 1998, **18**(1): 17-19.
- [16] 熊德国, 鲜学福. 模糊综合评价方法的改进[J]. 重庆大学学报, 2003, **26**(6): 93-95.
- [17] 罗文艺, 靳孟贵, 刘延锋, 等. 深圳南山区海水入侵综合研究[J]. 海洋地质动态, 2007, **23**(9): 8-12.
- [18] 苏 乔, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾南岸海水入侵现状评价[J]. 海岸工程, 2009, **28**(1): 9-14.
- [19] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [20] 吴 凯. 环渤海区域水环境问题及其防治对策[J]. 地理科学, 1997, **17**(3): 231-236.
- [21] 沈照理, 朱宛华, 钟佐荣. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [22] 韩冬梅. 基于环境同位素及水化学的莱州湾海水入侵机理研究[D]. 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文, 2009.
- [23] 田 芳, 许清海, 李月从, 等. 白洋淀湖泊表层花粉通量特征及来源途径分析[J]. 地理科学, 2010, **30**(6): 955-961.
- [24] 赵 建. 海(咸)水入侵与浅层地下水水化学特征及变化研究[J]. 地理科学, 1999, **19**(6): 525-531.

Seawater Intrusion Degree Evaluation Based on Mathematical Statistics and Fuzzy Mathematics in Qinhuangdao Yangdai River Plain

ZHANG Bin^{1,2}, SONG Xian-fang¹, HAN Dong-mei¹, GUO Zhan-rong³, XIAO Guo-qiang⁴, YANG Ji-long⁴

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou, Guangdong 510655, China; 3. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 4. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: Analyzing the distribution map of seawater intrusion degree can increase the knowledge of seawater intrusion mechanism, which is not only the important reference for water supplies of production and daily life but also the core content of seawater intrusion survey and research. In this article, four effective indicators for seawater intrusion of Qinhuangdao Yangdai River Plain which is located in the northeast of Hebei Province were selected out according to the different hydrochemical characteristics of fresh groundwater, brackish groundwater and seawater using the method of mathematical statistics. And then, the background values and index system of those seawater intrusion indicators were built to carry on seawater intrusion degree evaluation work based on the approach of fuzzy synthetic evaluation and geographic information system. The research results can be showed as follows: The chloride ion (Cl^-), electric conductivity (EC), total dissolved solids (TDS) and potential salinity are the optimal seawater intrusion indicators which can help to distinguish the intruded samples from all groundwater samples. The background value of study area for chloride ion concentration, EC, TDS and potential salinity are 83.06-243.8 mg/L, 600-1 222 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 341.82-679.14 mg/L and 2.92-8.05 meq/L, respectively. The lower limit value of chloride ion concentration, EC, TDS and potential salinity are 250 mg/L, 1 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 700 mg/L and 8.5 meq/L, respectively, which can manifest the occurrence of seawater intrusion. The groundwater samples identified seawater intrusion degree as rank II and rank III, make up 74% of all samples, which reveals that seawater intrusion degree of study area generally belongs to the medium level. On the basis of the distribution map of seawater intrusion degree, the seawater intrusion degree of the alluvial aquifers around Pu River between the Yang River and Dai River is the highest.

Key words: Qinhuangdao; Yangdai River plain; mathematical statistics; fuzzy mathematics; seawater intrusion degree