

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.007

量值异质性统计模型评估我国地方饮用水水质标准

郑 蓓, 李红岩, 王 新, 龚迪慧, 李 洁

(中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘 要: 建立了水质标准量值异质性统计模型,利用算术加和、Sørensen-Dice index、Kendall correlation、限值比值等统计学手段,分析了上海、张家口、深圳和海口的饮用水水质标准与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)、世界卫生组织颁布的 *Guidelines for Drinking-water Quality*、美国环保局颁布的 *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables* 之间的数量异质性和限值异质性。结果显示,地方标准与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的异质性最小,异质指标主要为微生物、消毒副产物、内分泌干扰物和兴奋剂等指标,同质指标中约29%的指标限值低于(GB 5749—2022),70%指标的限值一致。在国际准则/标准中,地方标准与美国环保局颁布的饮用水标准更相似,异质指标主要为农药和大宗化学品,60%的同质指标限值低于国际准则/限值。

关键词: 饮用水; 水质标准; 指标差异; 异质性分析; 统计模型

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0040-09

Quantitative Heterogeneity Statistical Model for Assessment of Local Drinking Water Quality Standards in China

ZHENG Bei, LI Hong-yan, WANG Xin, GONG Di-hui, LI Jie

(State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: A water quality quantitative heterogeneity statistical model was established to analyze the quantitative heterogeneity and limit values heterogeneity among the local drinking water quality standards (Shanghai, Zhangjiakou, Shenzhen and Haikou) and the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022), the *Guidelines for Drinking-water Quality* issued by the World Health Organization, and the *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables* issued by the U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) through the statistical methods such as arithmetic addition, Sørensen-Dice index, Kendall correlation and ratios of standard limits. The heterogeneity between the local standard and the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022) was minimal. The heterogeneous indexes were mainly microorganisms, disinfection by-products, endocrine disruptors and stimulants. Approximately 29% of the homogeneous indexes had lower limit values than those specified in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022), and 70% of the indexes had consistent limit values. Compared to the international regulations/standards, the local standards referenced more to the

基金项目: 中国科学院关键技术人才项目(E1Y1880101); 中国科学院技术支撑人才项目(E1Y1880103)

通信作者: 李红岩 E-mail: hyli@rcees.ac.cn

drinking water standards issued by the USEPA, the heterogeneous indicators were mainly pesticides and bulk chemicals, and the limits of 60% of the homogeneous indicators were lower than the international guidelines/limits.

Key words: drinking water; water quality standards; difference of index; heterogeneity analysis; statistical model

饮用水水质标准不仅是水质安全的保障,也是安全水质的客观化体现。为了更好地监测饮用水水质、控制污染传播,世界卫生组织和大部分国家都建立了饮用水水质准则/标准,集中实施水质监管或建议^[1-2]。我国在 2022 年 3 月发布了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)(简称新国标),在指标类别和限值两方面都提出了更高要求。当前国际上最具权威性、广泛被借鉴的水质标准是世界卫生组织颁布的 *Guidelines for Drinking-water Quality* (ISBN 978-92-4-004506-4)(简称 WHO)和美国环保局(USEPA)颁布的 *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables* (EPA 822-F-18-001)(简称 EPA),代表了饮用水水质管理的最高水平^[1]。

上海市为适应建设卓越全球城市和社会主义现代化国际大都市的战略发展需求,2018 年率先颁布了我国第一个地方性饮用水标准——《生活饮用水水质标准》(DB 31/T 1091—2018);张家口市为做好第 24 届北京冬季奥运会保障工作,2019 年颁布了《生活饮用水水质标准》(DB 1307/T 286—2019);深圳市为提升水质管理力度,在 2020 年颁布了《生活饮用水水质标准》(DB 4403/T 60—2020);海口市为构建高品质饮用水体系、支撑中国(海南)自由贸易试验区建设,于 2021 年颁布了《生活饮用水水质标准》(DB 4601/T 3—2021)。

“四地”标准(上海、张家口、深圳、海口地方性饮用水水质标准的总称)实施后,王卓等^[3]从水质指标结构、限值及实施前后水质状况等层面进行探讨,对我国其他城市和地区地方性水质标准的制定具有重要意义。但上述分析都是不同标准之间水质指标类别及其限值的描述性比较,而水质标准的制定不仅要综合当地供水特点和风险,还有必要在现行国家标准和国际高水平标准的指标数量、类别及其限值分布基础上,分析彼此的差异,再结合水源与技术发展水平统筹规划才更符合当地国计民

生的需求^[4]。

标准间的比对如果只停留在小范围内指标数量差异分析,对新标准制定的参考与水质管理改善的价值会大幅降低^[5]。量值异质性是在统计学基础上通过数学计算获得两组数据的重合程度,进而体现彼此差异的方法^[6]。Winckel 等^[5]率先利用量值异质性的方法,以 WHO 为基准,对巴西、澳大利亚、加拿大等国的饮用水水质标准和地表水水质标准进行量值(数量和限值)统计,利用 Sørensen-Dice index(SDI)、Kendall correlation、限值比等方法揭示了国际水质标准间的异质性规律,为全球水质标准制定提供了参考。笔者借鉴国际间水质标准异质性分析方法^[5],建立了量值异质性统计模型,首次利用统计学方法进行“四地”标准与新国标、EPA 和 WHO 标准/准则间的数量异质性和限值异质性的比较,用于水质标准发展态势评估,形成大数据链条,为其他地方饮用水水质标准的制定提供依据。

1 数据和方法

1.1 模型的组成单元

量值异质性模型中的单元包括“四地”标准、新国标、WHO 和 EPA。我国的饮用水标准中各项指标均有限值,WHO 与 EPA 中部分指标因在发达国家已被禁用,或在水中可能存在的浓度远低于对人体产生毒害作用的浓度,但仍存在风险而未规定指导值/限值^[7]。本研究根据计算模型的需求进行限值/无限值指标的统计分析。

1.2 数量异质性统计方法

1.2.1 整体指标数量算术加和

数量算术加和是对饮用水水质准则/标准中的指标数量进行累加计算,包括 WHO、EPA 中无限值/指导值的指标和我国饮用水标准附录 A 中的指标。该统计方法用于整体指标数量的异质性统计。

1.2.2 SDI 计算

SDI 是将“四地”标准分别与新国标、WHO、EPA 中同质指标组成“标准对”,共形成 12 组数据。根据

文献报道^[5,8],利用R语言中的 `dist.binary()` 函数进行计算。SDI值越接近1,说明两个水质准则/标准的类别数量相似性越好^[5,8]。该方法根据SDI值进行指标类别的数量异质性统计。

1.2.3 异质指标数量占比计算

异质指标是相对其他标准/准则的“独有指标”,与之对应的是“同质指标”,即与其他标准的共有指标。异质指标数量占比计算针对有限值/指导值的指标开展,详见式(1)。根据文献报道的方法^[5],将指标类别分为有机物[消毒副产物(DBPs)、农药、大宗化学品、内分泌干扰物、致嗅物质、兴奋剂]和非有机物(金属/类金属、离子型化合物、消毒剂、感官理化、微生物)。本研究在异质指标数量占比计算的基础上,统计出“四地”标准相对于新国标、WHO、EPA的异质指标数量。

$$\varepsilon = \frac{A}{B} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ε 为异质指标数量占比; A 为异质指标数量; B 为同类别指标数量总和。

1.3 限值异质性统计方法

1.3.1 Kendall correlation 计算

在“同质指标”基础上,进行指标限值的异质性分析,考虑到水质标准/准则限值区间可能存在无法形成正态分布且具有稳健性和小样本量的特性,该情况下SDI并不适用,为此选取Kendall correlation表征水质标准之间的限值相似性,利用R语言中的 `cor()` 函数进行计算^[5]。

1.3.2 限值区间中位值计算

统一选取水质标准/准则中同质化学指标,绘制限值区间图,并计算限值中位值^[5]。

1.3.3 限值间比值计算

按有机物指标与非有机物指标进行分类^[5],从中选取“四地”标准分别与新国标、WHO、EPA中浓度单位为mg/L的同质指标的限值与指导值进行比值计算,详见式(2)。

$$\zeta = \frac{D}{I} \quad (2)$$

式中: ζ 为限值与指导值间的比值; D 为“四地”标准限值; I 为新国标、WHO、EPA中指标限值/指导值。

ζ 越接近1,说明标准间的限值/指导值的异质性越小,相似性越好; $\zeta > 1$,表示“四地”标准的限值

大于新国标或WHO或EPA中的限值; $\zeta < 1$,表示“四地”标准中的限值小于新国标或WHO或EPA中的限值; $\zeta = 1$,表示“四地”标准中的限值等于新国标、WHO和EPA中的限值。

2 结果与讨论

2.1 数量异质性分析

数量异质性包括整体指标数量异质性和类别数量异质性,反映标准适用范围内该地域的水质需求和检测能力。目前多采用某一类别的数量差异进行比较,标准之间的差异程度和异质指标或同质指标的占比情况未见合理的客观表达,仍停留在主观估量的状态。

2.1.1 整体指标数量异质性

水质标准/准则中指标的整体数量可以反映当地经济水平、水质安全保障程度和检测能力^[2]。图1为整体指标数量异质性统计结果。

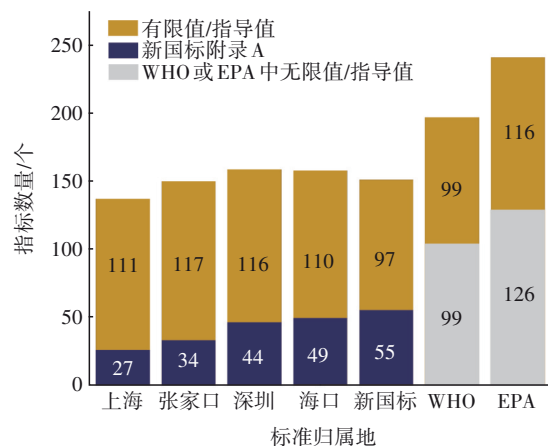


图1 整体指标数量异质性统计结果

Fig.1 Statistical results of heterogeneity for the overall water quality indexes

由图1可知,“四地”标准指标数量与新国标最接近,其中指标项数最少的是上海,共计138项,深圳最多达到160项。新国标附录A与WHO、EPA中无限值/指导值的指标,都是基于饮用水中的浓度远低于健康问题而现有风险评估资料尚不足以列入正式标准的考虑来设定的。与国际标准/准则不同的是,新国标对附录A中的55项指标设定了限值,在实际工作中可参考使用,但不具有强制性。EPA强制标准外列入非强制性的二级标准中15项指标设有限值,也只针对水中会对美容(皮肤、牙齿)或感官(如色、嗅、味)产生影响的污染物,而我国新国标附录A中的指标涵盖农药、消毒副产物、大宗化学

品、微生物、金属、放射性物质等多种毒理性污染物。因此,从指标整体数量异质性来看,虽然美国的水质标准引领全球,但我国水质检测能力以及对水质安全、健康的管控程度已处于国际领先水平。

2.1.2 类别数量异质性

类别数量异质性是根据标准中有机物或非有机物指标的数量来掌握不同地域的水质安全保障门槛。SDI和异质指标占比是主要的分析手段,其中SDI是通过数学统计形式体现两组数据数量相似性的方法,SDI值越接近1,说明异质性越小,标准之间同质指标数量较多。图2为地方标准与不同水质标准间SDI值统计结果。

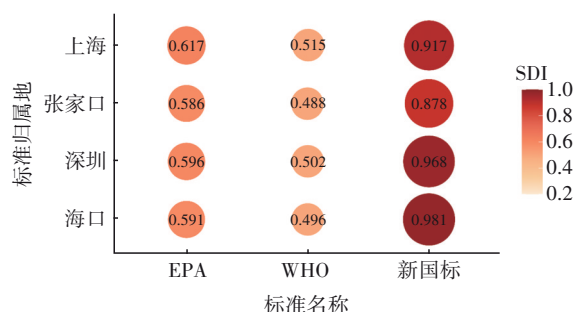


图2 地方标准与不同水质标准间SDI值统计结果

Fig.2 SDI statical results between the local standards and GB 5749-2022, WHO and EPA

“四地”标准与新国标的SDI均值为0.9,在12组数据中最接近1,其中海口与新国标的同质指标数量最多。“四地”标准与WHO的SDI均值为0.5,与EPA的SDI均值为0.6。相比而言,“四地”标准与EPA的相似性略高,其中上海与EPA的同质指标数量最多。SDI统计结果显示,国家标准引领和推动各地水质发展,“四地”标准与新国标具有较好同源性的原因在于制定时均引用了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),该标准自2007年全面实施以来,极大地推动了我国水质监管、处理工艺技术水平 and 检测能力等方面的提升。同时还可以发现,“四地”标准较侧重于对EPA的借鉴。

异质指标数量占比统计结果如图3所示。“四地”标准相对于新国标的非有机物异质指标占比均值为6.92%,有机物异质指标占比均值为5.78%;相对于WHO的非有机物异质指标占比均值为60.70%,有机物异质指标占比均值为57.22%;相对于EPA的非有机物异质指标占比均值为25.19%,有机物异质指标占比均值为47.49%。从异质指标

占比结果来看,“四地”标准与新国标的异质性最小,与SDI分析结果相符。值得注意的是,SDI分析表明,“四地”标准借鉴EPA较多,从异质指标数量的比例分析结果来看,“四地”标准主要借鉴EPA的非有机物指标。

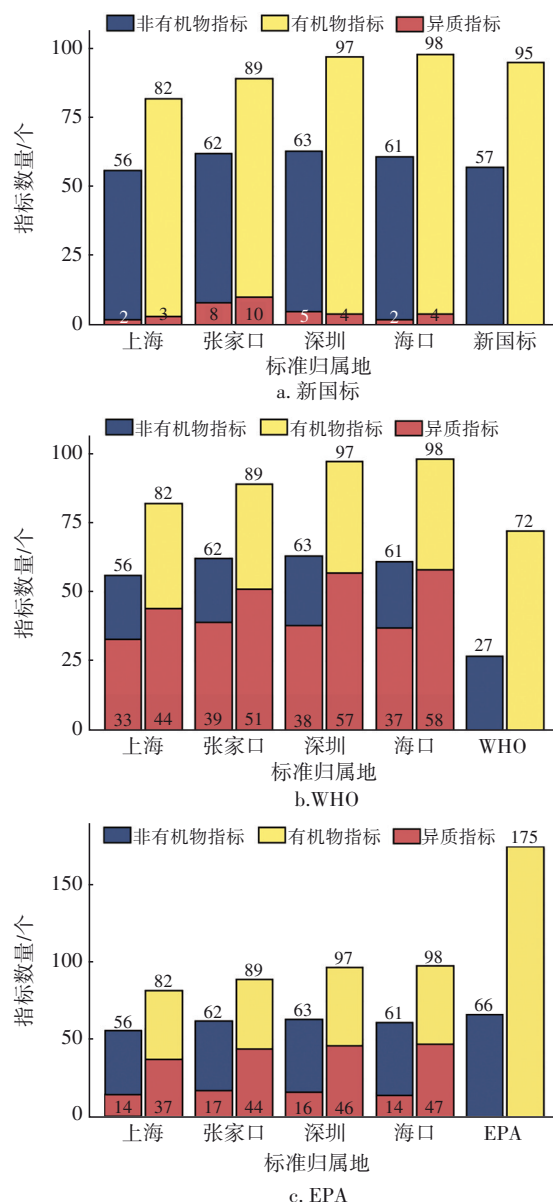


图3 异质指标数量占比统计

Fig.3 Proportions of heterogeneous indexes among the local standards

从异质指标的类别和数量分析结果来看,“四地”标准的非有机物指标中异质性最大的是微生物指标,表现为铜绿假单胞菌(致病菌)、粪链球菌(污染指示菌)、桡足类(病原体携带者)等,如表1所示。这种差异反映出地方水质标准向着直饮水方向迈

进的管理意识十分强烈^[9],引领了国内水质发展前沿。

表 1 地方标准相对于新国标、WHO 和 EPA 的非有机物异质指标数量统计

Tab.1 Statistics analysis of non-organic heterogeneous indexes in the local standards relative to GB 5749-2022, WHO and EPA

种类	数量	异质指标名称	
		新国标不存在	WHO 和 EPA 均不存在
金属/类金属 ^[10]	5	锶 ^Z 、锂 ^Z	六价铬 ^A 、钒 ^H 、铊 ^Z 、钼 ^A
离子型化合物 ^[11]	5	偏硅酸 ^Z 、硼酸盐 ^Z	偏硅酸 ^Z 、硫化物 ^A 、硼酸盐 ^Z 、碘化物 ^{E/H} 、氯化氰 ^A
感官指标 ^[12]	4	气味/TON ^E	臭和味 ^A 、肉眼可见物 ^A 、总硬度 ^A
消毒剂 ^[13]	1	无	臭氧 ^A
微生物 ^[9]	10	铜绿假单胞菌 ^Z 、粪链球菌 ^Z 、梭状芽胞杆菌 ^A 、粪链球菌 ^Z 、肠球菌 ^A 、梭状芽胞杆菌 ^E 、耐热大肠菌群 ^A 、军团菌 ^{E/H} 、铜绿假单胞菌 ^{E/H}	菌落总数 ^A 、产气荚膜梭状芽胞杆菌 ^A 、粪链球菌 ^Z 、肠球菌 ^A 、梭状芽胞杆菌 ^E 、耐热大肠菌群 ^A 、军团菌 ^{E/H} 、铜绿假单胞菌 ^Z
注: A 代表上海、张家口、深圳、海口;S 代表上海;Z 代表张家口;E 代表深圳;H 代表海口。			

有机物异质指标数量最多的是农药(主要表现为杀虫剂、杀菌剂)和大宗化学品,见表 2,反映出当地农业和工业排放引发的水质污染态势。“四地”标准中较具有特色的有机物异质指标是致嗅物质(藻类或放线菌等微生物代谢产生土霉味致嗅物质、腥臭味硫醚物质)、有机物综合指标、兴奋剂(肾上腺类神经兴奋剂),前两者是饮用水在安全基础上追求高品质、好口感的体现。兴奋剂指标虽是为国际赛事而设立的,但是其中的莱克多巴胺、克伦特罗等作为瘦肉精在畜牧业中仍有应用,因此将其列入水质管理更有益于健康保障。

综上所述,“四地”标准与国内/国际标准中的金属/类金属同质指标数量最高,表明其对水质的影响在国内/国际是普遍被认同的,其检测能力较易达到也是异质性小的重要原因。有机物异质指标占比多,以农药为主,还包括了大宗化学品、消毒副产物、内分泌干扰物、兴奋剂和有机物综合指标。导致其异质性的原因在于对大量有害有机物风险的记录和理解有限,同时需要灵敏度高、价格昂贵的分析设备支撑,后期的持续监测运行成本也制约了指标的设立^[6]。

表 2 地方标准相对于新国标、WHO 和 EPA 的有机物异质指标数量统计

Tab.2 Statistics analysis of organic heterogeneous indexes in the local standards relative to GB 5749-2022, WHO and EPA

类别	数量	异质指标名称	
		新国标不存在	WHO 和 EPA 均不存在
消毒副产物 ^[14]	5	二氯一碘甲烷 ^{E/H} 、N-二甲基亚硝胺 ^{S/Z}	三氯乙醛 ^A 、碘乙酸 ^{E/H} 、二氯一碘甲烷 ^{E/H} 、甲醛 ^A
农药 ^[15]	20	二溴乙烯 ^{A-4} 、异丙隆 ^{A-1}	六六六 ^{A-2} 、溴氰菊酯 ^{A-2} 、敌百虫 ^{Z/E/H-2} 、乙酰甲胺磷 ^{A-2} 、乙草胺 ^{E/H-1} 、西草净 ^{E/H-1} 、甲基硫菌灵 ^{E/H-3} 、稻瘟灵 ^{Z/E/H-3} 、甲霜灵类 ^{Z/E-3} 、戊二醛 ^{A-3} 、氯化乙基汞 ^{A-3} 、五氯丙烷 ^{A-4} 、二溴乙烯 ^{A-4} 、马拉硫磷 ^{A-2} 、对硫磷 ^{A-2} 、灭草松 ^{A-1} 、甲基对硫磷 ^{A-2} 、百菌清 ^{A-3} 、敌敌畏 ^{A-2}
致嗅物质 ^[16]	4	无	2-甲基异苧醇 ^A (土霉味)、土臭素 ^A (土霉味)、二甲基二硫醚 ^{E/H} (腥臭味)、二甲基三硫醚 ^{E/H} (腥臭味)
大宗化学品 ^[17]	14	无	四乙基铅 ^A 、丙烯腈 ^A 、丙烯酸 ^A 、丙烯醛 ^A 、环烷酸 ^A 、苯甲醚 ^A 、β-萘酚 ^A 、丁基黄原酸 ^A 、阴离子合成洗涤剂 ^A 、石油类 ^A 、多环芳烃(总量) ^A 、硝基苯 ^A 、全氟辛酸 ^{S/Z} 、全氟辛酸磺酸 ^{S/Z}
内分泌干扰物 ^[18]	6	壬基酚 ^{Z/E} 、雌二醇 ^Z 、己烯雌酚 ^Z	双酚 ^A 、壬基酚 ^{Z/E} 、雌二醇 ^Z 、己烯雌酚 ^Z 、邻苯二甲酸二乙酯 ^A 、邻苯二甲酸二丁酯 ^A
兴奋剂 ^[19]	4	克伦特罗 ^Z 、沙丁胺醇 ^Z 、莱克多巴胺 ^Z 、特布他林 ^Z	克伦特罗 ^Z 、沙丁胺醇 ^Z 、莱克多巴胺 ^Z 、特布他林 ^Z
有机物综合指标 ^[20]	3	可同化有机碳(AOC) ^H	可同化有机碳(AOC) ^H 、总有机碳 ^A 、高锰酸盐指数 ^A
注: A 代表上海、张家口、深圳、海口;S 代表上海;Z 代表张家口;E 代表深圳;H 代表海口;1 代表除草剂;2 代表杀虫剂;3 代表杀菌剂;4 代表熏蒸剂。			

2.2 限值异质性分析

若饮用水水质标准制定过严则经济成本高,制定过松则存在人群疾病负担过高的风险。目前标准之间的限值分析仅为小范围内量值大小的比较,缺乏客观统计手段来体现同质指标在不同标准体系下的差异性。限值异质性统计采用的方法为Kendall correlation、限值中位值计算和限值比值计算。Kendall correlation与SDI值类似,是用来对比两个数据组异同的统计方法,仍以1为分界,与SDI不同的是,它是从限值的角度表达标准之间的相似程度^[5]。图4为不同水质标准间的Kendall correlation统计结果。可以看出,“四地”标准限值与新国标的Kendall correlation均值为0.85,与WHO和EPA的均值分别为0.79和0.51。可见“四地”标准与新国标和WHO的限值相似性较高,与EPA限值差异明显。为进一步剖析整体限值区间与不同类别指标限值的差异,在Kendall correlation基础上进行限值区间中位值和限值间比值计算。

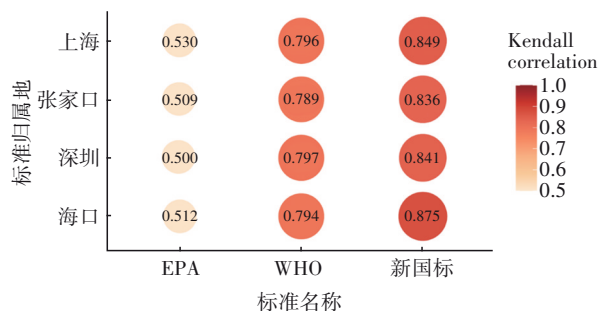


图4 不同水质标准间的Kendall correlation统计结果

Fig.4 Kendall correlation statistical results between different water quality standards

限值区间中位值可以反映标准/准则的整体限值水平,由于中位值不同于平均值,区间内极大值或极小值不影响统计结果,数值越低,意味着标准/准则对指标的要求越严格^[5]。不同水质标准/准则限值中位值的异质性统计结果如图5所示。可以看出,WHO限值中位值最低(0.02 mg/L),EPA限值中位值最高(0.06 mg/L)。EPA作为国际上最领先的水质标准,其指标数量和结构都代表当前世界上最高监管要求,而WHO是以健康风险为基础的基准指导值。此次分析发现,“四地”标准的中位值与新国标和WHO更为接近,尤其海口和深圳,也说明“四地”在检测能力和监管力度等方面都向健康风险的基准靠拢,已达到国际领先水平。

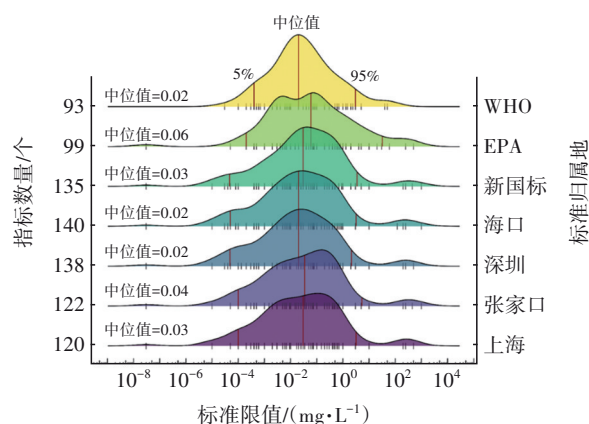


图5 不同水质标准限值中位值异质性统计结果

Fig.5 Heterogeneity statistics results of median limit values in different water quality standards

同质指标间的限值比值映射的是同一指标在不同标准体系下的尺度要求,尤其是掌握比值低于1的指标类别及数量更能体现当地水质污染背景和监测能力。图6为“四地”标准与WHO同质指标的限值比。

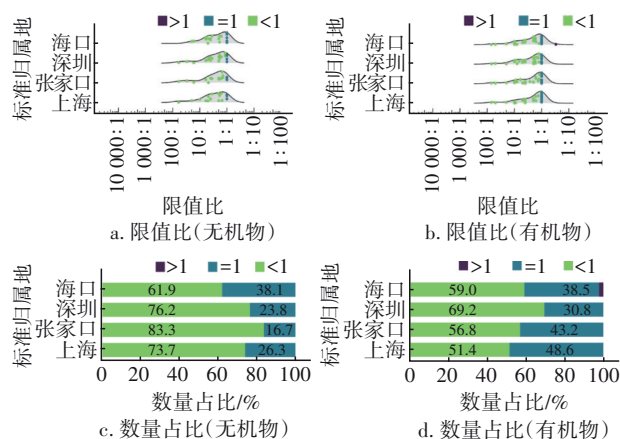


图6 地方标准与WHO同质指标的限值比

Fig.6 Limits ratio of homogeneity indexes of local standards to WHO

从图6可以看出,低于WHO限值数量最多的是无机指标,平均占比为73.8%,类别以金属/类金属指标为主。例如,汞限值为WHO的1/50,硼限值为WHO的1/5。有机指标限值低于WHO的数量占比平均为59.1%,类别以挥发性卤代烃(主要为消毒副产物)为主。例如,四氯乙烯限值为WHO的1/20,1,2-二氯乙烷限值为WHO的1/10。其他16.7%~48.6%指标的比值为1。值得注意的是,“四地”标准中仅有氯乙烯(海口)的限值高于WHO的3倍,氯乙烯的检测方法以气相色谱或气相色谱/质谱法为

主,方法普及率高,绝大部分水厂对其都有经济承受能力(包括自行检测或者委托检测)。因此,应与海口当地水质污染背景和水处理工艺改造成本相关。

图7为“四地”标准与EPA同质指标的限值比。可知,低于EPA限值数量最多的是无机指标,平均占比为66.4%,以金属/类金属指标为主。例如,铊和汞限值为EPA的1/20,但该类别中溶解性总固体和钠的限值分别高于EPA的2、3倍。需说明的是,这两项指标在我国为强制标准,在EPA中并非强制,因此并不意味着监管宽松。

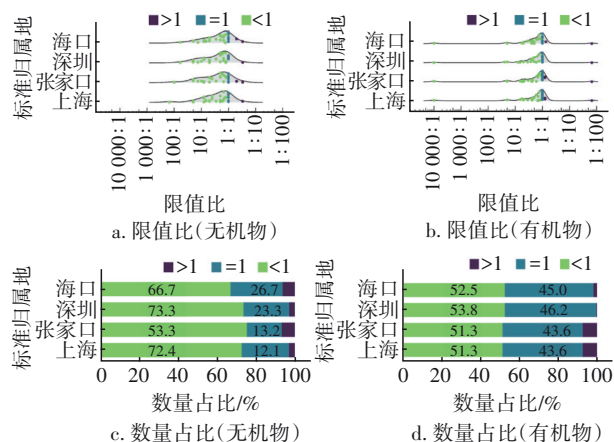


图7 地方标准与EPA同质指标的限值比

Fig.7 Limits ratio of homogeneity indexes of local standards to EPA

有机指标限值低于EPA的数量占比平均为52.2%,类别以挥发性卤代烃(消毒副产物)和苯系物为主。例如,氯乙烯限值为EPA的1/5,二甲苯限值为EPA的1/20,但该类别中挥发性卤代烃一氯二溴甲烷(上海、张家口)、三溴甲烷(上海、张家口)和环境激素类物质邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(海口)限值高于EPA,均为1.3倍。究其原因应与氯乙烯一致,这些污染物的检测方法以气相色谱/质谱法为主,在我国检测技术普及率较高,绝大部分水厂均可承受检测支出,相对较高限值应与当地水质污染背景、水处理工艺为适应标准改造的经济成本相关。

图8为“四地”标准与新国标同质指标的限值比。可知,限值比低于1的数量远低于国际标准/准则,其中无机指标数量占比平均为24.8%,以金属/类金属和离子型化合物为主。例如,汞、亚硝酸盐限值为新国标的1/10,该类别无高于新国标限值指

标。有机指标数量占比平均为33.4%,主要类别为农药和挥发卤代烃(消毒副产物)。例如,乙草胺(深圳)限值为新国标的1/100,三氯乙酸(上海、张家口)限值为新国标的1/20。该类别中高于新国标限值的有甲基对硫磷(张家口、深圳、海口)、石油类(上海)和全氟辛酸(深圳),前两者对标《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中的限值制定,修订后的新国标限值均有所降低。深圳在国内率先将全氟辛酸纳入饮用水标准体系,新国标是在持续实施近十五年的水体污染控制与治理科技重大专项对饮用水水质调查基础上获得其对饮用水贡献率后建立的,其限值更低。

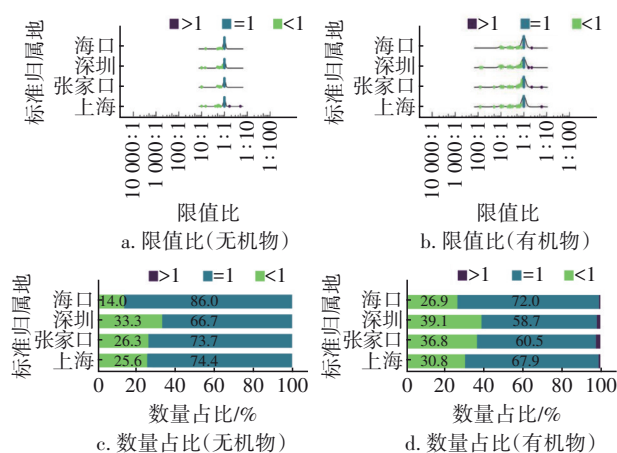


图8 地方标准与新国标同质指标的限值比

Fig.8 Limits ratio of homogeneity indexes of local standards to GB 5749-2022

综上所述,“四地”标准限值的制定均结合了当地成本-效益情况和检测分析方法的可行性,“四地”标准限值与新国标的相似度最高,其次是WHO。“四地”标准中70%的指标限值与新国标一致,便于该地区供水单位及管理部门与新国标衔接。同质指标在不同标准体系下的限值比表明,“四地”标准中约60%的指标限值低于国际标准/准则,主要表现为金属/类金属、挥发性卤代烃(消毒副产物)、农药类等指标,意味着我国水质标准对毒理和水质健康的高关注度,也反映出我国水处理技术水平和监测能力的快速发展。同时发现,存在部分饮用水中需关注的指标限值高于国际标准/准则,一方面原因在于水处理技术的成本-效益情况;另一方面在于仪器设备的检测能力,大多数饮用水中有机物的浓度水平很低,需要色谱-质谱联用技术,受经济条件和检测水平的限制,相关检测方法普适性并不理想,

因此适当放宽限值来缓解水质监管压力,也是标准制定时可以考虑的方法^[21-22]。

3 结论

“四地”标准中与新国标的异质性小,约29%的同质指标限值低于新国标,70%的同质指标限值与新国标一致,这意味着新国标在2023年的全面实施具备良好的基础。在国际标准/准则中,“四地”标准在指标结构上与EPA存在更多数量的同质指标,但约60%的指标限值严于EPA,主要体现在金属/类金属、挥发性卤代烃(消毒副产物)和部分农药指标等类别,也说明虽然当前阶段美国的水质标准引领全球,但我国水质检测能力以及对水质安全、健康的管控程度已逐步达到国际领先水平。

参考文献:

- [1] ANDREA J R, ANDREW K C, IRENA F C, *et al.* Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity [J]. *Biological Reviews*, 2018, 94(3): 849-873.
- [2] 宋兰合, 由阳, 李宗来, 等. 饮用水水质标准体系研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 1-6.
SONG Lanhe, YOU Yang, LI Zonglai, *et al.* Study on framework of drinking water quality standards [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(6): 1-6 (in Chinese).
- [3] 王卓, 吴静宇. 上海市《生活饮用水水质标准》与国内外水质标准比较及其实施后的影响[J]. *上海预防医学*, 2021, 33(10): 960-966.
WANG Zhuo, WU Jingyu. Comparison of Shanghai water quality standard for drinking water with domestic and foreign standards and its influence after implementation [J]. *Shanghai Journal of Preventive Medicine*, 2021, 33(10): 960-966 (in Chinese).
- [4] 彭宏熙, 李聪. 中国和美国、日本饮用水水质标准的比较探究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(10): 26-31.
PENG Hongxi, LI Cong. Comparative study on drinking water quality standards among China, the United States and Japan [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(10): 26-31 (in Chinese).
- [5] WINCKEL T V, COOLS J, VLAEMINCK S E, *et al.* Towards harmonization of water quality management: a comparison of chemical drinking water and surface water quality standards around the globe [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113447.
- [6] PICKETT S T A, CADENASSO M L, ROSI-MARSHALL E J, *et al.* Dynamic heterogeneity: a framework to promote ecological integration and hypothesis generation in urban systems [J]. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(1): 1-14.
- [7] 李会仙, 吴丰昌, 陈艳卿, 等. 我国水质标准与国外水质标准/基准的对比分析[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(8): 15-18.
LI Huixian, WU Fengchang, CHEN Yanqing, *et al.* Comparative analysis on Chinese water quality standards and foreign water quality standards/criteria [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(8): 15-18 (in Chinese).
- [8] BIERING-SORENSEN T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons [J]. *Biologiske Skrifter/Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, 1948, 5: 1-34.
- [9] 张健, 颜勇, 谢美萍, 等. 臭氧对桡足类浮游动物的预氧化效能及灭活机理[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(23): 38-41.
ZHANG Jian, YAN Yong, XIE Meiping, *et al.* Pre-oxidation effect and inactivation mechanism of copepod zooplankton by ozone [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(23): 38-41 (in Chinese).
- [10] HE N, TIAN Y M, LIU C T, *et al.* Accumulation of vanadium and arsenic by cast iron pipe scales under drinking water conditions: a batch study [J]. *Chemosphere*, 2020, 269: 129396.
- [11] 曾丽兰, 雷萍, 王维康. 在线发生离子色谱法检测水中碘化物等9种指标[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(18): 134-138.
ZENG Lilan, LEI Ping, WANG Weikang. Online generation ion chromatography for determination of nine indicators such as iodide in water [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(18): 134-138 (in Chinese).
- [12] 郭庆园, 王春苗, 于建伟, 等. 饮用水中典型嗅味问题及其研究进展[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 82-88.
GUO Qingyuan, WANG Chunmiao, YU Jianwei, *et al.* Research progress on typical taste and odor problems in drinking water [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 82-88 (in Chinese).
- [13] 杜月皎, 塔娜, 杨晨辉, 等. 新兴饮用水消毒技术研究进展[J]. *给水排水*, 2022, 48(S1): 1083-1089.
DU Yuejiao, TA Na, YANG Chenhui, *et al.* Research

- progress of newly emerging drinking water disinfection technologies [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(S1): 1083-1089 (in Chinese).
- [14] 肖融, 楚文海. 全球饮用水标准中消毒副产物管控指标对比与启示[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(6): 1328-1337.
- XIAO Rong, CHU Wenhui. Disinfection by-product regulatory compliance in global drinking water standards: comparison and enlightenment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(6): 1328-1337 (in Chinese).
- [15] 陈永艳, 吕佳, 张岚, 等. 在线固相萃取-超高效液相色谱-三重四极杆质谱法测定水源水和饮用水中107种典型农药及代谢产物[J]. *色谱*, 2022, 40(12): 1064-1075.
- CHEN Yongyan, LÜ Jia, ZHANG Lan, *et al.* Determination of 107 typical pesticides and metabolites in raw water and drinking water by online-solid phase extraction coupled with ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2022, 40(12): 1064-1075 (in Chinese).
- [16] 郭巧媛, 王春苗, 孙道林, 等. HS-SPME-GC-MS/MS测定16种硫醚类臭味物质[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(6): 132-138.
- GUO Qiaoyuan, WANG Chunmiao, SUN Daolin, *et al.* Simultaneous determination of 16 thioether odorous substances in drinking water by HS-SPME-GC-MS/MS [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 132-138 (in Chinese).
- [17] 刘俊玲, 肖永华, 胡迅, 等. 武汉市饮用水中全氟辛酸磺酸和全氟辛酸健康风险评价[J]. *卫生研究*, 2015, 44(1): 135-136.
- LIU Junling, XIAO Yonghua, HU Xun, *et al.* Health risk assessment of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate in drinking water in Wuhan [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2015, 44(1): 135-136 (in Chinese).
- [18] 李建平, 郝思文, 张毅, 等. 饮用水中11种雌激素类内分泌干扰物的固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱测定法[J]. *环境与健康杂志*, 2020, 37(8): 722-725.
- LI Jianping, HAO Siwen, ZHANG Yi, *et al.* Determination of 11 kinds of estrogens EDCs in drinking water by solid-phase extraction-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Environment and Health*, 2020, 37(8): 722-725 (in Chinese).
- [19] 周佳佳, 付杰. 在线固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法测定饮用水中4种兴奋剂[J]. *环境监控与预警*, 2019, 11(3): 27-29, 35.
- ZHOU Jiajia, FU Jie. Determination of 4 stimulants in drinking water-online solid phase extraction followed by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, 11(3): 27-29, 35 (in Chinese).
- [20] 吴炜玮, 陈嘉珮, 董秉直. 氯对饮用水中可同化有机碳的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(4): 1067-1072.
- WU Weiwei, CHEN Jiabei, DONG Bingzhi. Effects of chlorination on assimilable organic carbon in drinking water [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(4): 1067-1072 (in Chinese).
- [21] SCHMIDT T C. Recent trends in water analysis triggering future monitoring of organic micropollutants [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2018, 410(17): 3933-3941.
- [22] BEHMEL S, DAMOUR M, LUDWIG R, *et al.* Water quality monitoring strategies: a review and future perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 1312-1329.

作者简介: 郑蓓(1981-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水质监测与分析技术研发。

E-mail: beizheng@rcees.ac.cn

收稿日期: 2022-12-19

修回日期: 2023-01-11

(编辑: 任莹莹)