

# 城市生活饮用水综合指数评价方法建立及其应用

袁东<sup>1</sup>, 陈仁杰<sup>2</sup>, 钱海雷<sup>1</sup>, 阚海东<sup>2\*</sup>

**摘要:** [目的] 从健康影响的角度出发, 建立一套适用于城市生活饮用水水质评价的综合指数方法, 并以此法评价上海市 2007 年的生活饮用水总体质量。[方法] 将评价指标分为具有不同卫生学意义的 5 大类, 在灵活选用内梅罗法、最差因子判别法计算各分类综合指数后, 根据德尔菲专家咨询法对 5 类指标进行健康赋权, 运用加权平均法计算水质综合指数, 并对 2007 年上海市集中式生活饮用水进行初步的水质评价与分析。[结果] 建立了适用于城市生活饮用水的综合指数评价体系。上海市 2007 年城市生活饮用水符合国家生活饮用水卫生标准, 市区与郊区生活饮用水水质无明显差别; 在 2007 年的 4 个季度中, 第 1 季度的水质略逊于其他 3 个季度; 经市级水厂处理过的水质最佳; 长江水是上海市相对理想的供水水源。[结论] 本研究所建立的城市生活饮用水综合指数评价法具有一定的借鉴意义和推广价值。上海市 2007 年的市区、郊区及各季度、各级水厂、各水源来源的出厂水、管网末梢水和二次供水的总体水质良好, 符合国家卫生标准。

**关键词:** 生活饮用水; 水质评价; 综合指数法

**An Integrated Index Approach Established and its Application to Evaluate Drinking Water Quality in Shanghai** YUAN Dong<sup>1</sup>, CHEN Ren-jie<sup>2</sup>, QIAN Hai-lei<sup>1</sup>, KAN Hai-dong<sup>2\*</sup> (1. Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China. 2. Department of Environmental Health, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China). \*Address correspondence to KAN Hai-dong; E-mail: haidongkan@gmail.com

**Abstract:** [Objective] In order to establish an integrated index which is suitable for evaluation of drinking water quality from the perspective of health impact assessment, and to examine the overall quality of drinking water in Shanghai in 2007. [Methods] The candidate indices were classified into five categories according to their health impacts, and each integrated index values were calculated by using Nemerow index and minimum operator, meanwhile the health-based weighting coefficients were determined by the Delphi expert consultant method, and lastly then integrated index of overall quality of drinking water in Shanghai in 2007 was evaluated and analyzed. [Results] An integrated index assessment system for drinking water was established. There was no significant difference in drinking water quality between urban and suburban areas in Shanghai in 2007. Although the drinking water quality in 2007 all meet the national standard for drinking water quality, compared with other quarters, the first quarter had the worse drinking water quality which showed significant statistic difference. Tap water supplied by municipal water plants was the best one among the whole different supply waters. And also the Yangtze River was the best water resource for drinking water in Shanghai. [Conclusion] The integrated index set in this study can be used to evaluate the drinking water quality in Shanghai and is worth promoting and expanding. Generally, the drinking water in Shanghai is good and meets the related national standards.

**Key Words:** drinking water; water quality assessment; integrated index methods

生活饮用水质量的优劣直接关系到人们的健康水平, 而选择一套科学合理的评价方法对于客观反映生活饮用水的总体质量尤为重要。近年来, 人工神经网络法、模糊评价法、物元分析法、灰色系统法等一些新的环境评价方法的提出和运用, 大大推动了饮水卫生事业的发展, 促进了人们健康水平的提高<sup>[1-4]</sup>。然而, 饮水中潜在的污染物种类繁多, 性质各异, 对人类的健康意义亦有很大的不同, 上述方法均未给以适当的考虑, 且《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)仅规定了一个限值, 并未划

[作者简介] 袁东(1969-), 男, 硕士, 副主任医师; 研究方向: 环境卫生学; E-mail: dyuan@scde.sh.cn

[\*通信作者] 阚海东教授; E-mail: haidongkan@gmail.com

[作者单位] 1. 上海市疾病预防控制中心, 上海 200336; 2. 复旦大学公共卫生学院环境卫生教研室, 上海 200032

分为若干等级, 给上述方法的合理运用带来了不小的困难。

综合指数评价法作为一种较古老的环境评价方法, 具有计算简单、意义明确和灵活性强等优点, 能对整体水质做定量描述, 只要水质检测指标与检测结果可靠, 便可以从总体上定量反映水质优劣, 而且便于在时间、空间上进行比较, 因而是一种非常适用的水质评价方法<sup>[5]</sup>。本研究从水质指标的卫生学意义出发, 拟通过灵活选取各种综合指数的计算模式, 构建一套适用于城市集中式生活饮用水水质评价的综合指数评价体系, 并以此对上海市 2007 年的生活饮用水水质作初步的评价与分析。

## 1 材料和方法

### 1.1 城市生活饮用水综合指数评价法

在水质评价领域, 常用的综合指数计算模式较多, 本文拟

选用下述计算模式<sup>[6]</sup>,逐步构建城市生活饮用水的综合指数评价体系。水质综合指数用  $WQI$  (Water Quality Index) 表示, 各分类的综合指数用  $WQI_j$  表示。

1.1.1 分指数 首先, 计算各指标的分指数 ( $Index_i, I_i$ ), 即以各指标的实测浓度除以相应的标准限值, 即:  $I_i = C_i / S_i$ , (公式1), 式中,  $C_i$  为  $i$  指标的实测浓度,  $S_i$  为相应的国家标准值。

1.1.2 最差因子判别法 该法不存在掩盖污染的问题, 可以运用于评价一些具有较大健康危害的指标, 用公式为:  $WQI_j = I_{i,\max}$ , (公式2),  $I_{i,\max}$  为分指数中的最大值。

1.1.3 内梅罗法 该法在突出最大分指数的同时, 兼顾了其他分指数对综合指数值的影响, 有重点地反映了水体中各项指标对总体水质的影响。公式为:  $WQI_j = \sqrt{[(I_{i,\text{average}})^2 + (I_{i,\max})^2]/2}$ , (公式3), 其中  $I_{i,\text{average}}$  和  $I_{i,\max}$  分别表示各分指数的均值和最大值。

1.1.4 加权平均法 在对评价指标按健康意义分类, 计算类综合指数后, 需要根据各类指标的健康影响程度, 对各分类的类综合指数进行加权综合, 以求得水体的综合评价指数。公式为:  $WQI = \sum_{i=1}^n w_i I_i$ , (公式4),  $w_i$  为各分类的相对权重值。

各分类的相对权重值由两轮德尔菲法 (Delphi 法, 又名专家咨询法) 确定。为此, 召集了 20 位在环境卫生、环境工程、毒理学、卫生化学、卫生检验、传染病控制等领域长期工作的

专家。专家权威系数平均为 0.75, 权威程度较高; 两轮专家咨询问卷回收率分别为 95%、90%, 所选择专家的积极性较高; 第 2 轮后各分类指标赋权和各级致癌指标赋权的专家意见协调系数分别为 0.66 和 0.89, 专家意见较为集中。可见, 本次专家咨询结果的可信度较高。

1.1.5 一些特殊指标分指数的计算方法 当实际分指数低于 0.10 或实测值低于最低检出值时, 一律定义分指数为 0.10。对于细菌总数, 当实测值低于限值 (100 cfu/mL) 时, 以实测值除以 100 作为分指数  $I_i$ ; 当实测值高于限值时, 按照公式  $I_i = 1.00 + \log_{10}(C_i / S_i)$  计算。

肉眼可见物若有检出, 则统一规定分指数为 1.50。臭和味按检出级数作为分指数值, 对于总大肠菌群, 若检出, 则计算方法为  $I_i = 1.00 + 0.50(n-1)$ ,  $n$  为检出个数。

对于游离性余氯, 国家标准中规定的是最低限值, 分指数按下式计算:  $I_i = C_i / S_i$ 。

对于 pH 值, 由于有上下两个限值, 因而其分指数的计算式为:  $I_i = |C_i - (S_{\max} + S_{\min})/2| / [S_{\max} - (S_{\max} + S_{\min})/2]$ , 式中,  $S_{\max}$  为上限值,  $S_{\min}$  为下限值。

1.1.6 评价级别的建立 水质以  $WQI$  是否低于 1.00 作为合格与否的标准, 具体的分级见表 1。

表 1 评价级别的划分及其意义

Table 1 The classification and explanation of water quality grades

项目 (Item)	分级 (Rank)				
	1	2	3	4	5
范围 (Scope of WQI)	0~0.50	0.51~1.00	1.01~1.50	1.51~2.00	2.00 以上
意义 Explanation	水质优良, 可放心饮用 Excellent water quality, suitable for drinking	水质较好, 可放心饮用 Better water quality, suitable for drinking	轻度污染, 可酌情饮用 Light contaminated, drinking in certain condition	中度污染, 深度处理且检验合格后方能饮用 Medium contaminated, drinking after deep treatment and acceptance test	重度污染, 一般不宜饮用 Sever contaminated, not suitable for drinking

## 1.2 上海市生活饮用水综合指数评价

对上海市所有自来水水厂的出厂水均各设一个采样点, 管网末梢水和二次供水均按各区人口数每 2 万人设 1 个采样点。采样范围覆盖全市所有区县、所有水源来源、各类水厂, 每季度采样一次。水样的采集、保存、实验室分析方法及质量控制参考《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)。样品检测由各区县疾病预防控制中心自主完成, 市疾病控制预防中心负责督导, 技术培训和汇总全市的水样检测数据。本研究基于 2007 年的检测数据进行评价, 评价标准参考国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

## 2 结果

### 2.1 城市生活饮用水综合指数评价体系

有机污染类指标、一般毒性指标和各类致癌性指标, 由于其对健康的危害较大, 均采用最差因子判别法; 感官和一般化学类指标, 由于其仅影响生活饮用水的感官性状, 并不能对居民健康产生显著的危害, 宜采用内梅罗法进行评价; 最后采用加权平均法对各分类的类综合指数进行加权综合。出于人、财、物力的考量, 2007 年上海市仅对城市集中式生活饮用水供水体系的出厂水、管网末梢水和二次供水分别监测了 29、16、16 项指标。运用德尔菲赋权法, 对各分类指标进行专家赋权, 见表 2。

表 2 出厂水、末梢水和二次供水指标分类和权重系数

Table 2 Categorization of indices and their weight coefficients of processed, tap water and secondary water supply

分类 Categorization	出厂水 Processed water	末梢水和二次供水 Tap water and secondary water supply	权重 Weighting coefficients
感官和一般化学指标 Sensory and chemical indices	色度、浑浊度、pH、总硬度、铝、铁、锰、挥发酚类、阴离子合成剂、硫酸盐、氯化物 Colority, turbidity, pH, total hardness, Al, Fe, Mn, volatile phenols, anionic synthetic detergent, sulfate, chloride	色度、浑浊度、臭和味、肉眼可见物、铁、锰 Colority, turbidity, odour and taste, visible matters with the naked eye, Fe, Mn	0.10
有机污染指标 Organic pollution indices	耗氧量、氨氮、亚硝酸盐、硫酸盐、总有机碳 COD, ammonium nitrogen, nitrite nitrogen, sulfate, TOC	耗氧量、氨氮、亚硝酸盐 COD, ammonium nitrogen, nitrite nitrogen	0.15
致癌指标 Carcinogen indices	I 类: 铅、铬; II A 类: 硝酸盐氮; II B 类: 铅、氯仿、四氯化碳; III 类: 氯化物、汞 Class I : As, Cr; Class II A: nitrate nitrogen; Class II B: Pb, chloroform, carbon tetrachloride; Class III: chloride, Hg	II A 类: 硝酸盐氮; II B 类: 铅、氯仿、四氯化碳; III类: 氯化物、汞 Class A: Nitrate nitrogen Class B: Pb, chloroform, carbon tetrachloride Class III: chloride, Hg	0.32; 其中: I类 0.50, II A类 0.30, II B类 0.14, III类 0.06 0.32; including: Class I 0.50, Class II Class B: Pb, chloroform, carbon tetrachloride A 0.30, Class II B 0.14, Class III 0.06
一般毒性指标 Generally toxic indices	砷、铬、硝酸盐氮、铅、氯仿、四氯化碳、氯化物、汞、氰化物 As, Cr, nitrate nitrogen, Pb, chloroform, carbon tetrachloride, chloride, Hg	硝酸盐氮、铅、氯仿、四氯化碳 Nitrate nitrogen, Pb, chloroform, carbon tetrachloride	0.20
肠道传染病指标 Enteric infection indexes	细菌总数、总大肠菌群、游离余氯 Total bacterial count, total coliform bacteria, free residual chlorine	细菌总数、总大肠菌群、游离余氯 Total bacterial count, total coliform bacteria, free residual chlorine	0.23

表2中的“致癌指标”的选择参考国际癌症研究中心的致癌物分类<sup>[7]</sup>, 致癌性指标全部包括在一般毒性指标之中, 强调了毒物的致癌毒性。

## 2.2 分类别的综合指数计算结果

运用公式(1)~(4), 计算出全部生活饮用水水样的综合指数。然后, 把全部综合指数按照市区与郊区、四个季度、不同原水和水厂的5种级别以及出厂水、管网末梢水和二次供水分为不同的类别, 计算出每一类别水样的综合指数均值及标准差( $\bar{x} \pm s$ ), 如表3所示。

## 2.3 市区与郊区的饮用水水质分析

表3显示, 郊区与市区的出厂水、管网末梢水和二次供水的平均综合指数值均在0.51~1.00之间, 总体水质较好, 合格率均较高, 并且市区与郊区差别无统计学意义。

## 2.4 四个季度的饮用水水质分析

表3显示, 四个季度的各种生活饮用水水质均合格, 其中

二次供水的水质在第2、3、4季度还达到了优良的标准; 第一季度水质均较差, 出厂水的综合指数值甚至达到了0.90, 接近水质合格的限值, 明显劣于其他三个季度; 随着季度的后移, 生活饮用水水质有渐好的趋势。水样的水质合格率也可反映出这一明显趋势。

## 2.5 不同水源来源的饮水水质分析

表3显示, 总体上, 取自各水源的三种生活饮用水水质均合格, 但不同水源的饮用水水质有所不同, 由优至劣顺序大致为: 长江、深井、黄浦江、就近河道。其中源于长江的生活饮用水几乎都达到了优良标准, 水质合格率居各原水之首。

## 2.6 不同级别水厂处理过的饮用水水质分析

表3显示, 总体上, 经各种水厂处理过的水质均符合要求, 但经不同级别水厂处理后的水质合格率差别较大。水质由优至劣大致为: 市级、区县级、唧站、单位自备级、乡镇级。水样水质的合格率亦反映了这种优劣关系。

表3 不同水样类别的平均综合指数值与合格率

Table 3 Average comprehensive index values and qualified rates of various categories of water samples

分类 Categories		出厂水 Processed water			管网末梢水 Tap water			二次供水 Secondary water supply		
		$\bar{x} \pm s$	合格率(%) Qualification rate	样本含量 Sample size	$\bar{x} \pm s$	合格率(%) Qualification rate	样本含量 Sample size	$\bar{x} \pm s$	合格率(%) Qualification rate	样本含量 Sample size
市、郊区 Areas	市区(Urban)	0.77 ± 0.25	85	47	0.57 ± 0.22	97	717	0.54 ± 0.21	96	549
	郊区(Suburb)	0.78 ± 0.31	87	636	0.57 ± 0.19	95	949	0.54 ± 0.20	96	597
季度 Quarters of 2007	1(The first)	0.90 ± 0.51	67	172	0.70 ± 0.26	89	410	0.67 ± 0.29	87	288
	2(The second)	0.70 ± 0.28	85	169	0.53 ± 0.17	98	411	0.50 ± 0.20	98	286
	3(The third)	0.71 ± 0.37	89	171	0.52 ± 0.18	97	413	0.48 ± 0.16	98	287
	4(The fourth)	0.65 ± 0.25	83	170	0.52 ± 0.27	97	413	0.48 ± 0.25	97	286
水源 Water resources	深井(Deep wells)	0.63 ± 0.26	90	112	0.47 ± 0.18	100	52	0.39 ± 0.21	100	12
	长江(Yangtze River)	0.51 ± 0.24	98	76	0.47 ± 0.12	99	235	0.43 ± 0.12	100	200
	黄浦江(Huangpu River)	0.78 ± 0.25	85	119	0.57 ± 0.18	97	871	0.55 ± 0.21	97	660
	就近河道(Rivers nearby)	0.81 ± 0.44	78	376	0.63 ± 0.26	88	380	0.58 ± 0.31	92	196
水厂分级 Rank of water factories	市级(Municipal level)	0.59 ± 0.16	97	60	0.55 ± 0.18	98	684	0.52 ± 0.18	98	712
	区县级(District level)	0.68 ± 0.38	87	184	0.56 ± 0.20	94	440	0.55 ± 0.26	95	256
	唧站(Pumping station)	0.79 ± 0.30	86	43	0.57 ± 0.32	95	327	0.57 ± 0.46	91	80
	单位自备级(Unit self use)	0.78 ± 0.38	89	220	0.61 ± 0.32	87	16	—	—	—
	乡镇级(Township level)	0.79 ± 0.42	81	268	0.64 ± 0.30	89	175	0.56 ± 0.34	90	100

[注]合格率为综合指数值达到1或2级标准的水样占全部水样的比例; 唧站就是水库泵站, 没有水厂的水处理设备, 只进行加压或简单的再消毒。

[Note] Qualification rate is the proportion of water samples whose integrated index meets standard 1 or 2 among total water samples. Because of no traditional water treatment equipments, pumping station only increase the pressure of drinking water in pipe and carry out simple disinfection.

## 3 讨论

本研究中所有评价指标被分为具有不同卫生学意义的五大类, 笔者运用德尔菲专家咨询法对其进行健康赋权, 然后在灵活选用内梅罗法、最差因子判别法计算各分类综合指数后, 运用加权平均法计算水质综合指数, 使得综合评价结果具有十分明确的健康意义。本研究所建立的城市饮用水水质综合指数评价体系具有一定的借鉴和推广意义, 对评价指标进行适当的增删, 就可运用于国内外其他城市集中式生活饮用水的水质评价。然而, 值得注意的是, 加权平均法虽然是一种被广泛使用的综合指数计算方法<sup>[8]</sup>, 但在专家的遴选等方面会给赋权带来较大的不确定性<sup>[9]</sup>, 还会不可避免地使综合指数值低于计算值最大的类综合指数, 从而有可能会掩盖污染。

分析结果显示, 上海市2007年各区县、各季度、各级别水

厂、各种水源的出厂水、管网末梢水和二次供水的总体水质是合格的。但仍有部分水样的水质不合格, 主要由耗氧量、氨氮、有机碳等有机污染指标以及游离氯等消毒剂指标超标所致, 以致上述各分类评价结果出现了一些变化趋势, 其可能与以下方面因素有关。

从各季度来看, 第1季度的水质要明显劣于其他季度。可能是枯水期时(冬春之际, 降水和上游来水偏少)河流对污染物的稀释不够所致, 也可能是春季化肥的使用较多, 加大了农业有机污染的程度, 从而影响到河流原水的水质。因而, 应在第1季度加强水源的污染治理, 加大水厂的水处理力度, 以保证集中式供水的质量。

从各水源来看, 以长江水和深井水为水源的水厂, 经常规处理后的水质要明显优于以黄浦江和就近河道为水源的水厂。

这对当前的水源地建设有着重要意义。以深井水为原水的生活饮用水水质稍劣于长江水，而且由于长期滥采地下水等原因，上海面临严峻的地面下沉的问题<sup>[10]</sup>，显然，深井水不宜作为上海市理想的集中式供水水源。黄浦江作为目前上海市主要的饮用水源，自 20 世纪 80 年代以来，污染趋重。在黄浦江中下游沿江地区，有高达 75% 的污水直接排入，上海郊区的工农业废水也有 50% 呈直排状态<sup>[11]</sup>。就近河道，取水方便，但流量低，常常是沿线工农业污水和生活废水的直接排放地。在本研究中，以黄浦江和就近河道为水源的生活饮用水水质均较差，也反映了水源受到一定污染的事实。长江口淡水资源丰沛，水体自净能力很强，而且从水质评价结果来看，以长江为水源的生活饮用水水质也是最佳的。因此，长江是上海市相对理想的集中式供水水源，政府宜加强长江口的源水工程建设，保护上海市居民的饮水健康。

从水厂的级别来看，经市级水厂处理后的水质要明显优于区县级、唧站级、单位自备级和乡镇级的水厂。一般市级水厂在水源地选择，水处理技术与设备、监督管理等软硬件方面，会优于其他级别的水厂，因此相对而言，经市级水厂处理后的水质是最安全的，应提倡大力建设。在市级水厂的输配水网络尚未完全覆盖的情况下，还应加强区县级和乡镇级水厂的技术指导，设备更新与日常监督管理，努力提升其水处理效果并适时优化其水源来源，同时还应在唧站尽可能地进行氯化消毒，以改善水质。另外，从现有评价结果看，单位自备供水的水质并非最佳，不宜提倡广泛使用，以杜绝资源的浪费。

从生活饮用水的不同分段来看，本研究的结果显示，出厂水的水质要普遍劣于管网末梢水和二次供水，与实际情况不太符合。原因可能在于出厂水与管网末梢水、二次供水的检测指标不一致造成的，前者有 29 项指标，后者仅有 16 项指标。检测指标的不一致可能会对评价结果的比较造成系统的误差，因而需要在以后的工作中引起特别注意。另外，在本研究中，由于纳入评价的水质参数较少，仅凭 2007 年的数据尚难以准确

地评价上海市生活饮用水水质的全貌。

#### 参考文献：

- [1] 朱长军, 李文耀, 张普. 人工神经网络在水环境质量评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2005, 31(2): 27-29.
- [2] 朱雷, 陈威. 模糊综合指数法在水质评价中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 61-65.
- [3] 门宝辉, 梁川. 水质量评价的物元分析法[J]. 哈尔滨工业大学学报[J], 2003, 35(3): 358-361.
- [4] 郑建青. 水环境质量评价的灰色局势决策法[J]. 科技与管理, 2003, 5(3): 29-31.
- [5] 梁德华, 蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一和改进[J]. 中国环境监测, 2002, 18(2): 63-66.
- [6] 陈仁杰, 钱海雷, 阚海东, 等. 水质评价综合指数法的研究进展[J]. 环境与职业医学, 2009, 26(6): 581-584.
- [7] International Agency for Research on Cancer. Overall evaluations of carcinogenicity to humans: list of all agents, mixtures and exposures evaluated to date [EB/OL].[2008-10-25]. http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/crthall.php.
- [8] KANG S M, KIM M S, LEE M. The trends of composite environmental indices in Korea[J]. J Environ Manage, 2002, 64(2): 199-206.
- [9] GIANNETTI B F, BONILLA S H, SILVA C C, et al. The reliability of experts' opinions in constructing a composite environmental index: the case of ESI 2005[J]. J Environ Manage, 2009, 90(8): 2448-2459.
- [10] 肖功衍, 储征伟. 浅表地下水水位变化对地面沉降的影响[J]. 城市勘测, 2007(4): 52-53.
- [11] 杨君予, 张辉. 黄浦江江水及底质汞污染状况调查[J]. 中国公共卫生, 2006, 22(7): 828.

(收稿日期: 2009-04-15)

(编辑: 洪琪; 校对: 丁瑾瑜)

#### 【告知栏】

## 哥白尼索引 (IC) 对本刊 2009 年的最新评价数据

波兰哥白尼索引 (Index of Copernicus, IC) 是由 Medical Science International 创办的收录医药学、生物学等信息的国际知名检索系统，是一个新的通向科学信息的世界性门户，其受众主要有学术研究者、临床医生、相关政府机构等。该数据库网址为 <http://www.indexcopernicus.com>。本刊自 2007 年开始被该数据库收录，于 2010 年 1 月该数据库发布了最新评价报告 (Index Copernicus Journal Evaluation Report in year 2009)，结果显示：2009 年本刊评价结果 (IC Value) 为 4.40，与 2007 年和 2008 年 IC Value (3.24 和 4.00) 比较又有所提高。

衷心感谢广大国内外专家学者、作者及读者多年来给予本刊的长期关注和积极支持！

《环境与职业医学》编辑部