

吉兰泰盐湖卤水化学动态变化的灰色—马尔科夫过程预测分析

庞西磊¹, 胡东生^{1 2}

(1. 湖南师范大学资源环境科学学院, 湖南 长沙 410081;
2 西 北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘 要: 卤水中的化学成分因受多种因素影响, 使其在时间序列上的变化波动强烈而规律难循。灰色—马尔科夫过程预测是预测事物在时间序列上发展趋势的一种良好有效的统计分析手段, 它将灰色系统预测法和马尔科夫过程预测法有效结合, 既弥补了两种方法各自的缺点, 又能充分考虑数据给予的信息, 可以大大提高随机波动较大数据序列的预测精度。本文用灰色—马尔科夫过程预测法对吉兰泰盐湖卤水中几种主要离子浓度的变化进行了趋势分析, 分析结果发现几种离子浓度的变化均有一定的规律性, 而且这些离子在预测数据的变化规律同原始实测数据变化规律有很好的 一致性。

关键词: 灰色 GM(1, 1) 模型; 马尔科夫过程; 灰色—马尔科夫过程预测; 吉兰泰盐湖; 卤水

中图分类号: P641. 464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008—858X(2009) 02—0027—07

1 研究背景

盐湖卤水的化学组分和水质变化不仅与外界气候环境、周围物质来源有关, 更与周围含水层介质以及大气降水等关系密切。盐湖卤水与周围的含水介质之间存在着复杂多变的物质交换, 致使卤水中各化学成分浓度随空间和时间的分布各异, 变化规律复杂多变。虽然其变化没有十分明显的规律可循, 但我们通过对历史数据进行分析建模, 可以试探性地对盐湖地区未来时段的卤水化学成分的变化进行预测, 了解其变化规律, 进而为盐湖卤水资源的开发和利用提供理论参考。

2 研究方法

鉴于盐湖卤水中的离子浓度变化无常, 经

过对比分析考虑选用灰色—马尔科夫过程预测法对盐湖卤水的离子成分的发展趋势进行预测。

灰色—马尔科夫过程预测法的基本思路就是先建立灰色系统模型求出其初步预测值, 以这些预测值为基础, 将初步预测结果分为若干种状态, 然后用马尔科夫过程预测来确定状态的转移规律, 从而得到精度较高的预测值。

利用灰色系统模型进行预测不需要大量的样本, 样本也不需要很有规律的分布, 其有计算工作量小、预测精度高等优点; 而且可以进行短、中、长期等多时段的预测, 不过其优势主要在于短期预测, 对长期预测和波动性较大数据列的拟合预测效果较差。马尔科夫过程预测法, 是一种预测事件发生概率的方法, 其原理是根据事件的目前状况预测将来各个时段的变动状况, 其优势在于长期预测和对随机波动性较大数据列的预测, 这一点正好弥补灰色预测的

收稿日期: 2008—10—03 修回日期: 2009—05—18
项目来源: 湖南省重点学科建设项目 (编号: DL2007001) 资助
作者简介: 庞西磊 (1983—), 男, 硕士研究生, 自然地理专业, 研究方向: 环境演变。 Email: pxl_bang@163. com

局限;再者,马尔科夫过程预测法对解决无后效性的预测有独到之处。两者的结合可以避免考虑其他多种影响因素,能充分考虑数据给予的信息,大大提高随机波动较大数据列的预测精度,具有较高的科学性和实用性。灰色系统预测、马尔科夫过程预测法已经成为预测事物趋势的较成熟有效的方法,学者们结合实际情况将两种方法结合起来,运用灰色—马尔科夫过程预测法解决了相关领域事态发展的趋势问题,也印证了该方法的可靠性和有效性^[1-11]。

3 方法解析

1)灰色预测系统 灰色预测法中,按照预测问题的特征,基本上可分为四种类型:数列预测,灾变预测,拓扑预测和系统综合预测。而其中的数列预测,就是对某一指标的发展变化情况所做的预测^[1]。在地理学研究中,譬如人口数量预测、耕地面积预测、粮食产量预测和降水预测等,都是采用数列预测。数列预测的基础,是基于累加生成数列的 GM(1, 1)模型,其基本原理如下。

设 $x(1), x(2), \dots, x(m)$ 是所预测的某指标的原始数据,由于要处理的数据一般都是不平稳的随机数列,如果对原始数列作一次累加生成处理,则得到一个新数列,此数列与原始数列相比较,其随机程度就大大弱化,平稳程度大大增加。

那么,对于这样一个新数列,其变化趋势可以用如下微分方程描述: $\frac{dx^{(1)}}{dt} + a \cdot x^{(1)} = u$ 式中的参数 a 和 u 可以通过最小二乘法拟合得到, $\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} \cdot B^T \cdot Y_n$ 其中 $Y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(m)]^T$; B 为构造矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(m-1) + x^{(1)}(m)] & 1 \end{bmatrix}$$

进而得到的 GM(1, 1)模型预测公式为

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[\hat{x}^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] \cdot e^{-at} + \frac{u}{a} \quad \text{通过}$$

GM(1, 1)模型公式生成的一次累加数列的预测数值,可以求得原始数值的还原值,即 $\hat{x}^{(0)}(j) = \hat{x}^{(1)}(j) - \hat{x}^{(1)}(j-1)$ 。原始数据的还原值与实际观测值之间的残差值 $\epsilon^{(0)}(j)$ 和残差幅度 q 的计算公式为:

$$\begin{cases} \epsilon^{(0)}(j) = \hat{x}^{(0)}(j) - x^{(0)}(j) \\ q(j) = \frac{\epsilon^{(0)}(j)}{\hat{x}^{(0)}(j)} \times 100\% \end{cases}$$

上面便是灰色预测中的即 GM(1, 1)模型建模过程。当然,在建模之后,还要进行预测公式的精度检验。要进行精度检验,需要计算出原始数据的均值、原始数据方差、残差值的均值和残差值的方差,这些检验指标的计算公式如下:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(0)} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m x^{(0)}(i) \\ s^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m [x^{(0)}(i) - \bar{x}^{(0)}]^2 \\ \bar{\epsilon}^{(0)} = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=2}^m \epsilon^{(0)}(i) \\ s_{\epsilon}^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=2}^m [\epsilon^{(0)}(i) - \bar{\epsilon}^{(0)}]^2 \end{cases}$$

然后计算出原始数据与残差值的标准方差比 c

和小误差概率 p $c = \frac{s}{s_{\epsilon}}$ $p = p$

$\{ |\epsilon^{(0)}(j) - \bar{\epsilon}^{(0)}| < 0.6745 \cdot s_{\epsilon} \}$ 。 p 和 c 是作为最后检验模型精度的主要指标,如果 p 和 c 都在允许范围之内,则预测公式就可用;否则,就要通过残差序列建模法进行修正。

2)马尔科夫预测过程 马尔科夫过程预测法,是一种预测事件发生概率的方法。其原理是根据事件的目前情况(状态)预测将来各个时段变动状况。马尔科夫预测中,“状态”是指某一事件在某个时刻出现的某种结果。在事件的发展过程中,若每次状态的转移都是仅与前一刻时刻的状态有关,而与过去的状态无关,或者说状态转移过程是无后效性的,则这样的状态转移过程就是马尔科夫过程。

在运用马尔科夫预测法对事件发展过程中状态出现的概率进行预测之前,需要了解几个概念,即状态转移概率、状态转移概率矩阵和状

态概率。

所谓状态转移概率,是指在事件的发展变化过程中,从某一状态出发,下一时刻转移到其他状态的可能性。根据此定义,由状态 E_1 转为状态 E_2 的状态转移概率 $P(E_1 \rightarrow E_2)$ 即是条件概率 $P(E_1/E_2)$, 即 $P(E_1 \rightarrow E_2) = P(E_1/E_2) = P_{12}$ 。

假设某一事件的发展过程中有 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 等 n 个可能的状态,这些状态之间互相转换的条件概率所形成的矩阵就称为状态转移概率矩阵:

$$P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}。$$

状态概率 π_{ij} 表示时间在初始状态为已知的条件下,经过 k 次状态转移后,在第 k 时刻处于状态 E_j 的概率,那么显然有 $\sum_{j=1}^n \pi_{ij} = 1$ 。从初始状态开始,经过 k 次状态转移后到达状态 E_j 这一状态的转移过程,可以看做是首先经过 $(k-1)$ 次状态转移后到达状态 E_i ,然后再由 E_i 经过一次状态转移至状态 E_j 。则有:

$$\pi_{ij}=\sum_{j=1}^n \pi_{ij(k-1)} \cdot P_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,n)。$$

然而,事件在某时刻的可能状态不止一种,发生不同的状态均有可能性。一般地,用 A_{ij} 表示在 i 时刻的状态概率向量 $A_{ij}=A_{i0} \cdot P^i$ 。其中, A_{ij} 为 i 时刻的状态概率向量; A_{i0} 为初始时刻的状态概率向量; P 为转移概率矩阵。也就是说事件在任意时刻的状态可由初始状态和一步状态转移概率所决定。

3)灰色—马尔科夫过程预测模型 综合上述原理,得到灰色—马尔科夫过程预测模型公式,模型值用 K 表示, K 的计算公式如下:

$$K=\frac{y^{(0)}}{4}+\frac{1}{4}[(a+b) \cdot \theta_i+(a+b) \cdot \theta_j] \cdot Y$$

公式中的 $y^{(0)}$ 是灰色 $GM(1,1)$ 模型预测值; Y 是原始数据的平均值,即离子的平均浓度值; a, b 与 a, b 分别是对应两种优势状态的上下限,其中优势状态指马尔科夫预测过程中,预测结果最有可能发生的状态; θ_i 和 θ_j 是对应的优

势状态的状态概率。

4 灰色—马尔科夫过程预测

根据实际观察资料^[12-13],我们得到吉兰泰盐湖地区晶间卤水中主要离子在 1987~1998 年(缺 1990 年和 1995 年) 10 年间的历年平均浓度值。

表 1 吉兰泰盐湖晶间卤水化学特征简表
Table 1 Chemical characteristic table of intercrystal line brine in Jilantai salt lake

时间 / a	离子浓度 / (g/L)			
	Na ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1987	109.487	9.391	187.854	14.573
1988	109.282	8.71	179.378	11.674
1989	112.447	9.034	190.316	11.859
1991	108.585	11.384	185.791	21.805
1992	106.95	10.813	185.678	19.236
1993	109.185	9.78	186.318	17.82
1994	107.917	10.173	185.638	15.385
1996	112.754	6.761	183.394	13.521
1997	108.808	9.884	187.009	16.704
1998	103.01	8.91	173.09	17.2

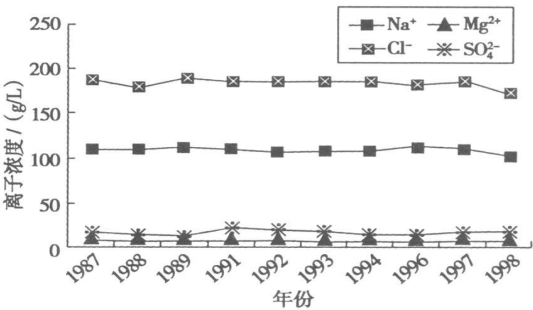


图 1 吉兰泰盐湖晶间卤水主要离子的浓度变化趋势图

Fig 1 Changing trend diagram of major ions concentration of intercrystalline brine in Jilantai salt lake

从图 1 中可以看出,吉兰泰盐湖地区晶间卤水的主要离子浓度变化幅度都不大,呈现较为稳定的发展趋势。1987~1998 年间, Na^+ 浓度一直在 106.6 g/L 上下浮动; Mg^{2+} 浓度基本上

是以两年为周期的小幅升降变化; SO_4^{2-} 的浓度在 1991 出现峰值,历年浓度平均值约 15.1 g/L,历年的 Cl^- 浓度值变化也不大,在 1988 年和 1998 年出现低谷值,历年的平均浓度值约为 186.2 g/L

表 2 Na^+ 浓度的 $\text{GM}(1,1)$ 模型特征值表
Table 2 $\text{GM}(1,1)$ model eigenvalue of Na^+ concentration

时间 / a	原始值 / (g/L)	拟合预测值 / (g/L)	残差 / (g/L)	残差幅度 / %
1987	109.487	109.487	0.000	0.000
1988	109.282	110.549	-1.276	-1.167
1989	112.447	110.100	2.340	2.081
1991	108.585	109.653	-1.073	-0.988
1992	106.950	109.208	-2.260	-2.114
1993	109.185	108.765	0.420	0.385
1994	107.917	108.323	-0.404	-0.375
1996	112.754	107.884	4.875	4.323
1997	108.808	107.446	1.369	1.258
1998	103.010	107.010	-3.991	-3.874

表 3 Mg^{2+} 浓度的 $\text{GM}(1,1)$ 模型特征值表
Table 3 $\text{GM}(1,1)$ model eigenvalue of Mg^{2+} concentration

时间 / a	原始值 / (g/L)	拟合预测值 / (g/L)	残差 / (g/L)	残差幅度 / %
1987	9.391	9.391	0	0
1988	8.71	9.9172	-1.2072	-13.8595
1989	9.034	9.8088	-0.7748	-8.5765
1991	11.384	9.7016	1.6824	14.7783
1992	10.813	9.5956	1.2174	11.2585
1993	9.78	9.4907	0.2893	2.9576
1994	10.173	9.387	0.786	7.7259
1996	6.761	9.2845	-2.5235	-37.3231
1997	9.884	9.183	0.701	7.0922
1998	8.91	9.0826	-0.1726	-1.9377

根据上述的原理和公式,首先对 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 进行灰色系统的数列预测。利用国产统计软件 DPS 进行计算,将相关结果综合列于表 2~表 5 中。

根据表 2~表 5 中各离子浓度的 $\text{GM}(1,1)$ 模型特征值,计算出原始数据与残差值的标准

方差比 C 和小误差概率 P,进而得出 $\text{GM}(1,1)$ 模型的预测结果评价。

表 4 Cl^- 浓度的 $\text{GM}(1,1)$ 模型特征值表
Table 4 $\text{GM}(1,1)$ model eigenvalue of Cl^- concentration

时间 / a	原始值 / (g/L)	拟合预测值 / (g/L)	残差 / (g/L)	残差幅度 / %
1987	187.854	187.854	0	0
1988	179.378	186.7011	-7.3231	-4.0825
1989	190.316	186.0373	4.2787	2.2482
1991	185.791	185.376	0.415	0.2234
1992	185.678	184.7169	0.9611	0.5176
1993	186.318	184.0603	2.2577	1.2118
1994	185.638	183.4059	2.2321	1.2024
1996	183.394	182.7539	0.6401	0.349
1997	187.009	182.1042	4.9048	2.6228
1998	173.09	181.4568	-8.3668	-4.8338

表 5 SO_4^{2-} 浓度的 $\text{GM}(1,1)$ 模型特征值表
Table 5 $\text{GM}(1,1)$ model eigenvalue of SO_4^{2-} concentration

时间 / a	原始值 / (g/L)	拟合预测值 / (g/L)	残差 / (g/L)	残差幅度 / %
1987	14.573	14.573	0	0
1988	11.674	15.152	-3.478	-29.7926
1989	11.859	15.3891	-3.5301	-29.7667
1991	21.805	15.6298	6.1752	28.3199
1992	19.236	15.8743	3.3617	17.4758
1993	17.82	16.1227	1.6973	9.5247
1994	15.385	16.3749	-0.9899	-6.4343
1996	13.521	16.6311	-3.1101	-23.0019
1997	16.704	16.8913	-0.1873	-1.1212
1998	17.2	17.1556	0.0444	0.2584

表 6 $\text{GM}(1,1)$ 模型的预测结果评价表
Table 6 Evaluation table of prediction results of $\text{GM}(1,1)$ model

离子	检验参数		模型评价
	P	C	
Na^+	0.856	0.454	合格
Mg^{2+}	0.856	0.729	勉强
Cl^-	0.856	0.554	勉强
SO_4^{2-}	0.744	0.618	勉强

从表 6 的预测评价中可以看出,模型预测

结果的评价仅处在勉强和合格的水平, 可以进行下一步预测分析。结果说明, 研究所选的原 始数据较少而引起灰色 GM(1, 1)模型的预测 结果不是十分理想, 但是仍可以进行预测。

根据马尔科夫链分析方法的应用经验以及 4种离子浓度预测结果的残差幅度情况, 首先 将这 4种离子浓度的预测结果的状态做如下划 分:

1) Na^+ 离子浓度预测结果的状态划分为 ①残差幅度介于 $-4\% \sim -1\%$ 之间为状态 1, 表示低估状态, 在离子浓度预测结果中出现过 3次; ②残差幅度介于 $-1\% \sim 1\%$ 之间为状态 2 表示正常预测状态, 在离子浓度预测结果中 出现 4次; ③残差幅度介于 $1\% \sim 4\%$ 之间为状 态 3 表示一般高估状态, 在离子浓度预测结果 中出现 2次; ④残差幅度大于 4% 的为状态 4 表示过于高估状态, 在离子浓度预测结果中出 现 1次。

2) Mg^{2+} 离子浓度预测结果的状态划分为 ①残差幅度小于 -15% 为状态 1 表示高低估 状态, 在离子浓度预测结果中出现过 1次; ②残 差幅度介于 $-15\% \sim -5\%$ 之间为状态 2 表示 一般低估状态, 在离子浓度预测结果中出现 2 次; ③残差幅度介于 $-5\% \sim 5\%$ 之间为状态 3 表示正常预测状态, 在离子浓度预测结果中出 现 2次; ④残差幅度介于 $5\% \sim 15\%$ 之间为状 态 4 表示高估状态, 在离子浓度预测结果中出 现 4次; ⑤残差幅度大于 15% 为状态 5 表示特 别高估状态, 离子浓度预测结果中出现 0次。

3) Cl^- 离子浓度预测结果的状态划分为 ①残差幅度小于 $-5\% \sim -2\%$ 为状态 1 表示高 低估状态, 在离子浓度预测结果中出现过 2次; ②残差幅度介于 $-2\% \sim 2\%$ 之间为状态 2 表 示一般低估状态, 在离子浓度预测结果中出现 6次; ③残差幅度介于 $2\% \sim 5\%$ 之间为状态 3 表示正常预测状态, 在离子浓度预测结果中出 现 2次。

4) SO_4^{2-} 离子浓度预测结果的状态划分为 ①残差幅度小于 -20% 为状态 1 表示高低估 状态, 在离子浓度预测结果中出现过 3次; ②残 差幅度介于 $-20\% \sim -5\%$ 之间为状态 2 表示 一般低估状态, 在离子浓度预测结果中出现 1

次; ③残差幅度介于 $-5\% \sim 10\%$ 之间为状态 3 表示正常预测状态, 在离子浓度预测结果中 出现 4次; ④残差幅度大于 10% 为状态 4 表示 高估状态, 在离子浓度预测结果中出现 2次。

通过对上述状态划分 的分析, 可以得到这 4种离子浓度预测结果转移情况表, 如下。

表 7 Na^+ 离子浓度预测结果转移情况表
Table 7 Transition table of Prediction results of Na^+ con-
centration

项目	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	合计
状态 1	0	0.5	0.5	0	2
状态 2	0.5	0.25	0	0.25	4
状态 3	0.5	0.5	0	0	2
状态 4	0	0	1	0	1

表 8 Mg^{2+} 离子浓度预测结果转移情况表
Table 8 Transition table of Prediction results of Mg^{2+}
concentration

项目	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	合计
状态 1	0	0	0	1	1
状态 2	0	1	0	1	2
状态 3	0	1	0	1	2
状态 4	1	0	2	1	4

表 9 SO_4^{2-} 离子浓度预测结果转移情况表
Table 9 Transition table of Prediction results of SO_4^{2-}
concentration

项目	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	合计
状态 1	1	0	1	1	3
状态 2	0	0	0	1	1
状态 3	1	1	1	0	3
状态 4	0	0	1	1	2

表 10 Cl^- 离子浓度预测结果转移情况表
Table 10 Transition table of Prediction results of Cl^-
concentration

项目	状态 1	状态 2	状态 3	合计
状态 1	0	0	1	1
状态 2	1	4	1	6
状态 3	1	1	0	2

根据上述分析情况, 进而得到各离子浓度 对应的转移概率矩阵, 如下:

$$P_{Na^+} = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

$$P_{Mg^{2+}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{vmatrix},$$

$$P_{SO_4^{2-}} = \begin{vmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix},$$

$$P_{Cl^-} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{vmatrix}.$$

表 11 灰色—马尔科夫过程预测结果

Table 11 Grey-Markov Process Prediction result

时间 / a	灰色—马尔科夫过程模型预测值 / (g/L)			
	Na ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1999	105.895	9.102	181.29	17.823
2000	106.823	8.737	180.64	18.096
2001	105.159	8.922	180	18.373
2002	105.665	8.579	179.36	18.654
2003	104.417	8.709	178.73	18.94
2004	104.03	8.396	177.9	19.23
2005	103.587	8.517	177.46	19.524
2006	103.175	8.424	176.83	19.823
2007	102.749	8.438	176.21	20.127
2008	102.333	8.243	175.58	20.436
2009	101.915	8.259	174.96	20.749
2010	101.5	8.066	174.34	21.068
2011	101.086	8.084	173.72	21.391
2012	100.674	7.893	173.11	21.72
2013	100.264	7.913	172.49	22.053
2014	99.855	7.724	171.88	22.392
2015	99.448	7.746	171.27	22.736

然后,再算出 1999~2015 年的各离子浓度的 17 次转移矩阵。从各离子的 17 次状态转移矩阵中可以看出: Na⁺ 离子浓度预测状态中 T₂ 的列概率和最大,其次是 T₁,也就是说其优势状态是 T₁ 和 T₂; Mg²⁺ 离子的优势状态是 T₄ 和 T₃; Cl⁻ 离子的优势状态是 T₂ 和 T₃; SO₄²⁻ 离子的优势状态是 T₃ 和 T₄。

最后,当 1999~2015 年历年卤水各离子浓度的预测状态 T₁ 确定后,就可以得出各离子的灰色—马尔科夫过程预测模型值。其中历年 Na⁺ 离子的平均浓度为 $\bar{Y}_1=108.8425\text{ g/L}$, Mg²⁺ 离子的平均浓度为 $\bar{Y}_2=9.484\text{ g/L}$, SO₄²⁻ 离子的平均浓度为 $\bar{Y}_3=15.978\text{ g/L}$, Cl⁻ 离子的平均浓度为 $\bar{Y}_4=184.4466\text{ g/L}$ 。

5 预测结果评价

从灰色—马尔科夫过程模型的预测结果来看,吉兰泰盐湖晶间卤水中 4 种主要离子在 1999~2015 年间的变化中, Na⁺ 离子浓度的总降幅约 6.46 g/L, 年际间平均离子浓度差约 0.41 g/L, 整体上 Na⁺ 呈持续下降的趋势; Mg²⁺ 基本上以 2 年为周期的波动性变化, 离子浓度先降低再升高, 降幅约 0.21 g/L, 升幅约 0.06 g/L, 但其预测浓度值整体呈下降趋势; Cl⁻ 离子浓度的总降幅为 10.0 g/L, 平均降幅约 0.65 g/L, 整体上其浓度预测值是逐年减少的; SO₄²⁻ 离子的浓度呈逐年上升势头, 总升幅近 5.0 g/L, 平均降幅约 0.3 g/L。总的看来, Na⁺、Mg²⁺ 和 Cl⁻ 3 种离子在未来长期的演化呈下降趋势, 而 SO₄²⁻ 浓度的变化趋势则是逐年增加的。

预测结果中 Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 等离子浓度的升降幅度均没有超过 10 g/L, 但变化趋势都很明显, 而且同 1987~1998 年间盐湖晶间卤水中这 4 种离子的变化趋势是一致的, 说明灰色—马尔科夫过程预测模型预测效果是良好的, 而且能够客观反映盐湖水化学的变化趋势。

参考文献:

[1] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 第二版. 北京:

高教出版社, 2002

[2] 文华, 王岭, 计焕, 等. 用灰色—马尔柯夫模型预测油田产量[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(3): 49—54

[3] 张诚, 周湘峰. 基于灰色预测—马尔可夫链一定性分析的铁路货运量预测[J]. 铁道学报, 2007, 29(5): 15—21

[4] 孟周济, 郭涛. 基于灰色—马尔柯夫模型的西安房地产市场分析[J]. 西安建筑科技大学学报 (社会科学版), 2007, 26(3): 55—59

[5] 李祥, 王心源, 李玉龙等. 基于灰色—马尔科夫过程预测模型的巢湖流域洪涝灾害预测研究[J]. 水文, 2006 26(4): 43—46

[6] 游珍, 杜传亮, 李永涛. 基于灰色—马尔可夫耦合模型的区域建设用地需求预测[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1528—1532

[7] 宋印胜. 马尔可夫链模型在地下水水位预测中的应用[J]. 山东地质, 1998(1): 34—40

[8] 王渺林. 灰色马尔可夫模型在寸滩站年最高水位预测中的应用[J]. 四川水利, 2004(2): 10—11

[9] 张宗国. 马尔可夫链在预报太湖流域梅雨期中的应用[J]. 河海大学学报, 2006, 34(1): 116—118

[10] 夏秀芳. 马尔可夫模型的构建和应用[J]. 商业研究, 2002 (237): 42—45

[11] 姜学鹏, 徐志胜. 我国火灾损失的时间趋势分析及动态预测[J]. 消防理论研究, 2005 24(4): 412—414

[12] 于升松, 白福易, 李浩炎, 等. 吉兰泰盐湖资源环境与可持续发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001

[13] 易峰. 吉兰泰盐湖采盐过程中水动态、水化学监测分析及建议[J]. 内蒙古盐业, 1994(3): 7—9

Grey-Markov Process Prediction on the Chemical Dynamic Changes of Jilantai Salt Lake Brine

PANG Xi lei¹, HU Dong sheng²

(1. College of Resources Environment al Science, Hunan Normal University, Changsha, 410081, China; 2. State Key Laboratory of Continual Dynamics, Northwest University, Xi an, 710075, China)

Abstract: There are somany factors influencing the evolution of salt lake brine, which cause the brine chemical composition changing randomly. Grey-Markov process prediction is an effective method to predict the development trend of time sequence. The combination of Grey system and Markov process can make up for the shortcomings of them, fully use the given data, and improve the prediction precision of stochastic fluctuating data sequence by bring a more objective and accurate result. Grey-Markov process prediction method was applied to analyze the trend of several major ionic concentrations in Jilantai salt lake brine in the paper. It was found that the ionic concentration change has the regularity, and the change between the predicted data in the future and the original data being similar.

Key words: GM(1, 1) model of Grey system; Markov process; Grey-Markov process prediction; Jilantai salt lake Brine