

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.06.011

北京市南水北调工程受水区典型非正规垃圾场地下水安全性评价

范庆莲¹,杨忠山¹,窦艳兵¹,王昭艳²,范庆广³

(1.北京市水文总站,北京 100089;2.中国水利水电科学研究院,北京 100048;3.山东省淄博职业学院,山东 淄博 255314)

摘要 对北京市南水北调工程受水区 26 处非正规垃圾场地区地下水安全性的影响因素进行分析,采用 DRASTIC 方法和模糊综合评判法相结合的地下水安全性评价方法,选取地下水埋深、含水层介质类型、土壤类型、包气带介质类型、氯离子、总硬度和硝酸盐等 7 个影响因子作为评价指标,并用层次分析法确定各指标权重,最终计算出北京市南水北调受水区 26 处非正规垃圾场地区地下水安全性评价综合评分值,并划分了各垃圾场地区的地下水安全性等级 5 个一级区安全性较高,15 个二级区次之,6 个三级区地下水安全性最低。

关键词 非正规垃圾场 地下水 安全性评价 评分值 北京市 南水北调工程受水区
中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2011)06-0044-04

Groundwater safety evaluation for representative non-sanitary landfill sites in water-receiving regions of South-to-North Water Diversion Project in Beijing City

FAN Qing-lian¹, YANG Zhong-shan¹, DOU Yan-bing¹, WANG Zhao-yan², FAN Qing-guang³
(1. Beijing Hydrologic Center, Beijing 100089, China 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China 3. Zibo Vocational Institute of Shandong Province, Zibo 255314, China)

Abstract :The influencing factors of groundwater safety at 26 non-sanitary landfill sites in the water-receiving regions of the South-to-North Water Diversion Project in Beijing City were analyzed. A groundwater safety evaluation method based on a combination of the DRASTIC method and the fuzzy comprehensive evaluation method was used in this study. Seven influencing factors, including the groundwater depth, aquifer media type, soil type, vadose zone media type, chloride ion, total hardness, and nitrate, were selected to be the evaluation indices. The weights of the indices were determined with the analytic hierarchy process, and the integrated scores of groundwater safety at 26 non-sanitary landfill sites in the water-receiving regions of the South-to-North Water Diversion Project in Beijing City were calculated. In addition, the safety grades of the groundwater at all the sites were classified as follows: five first-grade sites have the highest groundwater safety, followed by 15 second-grade sites, and six third-grade sites have the lowest groundwater safety.

Key words :non-sanitary landfill sites ;groundwater ;safety evaluation ;evaluated values ;Beijing City ;water-receiving regions of South-to-North Water Diversion Project

随着南水北调工程的建成使用,北京市的缺水问题将得到缓解,但由此引起的地下水水位回升也可能带来新的地下水环境问题。根据北京市水文地质工程地质大队于 2004 年 4 月完成的《南水北调(北京段)环境地质问题调查评价》报告,南水北调水进京 10 年后,受水区潜水含水层地下水位将普遍抬高 10~16 m,

南水北调受水区的 26 处非正规垃圾填埋场将受到地下水浸泡,可能会造成地下水的严重污染。

垃圾渗滤液是指垃圾在堆放和填埋过程中由于发酵和雨水的淋浴、冲刷,以及地表水和地下水的浸泡而渗滤出来的污水。渗滤液中的污染物对地下水的影响将会长期存在,即使填埋场封闭后的一段时

间内仍然如此。因此研究 26 处非正规垃圾场地区的地下水安全性显得至关重要。

地下水安全性研究是防治地下水污染、保护地下水环境工作的重要基础,通过对局部和区域地下水进行安全性研究,区别不同地区地下水的防污程度,评价地下水潜在的易污染性,可为地下水污染研究及其防治提供借鉴。本次的评价对象是北京市南水北调受水区的 26 处非正规垃圾场地区,评价的目的是分析确定这些地区的地下水安全性,从而采取相应的治理措施。本次进行的评价为地下水防污性能评价,既考虑地下水本质防污性能又考虑地下水特殊防污性能,旨在对各垃圾场地区地下水受污染的可能性进行预测和评价。

1 垃圾场情况

北京市南水北调受水区的典型非正规垃圾场包括大兴区、丰台区、朝阳区、石景山区、海淀区 5 个区共 26 处垃圾场,各垃圾场的名称和勘探结果见表 1,垃圾场位置图见文献[1]。

表 1 北京市南水北调受水区 26 处垃圾场水文地质勘探结果

垃圾场	坑深/m	垃圾成分	地层结构
狼堡	20.7	生活 43%,建筑 50%, 粉土 7% (16~18m)	单层
瀛海	15.4	建筑 95%,生活 5%	互层
看丹南	18.8	生活 90%,建筑 5%,卵石 5%	单层
看丹北	19.0	生活 90%,建筑 5%,卵石 5%	单层
北天堂北	17.8	生活 90%,卵石土 10%	单层
北天堂南	27.3	生活 40%,卵石土 60%	单层
单店	11.0	生活 95%,建筑 5%	互层
沈家坟	20.5	生活 30%,建筑 70%	互层
沙子营西	6.7	建筑 65%,粉土 30%,生活 5%	互层
沙子营东	8.1	建筑 70%,生活 5%,粉土 25%	互层
杨庄(八角)	26.1	建筑 50%,生活 10%, 砂 10%,卵石 15%,粉土 15%	单层
老山西	37.0	粉土 2%、建筑 50%、 生活 30%,卵石 18%	单层
老山东	24.6	建筑 60%,生活 30%,卵石 10%	单层
西黄村	21.5	生活 35%,建筑 30%,卵石 35%	单层
福田寺	15.0	生活 60%,建筑 35%,卵石 5%	单层
北坞村西	22.6	建筑 40%,生活 25%,粉土 35%	单层
北坞村东北	12.5	建筑 40%,生活 25%,粉土 35%	单层
北坞村东南	15.5	建筑 40%,生活 25%,粉土 35%	单层
西冉村	17.7	生活 50%,卵石 30%,粉土 20%	单层
田村西	24.7	生活 40%,建筑 40%, 卵石 10%,砂 10%	单层
田村东	17.5	生活 40%,建筑 40%,卵石 20%	单层
廖公庄西	27.0	建筑 60%,生活 30%,卵石 10%	单层
廖公庄东	27.7	建筑 60%,生活 30%,卵石 10%	单层
巨山村	26.5	建筑 85%,生活 10%,卵石 5%	单层
肖家河北	16.0	生活	互层
肖家河南	16.0	生活	互层

注 表中“生活”表示“生活垃圾”;“建筑”表示“建筑垃圾”。

2 评价方法

笔者采用 DRASTIC 评价方法与模糊综合评判方法相结合的方法评价地下水安全性。DRASTIC 评价方法中的 7 个评价指标均为地下水本质防污性能影响因素,而本次评价除了要考虑地下水自然属性因素的影响外,各垃圾场的污染物是必须考虑的重要因素。因此,本次评价将参考 DRASTIC 评价方法的原理先建立自己的评价指标体系,再参考模糊综合评判方法的原理,利用层次分析法得出各指标的权重,进一步计算出各垃圾场地区地下水安全性的综合评分值。根据综合评分值的大小,评判各垃圾场地区地下水安全性的高低。评分值越大,垃圾场地区地下水的安全性越低;反之,安全性越高。

2.1 评价指标体系的选取

DRASTIC 评价方法具有很大的适应性,可以应用到世界各地的地下水本质防污性能评价中。本次研究在 DRASTIC 指标体系 7 个评价指标的基础上,选取了 4 个本质防污性能评价指标;同时经过对垃圾场调查报告的详细研究分析,结合北京地区的实际情况,选取了 3 个特殊防污性能评价指标,这 7 个评价指标共同构成了垃圾场地区地下水安全性评价指标体系。

2.1.1 本质防污性能评价指标

本文中的 26 处非正规垃圾场,均位于北京市城近郊区,根据文献[2],这些垃圾场所在地区的含水层净补给量均介于 0~50.8 m³/(a·km²)。由表 2 可知,含水层净补给量对这些垃圾场地区地下水安全性的影响程度基本一致,所以本次研究不考虑含水层净补给量对地下水安全性的影响。经现场调查可知,各垃圾场地区的地面坡度均小于 2%。同样根据表 2 可知,地面坡度对各垃圾场地区的影响程度基本一致,所以不考虑地面坡度对地下水安全性的影响。根据文献[1]各垃圾场地区地下水的水力传导系数均大于 81.5 m/d,水力传导系数对垃圾场地区地下水安全性的影响程度基本一致,所以本次研究不考虑水力传导系数对地下水安全性的影响。

因此,选取地下水埋深(D)、含水层介质类型(A)、土壤类型(S)及包气带介质类型(I)等 4 个指标作为本次垃圾场地区地下水安全性评价指标^[3-6]。

2.1.2 特殊防污性能评价指标

对垃圾场地区地下水进行安全性评价,垃圾中的污染物是最重要的影响因素。根据对 26 处非正规垃圾场的调查及相关试验可知,从各污染物的浓度随时间变化趋势上来看,氯离子、总硬度及硝酸盐在垃圾中含量较高,是主要的污染因子,所以,将氯离子、总

表 2 DRASTIC 方法各评价指标的分级及其评分值														
参数	地下水埋深/m							含水层净补给/(万 m ³ ·a ⁻¹ ·km ⁻²)						
范围/类别	0~1.5	1.5~4.6	4.6~9.1	9.1~15.2	15.2~22.9	22.9~30.5	>30.5	0~50.8	50.8~101.6	101.6~177.8	177.8~254	>254		
评分值	10	9	7	5	3	2	1	1	3	6	8	9		
参数	含水层介质							水力传导系数/(m·d ⁻¹)						
范围/类别	块状页岩	变质岩/火成岩	风化变质岩/火成岩	薄层状砂岩、灰岩及页岩序列	块状砂岩、块状灰岩	砂砾层	玄武岩	岩溶灰岩	0~4.1	4.1~12.2	12.2~28.5	28.5~40.7	40.7~81.5	>81.5
评分值	1~3(2)	2~5(3)	3~5(4)	5~9(6)	4~9(6)	6~9(8)	2~10(9)	9~10(10)	1	2	4	6	8	10
参数	土壤介质							地面坡度/%						
范围/类别	薄层或缺失	砾石	砂	胀缩性黏土	砂质黏土	壤土	粉质壤土	黏质壤土	非胀缩黏土	0~2	2~6	6~12	12~18	>18
评分值	10	10	9	7	6	5	4	3	1	10	9	5	3	1
包气带岩性														
参数	粉土/黏土	页岩	灰岩	砂岩	层状灰岩、砂岩、页岩	含较多粉砂和黏粒的砂砾石	变质岩/火成岩	砂砾石	玄武岩	岩溶发育灰岩				
评分值	1~2(1)	2~5(3)	2~7(6)	4~8(6)	4~8(6)	4~8(6)	2~8(4)	6~9(8)	2~10(9)	8~10(10)				

注 评分值括号内数值为分区间取值。

硬度和硝酸盐作为本次考虑的主要影响指标^[7-9]。

综上所述,本次垃圾场地区地下水安全性评价选取地下水埋深(D)、含水层介质类型(A)、土壤类型(S)、包气带介质类型(I)、氯离子(Cl)、总硬度(Ca)和硝酸盐(N)7个评价指标,这些指标的缩写合为 DASIClCaNo。

2.2 各指标权重的确定

各评价指标权重的大小采用层次分析法确定,具体过程如下。

2.2.1 建立系统的递阶层次结构

分成3个层次:最顶层(目标层)、中间层(准则层)、最低层(方案层)。本次建立的层次结构图如图1所示。

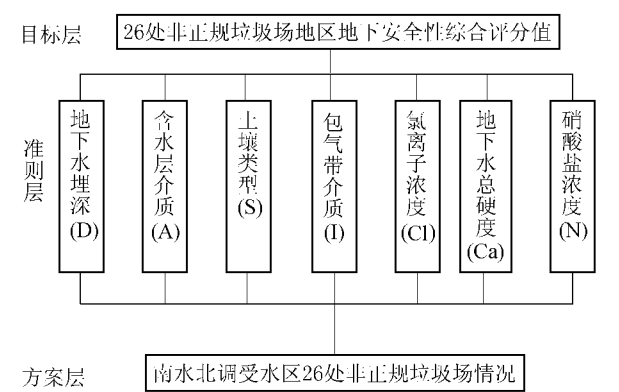


图 1 层次结构模型

2.2.2 构造两两比较判断矩阵

设要比较 n 个因素 $Y = (y_1, y_2, \cdots, y_n)$ 对同一目标的影响,每次取两因素 y_i 和 y_j ,则 a_{ij} 表示 y_i 与 y_j 对目标的影响程度之比,构造出成对比较矩阵 $W = (a_{ij})_{7 \times 7}$ 矩阵,其中 a_{ij} 的确定根据层次分析法的创始人 Saaty 的 1~9 值法确定,如表 3 所示。

表 3 成对比较法矩阵因子确定原则

标度	含义
1	表示具有相同重要性
3	表示前者比后者稍重要
5	表示前者比后者明显重要
7	表示前者比后者强烈重要
9	表示前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

根据 7 个影响垃圾场地区地下水安全性的指标及其对垃圾场地区地下水安全性影响程度的大小,参考 DRASTIC 方法及专家打分法,综合考虑,构建出矩阵 W 。

$$W = \begin{bmatrix} 1 & \frac{5}{3} & \frac{5}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{5}{12} & \frac{1}{3} \\ \frac{3}{5} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{5} & \frac{3}{10} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{3} & 1 & \frac{2}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{6} & \frac{2}{15} \\ 1 & \frac{5}{3} & \frac{5}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{5}{12} & \frac{1}{3} \\ 2 & \frac{10}{3} & 5 & 2 & 1 & \frac{5}{6} & \frac{2}{3} \\ \frac{12}{5} & 4 & 6 & \frac{12}{5} & \frac{6}{5} & 1 & \frac{4}{5} \\ 3 & 5 & \frac{15}{2} & 3 & \frac{3}{2} & \frac{5}{4} & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.3 计算矩阵 W 的特征向量

a. 计算判断矩阵的每一行元素乘积。

$$M_i = \prod_{j=1}^n W_{ij} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

经计算 $M_1 = 0.289\,4, M_2 = 0.008\,1, M_3 = 0.000\,5, M_4 = 0.289\,4, M_5 = 37.037\,0, M_6 = 132.710\,4, M_7 = 632.812\,5。$

b. 计算 M_i 的 7 次方根

$$\bar{a}_i = \sqrt[7]{M_i}$$

经计算： $\bar{a}_1 = 0.8377, \bar{a}_2 = 0.5026, \bar{a}_3 = 0.3346,$
 $\bar{a}_4 = 0.8377, \bar{a}_5 = 1.6753, \bar{a}_6 = 2.0104, \bar{a}_7 = 2.5129。$

c. 对 a 标准化,即

$$a_i = \frac{\bar{a}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{a}_i}$$

$$a = (a_1, a_2, \cdots, a_n)^T$$

即为所求的特征向量。

经计算得

$$a = (0.0962, 0.0576, 0.0384, 0.0962,$$

 $0.1923, 0.2308, 0.2885)^T$

2.2.4 对矩阵进行一致性检验

计算最大特征值,记 $(w_a)_i$ 是向量的第 i 个分量,则

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(w_a)_i}{na_i}$$

经计算得

$$\lambda_{\max} = 7.0832$$

$n = 7$,查表可得

$$RI = 1.32$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0139$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.01$$

$CR < 0.1$,因此成对比较矩阵的一致性是可以接受的,可以用 2.2.3 节中计算得到的特征向量作为权向量。

3 评价结果

3.1 各指标的分级及评分值

地下水埋深、含水层介质类型、土壤类型、包气带介质类型 4 个指标的分级及评分值见表 2。经过研究分析及征求相关专家意见,得到氯离子、总硬度和硝酸盐 3 指标的分级标准及评分值(表 4)^[10]。

需要说明的是,在选择包气带岩性分级及评分时,笔者选择的是对污染物迁移有显著影响的介质层。当多层介质存在时,各层介质的相对厚度是影响包气带岩性选择的一个因素,此外还应考虑各层介质阻滞污染物下渗能力的大小。如当包气带存在

表 4 垃圾场地区安全性评价污染物指标的分级及其评分值

质量浓度范围/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氯离子					总硬度					硝酸盐				
	≤ 50	≤ 150	≤ 250	≤ 350	> 350	≤ 150	≤ 300	≤ 450	≤ 550	> 550	≤ 2	≤ 5	≤ 20	≤ 30	> 30
评分值	1	3	5	7	10	1	3	6	8	10	2	4	6	8	10

一层黏土和一层等厚度或厚度较大的砂砾层时,选择黏土作为包气带岩性,因为黏土是限制污染物向含水层迁移的最显著的介质层面。

3.2 各指标权重

根据前面的计算得到本次评价中地下水埋深、含水层介质、土壤类型、包气带介质类型、氯离子、总硬度和硝酸盐 7 个评价指标的权重依次为 0.0962、0.0576、0.0384、0.0962、0.1923、0.2308、0.2885。

3.3 各垃圾场地区地下水安全性综合评分值

经计算,可得各垃圾场地区地下水安全性综合评分值(表 5)。根据综合评分值,综合考虑各垃圾场地区的水文地质条件及污染因子,划分出地下水安全性等级:一级区 5 个,二级区 15 个,三级区 6 个。一级区地下水安全性较高,二级区次之,三级区地下水安全性最低。

表 5 各垃圾场地下水综合评分值及安全性等级

垃圾场名称	综合评分值	地下水安全性等级	垃圾场名称	综合评分值	地下水安全性等级
狼堡	6.0379	二	西黄村	5.7497	一
瀛海	6.7309	二	福田寺	7.3653	三
看丹南	6.6921	二	北坞村西	5.6151	一
看丹北	6.9999	二	北坞村东北	6.2113	二
北天堂北	7.0767	三	北坞村东南	5.8075	一
北天堂南	7.1729	三	西冉村	7.4231	三
单店	7.8655	三	田村西	6.4421	二
沈家坟	6.3847	二	田村东	6.9037	二
沙子营西	6.1923	二	廖公庄西	6.9037	二
沙子营东	6.6539	二	廖公庄东	6.9037	二
杨庄	7.3653	三	巨山村	6.4421	二
老山西	6.9037	二	肖家河北	4.6345	一
老山东	6.4421	二	肖家河南	5.6731	一

26 处垃圾场污染物中氯离子、总硬度和硝酸盐的值均采用垃圾样浸泡 96h 后的样品测定结果。北天堂北和北天堂南用的都是北天堂 1 # 10m 井垃圾样浸泡 96h 后的样品测定结果。

4 结论与建议

4.1 结论

采用 DRASTIC 方法和模糊综合评判法相结合的地下水安全性评价方法,计算了北京市南水北调受水区 26 处非正规垃圾场地区地下水安全性评价综合评分值,并划分了各垃圾场地区地下水安全性等级,其中一级区 5 个,二级区 15 个,三级区 6 个。建议在 2014 年南水北调进京前,按照地下水安全性

5 结 语

笔者对环太湖及各水资源分区出入湖水量变化情况进行分析,结果表明,降雨、水资源调度及环太湖直接取水户取水量变化为影响环太湖出入湖水量变化的主要因素。

综合考虑各种因素对环太湖出入湖水量变化的影响后,建议建立健全水资源监控系统,提高出入湖水量测验精度,加快实施太湖水量分配方案,加强环太湖各闸的统一调度,加强取水户的取水许可监督管理,对太湖流域实施用水总量控制,提高太湖的水资源利用效率和效益,实现太湖水资源的可持续利用有着重大的意义。同时,充分发挥“引江济太”工程的作用,尤其在枯水年,适时引水,缓解该流域由于降雨不足带来了的供需矛盾,提高区域及流域水资源的保障能力。

参考文献：

[1] 黄宣伟.太湖流域规划与综合治理[M].北京:中国水利

水电出版社,2000:17.

[2] 黄贤金,王腊春,高超,等.太湖水资源水环境研究[M].北京:科学出版社,2008:2.
[3] 毛新伟,高怡,徐卫东.水文巡测方法对太湖水量平衡计算的影响分析[J].水文,2006,26(5):58.
[4] 詹道江,叶守泽.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2000:48-49.
[5] 欧炎伦,吴浩云,林荷娟,等.1999年太湖流域洪水[M].北京:中国水利水电出版社,2001:23.
[6] 张文龙,钱卫忠,戈礼宾.历年环太湖河道进出水量分析报告[R].湖州:浙江省湖州市水文站,2009.
[7] 沈国华,陈颖.太湖进出水量变化分析[J].江苏水利,2008(2):12.
[8] 何俊仕,尉成海,王教河.流域与区域相结合的水资源管理理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2006:100-102.

(收稿日期:2010-12-22 编辑:徐娟)

(上接第 47 页)

等级由低到高,即三级区、二级区、一级区的顺序,尽早尽快采取相应的治理和预防措施,确保这些地区的地下水不受或少受污染。

4.2 建议

笔者对地下水安全性评价采用的是定性定量相结合的方法,评价结果反映了垃圾场地区地下水安全性的高低。由于地下水安全性评价涉及因素较多,笔者选取了 7 个对垃圾场地区地下水安全性影响较大的因子,在垃圾场被浸泡后,垃圾中硫酸盐、高锰酸盐、溶解性总固体等对垃圾场地区地下水安全性的影响在某些垃圾场地区也将存在,由于这些因子的影响仅限于局部的垃圾场地区,评价时没有考虑。随着对地下水脆弱性概念和评价方法研究的不断深入,地下水脆弱性评价方法将日趋完善,建议届时在评价时能尽可能客观地反映地下水脆弱性状况,评价结果将具有更大的参考价值。

参考文献：

[1] 北京市地质工程勘察院.北京市南水北调受水区垃圾场控高水位项目水文地质勘察报告[R].北京:北京市地质工程勘察院,2008:100-103.

[2] 北京市水资源综合规划项目组.北京市地下水资源调查与评价[R].北京:北京市水利规划设计院,北京市水文总站,2003:31-36.
[3] GOGU R C, DASSARGUES A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods[J]. Environmental Geology, 2000, 39(6): 546-556.
[4] RUPERT M G. Calibration of the DRASTIC groundwater vulnerability mapping method[J]. Ground Water, 2001, 39(4): 623-633.
[5] DIXON B, 李大秋, EARLS J, 等.地下水脆弱性评价方法研究[J].环境保护科学, 2007, 33(5): 64-66.
[6] 杨庆, 栾茂田.地下水易污性评价方法: DRASTIC 指标体系[J].水文地质工程地质, 1999(2): 5-7.
[7] 贺新春, 邵东国, 陈南祥.地下水环境脆弱性分区研究[J].武汉大学学报:工学版, 2005, 38(1): 73-76.
[8] 吴登定, 谢振华, 林健, 等.地下水污染脆弱性评价方法[J].地质通报, 2005, 24(10): 1044-1047.
[9] 杨旭东, 孙建平, 魏玉梅.地下水系统脆弱性评价探讨[J].安全与环境工程, 2006, 13(1): 1-4.
[10] 雷静.地下水环境脆弱性的研究[D].北京:清华大学, 2002: 75-86.

(收稿日期:2010-12-03 编辑:徐娟)