

我国地表水体粪大肠菌群污染现状分析

江磊,朱德军,陈永灿,赵恒光

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要:基于20世纪80年代以来公开发表的文献,调研了我国地表水体(河流、湖泊、水库、近海海域)粪大肠菌群的含量,对粪大肠菌群含量的时空分布及变化进行了分析,并对影响这种分布特性的因素进行了系统的分析和讨论。结果表明:我国地表水体粪大肠菌群含量普遍较高,受到较为严重的粪便污染,其中河流水系含量最高,湖泊、海域次之,水库最低;粪大肠菌群含量的年际和年内波动都较大,年内丰水期含量高于枯水期含量;粪大肠菌群含量的空间分布特性为南北无明显差异,东部水域含量高于西部水域含量,下游水体含量高于上游水体含量,近岸水体含量高于远岸水体含量,人为干扰严重的水体含量高于干扰轻的水体含量。降雨径流对粪大肠菌群含量的时空变化存在非常显著的影响,同时水体有机物含量、富营养化程度、盐度及温度等物理化学特性也影响着粪大肠菌群在水体中的分布。

关键词:地表水体;粪大肠菌群;病原微生物;含量分布;污染特性

中图分类号:TV 211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)03-0011-08

Analysis on Fecal Coliform pollution in surface waters of China//JIANG Lei, ZHU Dejun, CHEN Yongcan, ZHAO Hengguang(*State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Fecal Coliform (FC) concentration in surface waters, such as, rivers, lakes, reservoirs and coastal areas, of China was surveyed based on literatures published since 1980s. From the survey, the temporal variation and the spatial distribution of FC concentration is analyzed, and then influencing factors on distribution characteristics of FC are systematically discussed. The results demonstrate that FC concentration is generally high throughout the surface waters in China, which indicates that the waters suffer a severe microbial contamination. Rivers are most severely contaminated among different water bodies while reservoirs are cleanest. The concentration of FC shows significant inter-annual and intra-annual fluctuations, with the concentration in wet seasons being much greater than that in dry seasons. There is no obvious distribution pattern of FC concentration between southern and northern waters, while the FC concentration in eastern areas is obviously greater than that in western areas. The FC concentration in lower reaches of rivers is greater than that in the upper reaches, and the FC concentration near shore is greater than offshore. These indicate that human actions significantly increase the concentration of FC. Rainfall-runoff has a significant impact on the temporal variation and spatial distribution of FC. Besides, many other physical-chemical factors, including organic content, trophic level, salinity, and temperature of water are also responsible for the spatial distribution and temporal variation of concentration of FC.

Key words: surface water; Fecal Coliform; pathogenic microorganism; concentration distribution; pollution characteristic

水体受到病原微生物污染后,可能导致霍乱、伤寒等多种肠道传染病,并造成大范围的爆发^[1-2],据调查我国广西、贵州、江苏等省(自治区)的伤寒、副伤寒以水传播为主,如贵州50年间577起伤寒、副伤寒的爆发中水型爆发占到64.82%^[3-5]。病原微生物主要来源于人和动物等的粪便^[6],水体中病原微生物

物种类多、含量较少并且生存周期短,检测困难,通常采用检测与病原微生物具有密切相关性的指示微生物来指示和估计病原污染^[7]。粪大肠菌群(Faecal Coliforms)由于其直接来源于粪便且检测方法相对容易而被广泛应用为衡量水体粪便污染的指示微生物,水体存在粪大肠菌群表明已被粪便污染^[8]。

基金项目:清华大学自主科研计划(20121088082);国家自然科学基金(51039002)

作者简介:江磊(1987—),男,湖北公安人,博士研究生,主要从事水-沙-污染物输移过程研究。E-mail:beiai-qq25@163.com

通信作者:朱德军(1980—),男,江苏建湖人,副教授,博士,主要从事河湖水动力-物质输移过程研究。E-mail:zhudejun@mail.tsinghua.edu.cn

GB 5749—1985《生活饮用水卫生标准》中特别增加了粪大肠菌群指标,规定 100mL 水样中不得检出。而在最新颁布的 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中,规定 I、II、III、IV 及 V 类水粪大肠菌群的含量依次为小于或等于 200、200~2 000、2 000~1 万、1 万~2 万及 2 万~4 万个/L。GB 3097—1997《中华人民共和国海水水质标准》规定的第一、二、三类海水的粪大肠菌群含量为小于或等于 2 000 个/L。我国地表水体粪大肠菌群含量普遍较高,部分水域含量甚至超过 V 类水质标准数万倍。目前我国粪便微生物指标的评价还处于起步阶段,水质评价多以常规理化指标为主,水质等级的评定也多以常规理化指标的评价结果为基础。各机构颁布的水资源公报和环境状况公报中只公布了水质等级的评定结果,缺少粪大肠菌群含量的具体数据。虽然部分研究人员对我国水体粪大肠菌群的含量和分布特性开展了研究,但一般只针对某一特定水域,还缺少对我国水体受粪大肠菌群污染的整体状况和分布特性的研究。

本研究主要基于 20 世纪 80 年代以来公开发表的文献资料,系统调研我国河流、湖泊、水库和近海海域中的粪大肠菌群含量,分析其不同水域中的时空分布特征,并结合国内外的研究成果,对影响我国地表水体中粪大肠菌群分布特性的因素进行分析和讨论。

1 水域总体污染情况

1.1 河流水系

我国主要河流水系粪大肠菌群含量见表 1,可以看出河流粪大肠菌群含量变化范围较大。

a. 长江水系。长江水系流域范围较大,面积约 180 万 km²。全流域内多年粪大肠菌群含量变化范围为 20~10⁸ 个/L,河段内自上而下粪大肠菌群污染情况为:三江源地区生态环境较好,人为干扰较少,整体水质较好^[9];宜宾段 2001 年粪大肠菌群含量处于 10³~10⁵ 个/L 量级,年内丰水期含量最高、平水期次之、枯水期最低,三大河流岷江含量最高、长江次之、金沙江最低^[10];重庆段 1999 和 2005 年均存在粪大肠

表 1 河流水系粪大肠菌群含量

水系	河段/河道	调查时间	粪大肠菌群含量/(个·L ⁻¹)	数据来源
长江水系	三江源	2008 年	<20	文献[9]
	宜宾市三江(岷江、金沙江及长江)	2001 年	5 400~2.4×10 ⁴	文献[10]
		1990—2006 年	严重超标	文献[11]
	重庆市城区排污口附近	2005 年	3.475×10 ⁴ (最小值)	文献[12]
			3.89×10 ⁸ (最大值)	
			9.95×10 ⁷ (平均值)	
三峡库区巴东段	2002 年、2004 年	10 ⁶ ~10 ⁷ (排污口)	文献[13]	
		7 400, 5 800		
	长江口	1989 年	3 300~2.4×10 ⁷	文献[14]
黄河水系	黄河(兰州段)	2002—2006 年	3.418×10 ⁵ ~5.989×10 ⁵	文献[15]
	黄河(兰州段)	2001—2005 年	1.79×10 ⁴ ~1.60×10 ⁶	文献[16]
	渭河及支流(西安段)	2005 年	3.4×10 ⁵ ~1.2×10 ⁶ (渭河)	文献[17]
			1.2×10 ⁷ (支流)、 1 000~6.2×10 ⁵ (灞河)	
珠江水系	珠江广州段	1989 年	3.85×10 ⁵	文献[2]
	珠江广州段	2004—2006 年	1.164×10 ⁶ (3 年均值)	文献[18]
	珠江广州段	2008—2009 年	(7.01±2.43)×10 ⁶ 和 (2.75±0.73)×10 ⁶ (中大码头微表层和表层)、(4.81±1.84)×10 ⁶ 和 (2.45±0.73)×10 ⁶ (鱼珠码头微表层和表层)	文献[19]
海河水系	天津海河		700	文献[2]
	天津市区	1997 年	3 350(入境)、1.476×10 ⁵ (出境)	文献[20]
	津河	2002 年	1.265×10 ⁴ ~2.3×10 ⁴	文献[21]
	北京温榆河	2009—2010 年	501~5.37×10 ⁶ (上游) >6.3×10 ⁶ (下游)	文献[22]
松花江水系	松花江(吉林段)	2001—2003 年	580(平均值)、4 760(最大值)	文献[23]
		2004—2005 年	1 025(平均值)、4 200(最大值)	
辽河水系	辽南少水区及辽东多水区		3.584×10 ⁵ (平均值)	文献[24]
	浑河(抚顺段)	2005 年	4.0×10 ⁴ ~2.6×10 ⁷	文献[25]
其他水系	闽江福州段	2007 年	0~2.40×10 ⁴	文献[2]
	京杭运河(杭州段)	2004 年	1.16×10 ⁵	文献[26]
	京杭运河(扬州段)	2006 年	281~5.018×10 ⁴	文献[27]
	钱塘江(杭州段)	2006—2009 年	>1.0×10 ⁴ (39% 水样)	文献[28]

菌群超标的情况,其中 2005 年城区排污口附近粪大肠菌群含量超标最为严重^[11-12];三峡库区巴东段 2002 年和 2004 年粪大肠菌群含量平均值多在 10^4 个/L 左右^[13];长江口水体粪大肠菌群含量基本在 10^3 个/L 以上,局部排污口附近达 10^9 个/L 以上^[14]。

b. 黄河水系。黄河近年来水量偏少,水体自净能力相对较差。黄河流域多年粪大肠菌群含量变化范围为 $1.79 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^7$ 个/L,如兰州段 2001—2006 年粪大肠菌群浓度均在 10^4 个/L 以上,超标情况比较严重^[15-16];而渭河及其支流的粪大肠菌群含量变化范围为 $10^3 \sim 10^6$ 个/L,局部高达 10^7 个/L 以上^[17]。

c. 珠江水系。珠江水系水质相对较好,但城市河段的粪大肠菌群污染情况依然严重,如广州段 2004—2006 年间珠江前航道粪大肠菌群含量均值变化范围为 $1.007 \times 10^6 \sim 1.227 \times 10^6$ 个/L^[18];广州河段 2008—2009 年中大码头和鱼珠码头微表层、表层粪大肠菌群含量年均值范围为 $(2.45 \pm 0.73) \times 10^6 \sim (7.01 \pm 2.43) \times 10^6$ 个/L^[19]。

d. 海河水系。海河水系污染较为严重,城市生活污水的排入是导致粪大肠菌群含量偏高的主要原因,海河天津段 1997 年入境时粪大肠菌群含量约为 10^3 个/L,出境时粪大肠菌群含量约为 10^5 个/L,表明城市生活污水大量排入^[20-21]。北京温榆河上游粪大肠菌群含量明显低于下游粪大肠菌群含量^[22]。

e. 松辽水系。松辽水系粪大肠菌群含量变化范围较大,辽河流域含量明显高于松花江流域含量。松花江吉林段 2001—2005 年粪大肠菌群含量范围为 $580 \sim 4760$ 个/L^[23],辽河流域辽南少水区及辽东多水区粪大肠菌群含量变化范围为 $10 \sim 5.4 \times 10^6$ 个/L^[24],浑河(抚顺段)2005 年粪大肠菌群含量为 $4.0 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^7$ 个/L^[25]。

f. 其他水系。除前述几大水系外,其他水系粪大肠菌群含量亦较高,水体受到较为严重的粪便污

染,如京杭大运河扬州段和杭州段 2004 年和 2006 年粪大肠菌群含量为 $281 \sim 1.16 \times 10^5$ 个/L^[26-27]。

1.2 湖泊水库

我国部分湖泊水库的粪大肠菌群含量见表 2,可知湖泊粪大肠菌含量普遍高,污染较严重,而水库由于受到较好的保护,粪大肠菌群含量低,污染较轻。

a. 湖泊。杭州西湖 1999 年 3 条入溪流粪大肠菌群含量均在 10^5 个/L 以上,其中 1999 年 6 月暴雨后湖内粪大肠菌群含量 1.6×10^4 个/L^[29]。武昌东湖 1988—1989 年粪大肠菌群含量变化范围为 $700 \sim 4.4 \times 10^7$ 个/L,其中水果湖污染最为严重^[30]。洞庭湖 1993 年粪大肠菌群含量平均值为 7834 个/L^[2]。洱海部分水域的粪大肠菌群含量超过国家 II 类水质标准值(2000 个/L)近 26 倍,但枯水期时粪大肠菌群含量较低,均达到 II 类水质标准^[31]。

b. 水库。辽阳汤河水库 2009 年各时期各测点的粪大肠菌群含量均小于 90 个/L,枯水期和平水期为清洁水,丰水期则轻污染;参窝水库各时期各测点均小于 260 个/L,水质都比较好,枯、平、丰水期均为轻污染^[32]。海南沙河水库 2003 年 6 月粪大肠菌群含量略高,达 1000 个/L^[33]。

1.3 海域

我国四大海域粪大肠菌群含量见表 3,可知粪大肠菌群含量变化范围为 $20 \sim 10^6$ 个/L,不同海域之间污染状况无明显的趋势性变化,渤海各海域多年粪大肠菌群含量变化范围为 $20 \sim 4.8 \times 10^4$ 个/L,粪大肠菌群含量与降雨量及季节变化存在明显的关系^[34-36];黄海各海域多年粪大肠菌群含量略低,变化范围为 $20 \sim 2.4 \times 10^4$ 个/L^[37];东海沿岸多为经济发达地区,城市生活污水大量排入导致水体受到较为严重的污染,多年粪大肠菌群含量范围为 $20 \sim 2.238 \times 10^5$ 个/L^[38-42];南海各海域除红沙港受到较为严重的人为干扰而导致粪大肠菌群含量较高外,

表 2 湖泊水库粪大肠菌群含量

湖泊/水库	位 置	调查时间	粪大肠菌群含量/(个·L ⁻¹)	数据来源
杭州西湖	湖 区	1999 年	$80 \sim >1.6 \times 10^4$	文献[29]
	金沙涧	1999 年	$1600 \sim >2.4 \times 10^4$	
	龙泓涧	1999 年	$1600 \sim >2.4 \times 10^4$	
	长桥溪	1999 年	$>2.4 \times 10^4$	
武昌东湖	郭郑湖湖心	1988—1989 年	$700 \sim 6.7 \times 10^4$	文献[30]
	郭郑湖磨山	1988—1989 年	$1200 \sim 4 \times 10^4$	
	水果湖	1988—1989 年	$3.68 \times 10^4 \sim 4.4 \times 10^7$	
洞庭湖	东洞庭湖	1993 年	$40 \sim >2.24 \times 10^5$	文献[2]
大理洱海		2007—2008 年	$1.6 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^4$ (丰水期) $2800 \sim 9200$ (平水期) $130 \sim 490$ (枯水期)	文献[31]
辽阳汤河水库		2009 年	$20 \sim 90$ (平均值 50)	文献[32]
辽阳参窝水库		2009 年	$20 \sim 260$ (平均值 110)	文献[32]
海南沙河水库		2003 年	$170 \sim 2800$	文献[33]

表3 主要海域粪大肠菌群含量

海域	位置	调查时间	粪大肠菌群含量/(个·L ⁻¹)	数据来源
渤海	大连	2006—2010年、1997年	20 ~ 1.4×10 ⁴ 、240	文献[2]
	辽东湾	2002年	20 ~ >2.4×10 ⁴	文献[34]
	辽东湾	2002年	<20 ~ 170(5月)、2.4×10 ⁴ (8月)、5400 ~ 1.6×10 ⁴ (10月)	文献[35]
	秦皇岛	2008年	600 ~ 2000	文献[2]
	北戴河	2008年、1997年	50 ~ >2.4×10 ⁴ 、7000 ~ 4.8×10 ⁴	文献[36-37]
黄海	烟台	2008年	20 ~ >1100	文献[36]
	青岛	2008年、1997年	>2.4×10 ⁴ 、40 ~ 2600	文献[36-37]
	连云港	2008年	70 ~ 2400	文献[36]
东海	宁波	2008年	50 ~ 1.6×10 ⁴	文献[36]
	罗源湾	2002—2005年	80 ~ 1920	文献[38]
	启东海域	2005年	160 ~ 1200(蒿枝港)、70 ~ 700(唐芦港)、230 ~ 1700(大洋港)	文献[39]
	厦门	2003—2010年、2008年	20 ~ 2.238×10 ⁵ 、20 ~ 1300	文献[2]
	厦门	1998年	<30 ~ 4600、<100(大部分站点)	文献[2]
	长江口附近	2005年	<20 ~ 80(夏季)、<20 ~ 2.4×10 ⁴ (秋季)	文献[40]
	杭州湾		<500	文献[41]
浙江近岸海域		0 ~ 3500、50 ~ 1200	文献[42]	
南海	北海	2008年	20 ~ 1.6×10 ⁴	文献[36]
	深圳	2008年	50 ~ 1.6×10 ⁴	文献[36]
	三亚	2008年	170 ~ 5400	文献[36]
	湛江	2009—2010年	20 ~ 1.6×10 ⁴ (平均值907)	文献[43]
	海口	2009年	1085±539	文献[2]
	红沙港	2004年	20 ~ 1.6×10 ⁶ (平均值1160 ~ 3580)	文献[2]

其余各海域多年粪大肠菌群含量较低,范围为20 ~ 1.6×10⁴个/L^[43]。

2 污染变化特性

2.1 时间变化特性

粪大肠菌群含量年际年内波动范围较大,年际之间无明显的趋势性变化规律,长江口毗邻海域1996—2005年粪大肠菌群含量在1999年达到最高值,此后呈波状变化,整体虽有略微下降,但趋势性并不明显^[12]。厦门海滨浴场2003—2010年粪大肠菌群含量在2005年达到最大值,其后存在逐渐减小的趋势^[2]。松花江2001—2005年粪大肠菌群含量逐年增加,并于2005年达到最大值^[23]。黄河兰州段2001—2006年粪大肠菌群含量在2003年达到最大值,其余无明显的规律性变化^[15-16]。年内变化则表现出明显的规律性,众多研究均表明其丰水期含量最高、平水期次之、枯水期最低^[10,20,29-30,33,41]。

2.2 空间分布特性

a. 粪大肠菌群含量南北向无明显差异,东部水域高于西部水域。总体而言,我国地表水粪大肠菌群含量南北向差异性不明显,河流粪大肠菌群含量多在10⁴ ~ 10⁶个/L之间,局部有所偏高;东西向呈现一定的规律性变化,主要表现为东部水域粪大肠菌群含量明显高于西部水域^[2],这主要是由于西部多为河流水系发源地,水体受到人为的干扰较少,粪大肠菌群含量较低,而东部水域多位于河流下游或是入海口,流经沿途工农业较为发达的地区或城市,

大量的工农业废水、生活污水排入或是受降雨冲刷进入水体,导致粪大肠菌群含量偏高。

b. 流域上游粪大肠菌群含量低于下游。流域内上游粪大肠菌群含量低于下游,长江三江源水体粪大肠菌群含量小于20个/L^[9],宜宾段为5400 ~ 2.4×10⁴个/L^[10],重庆段为10⁶ ~ 10⁷个/L^[12],而长江口为3300 ~ 2.4×10⁷个/L^[14]。京杭大运河扬州段粪大肠菌群含量为281 ~ 5.018×10⁴个/L^[27],杭州段为1.16×10⁵个/L^[26]。北京温榆河上游粪大肠菌群含量变化范围为501 ~ 5.37×10⁶个/L,而下游均值在6.3×10⁶个/L以上^[22]。

c. 横向分布近岸区粪大肠菌群含量高于远岸区。对于某一特定位置,粪大肠菌群含量随岸边距离的增加而减小,长江口水域附近粪大肠菌群自排污口至江中央数量急剧下降,由于江水的纵向稀释扩散作用,呈平行于岸边的带状分布特点^[14]。秦皇岛海域粪大肠菌群随远离海岸的距离浓度基本呈线性减小^[36]。大连海域粪大肠菌群含量随距离增加表现出相似的规律^[2]。

d. 人为干扰大的水体粪大肠菌群含量高于干扰小的水体。城市地区由于人口密度大,工业集中,大量生活污水和工业废水的排放导致河流城市段的粪大肠菌群含量高于非城市段,城市湖泊的粪大肠菌群含量高于非城市湖泊。津河入境时粪大肠菌群含量为3350个/L,而出境时则高达1.476×10⁵个/L,后者远高于前者^[21]。位于武汉市区内的东湖粪大肠菌群含量最高达10⁷个/L^[30],而非城市湖泊的洞

庭湖粪大肠菌群含量最高只有 10^5 个/L^[2]。黄河流域渭河粪大肠菌群含量为 $3.4 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ 个/L, 其支流某断面高达 1.2×10^7 个/L, 而黄河干流粪大肠菌群含量多为 10^5 个/L 左右^[15-16]。

e. 粪大肠菌群含量垂向分布相对较为复杂。粪大肠菌群含量沿垂向分布比较复杂, 受诸多因素的影响, 包括温度、盐度、悬浮物、光照等, 一般深水区底部低温黑暗的环境更适合粪大肠菌群的存活^[6]。珠江广州段中大码头微表层、表层粪大肠菌群含量的年均值分别为 $(7.01 \pm 2.43) \times 10^6$ 个/L 和 $(2.75 \pm 0.73) \times 10^6$ 个/L, 鱼珠码头为 $(4.81 \pm 1.84) \times 10^6$ 个/L 和 $(2.45 \pm 0.73) \times 10^6$ 个/L, 微表层浓度高于表层^[18]。罗源湾 2002—2005 年粪大肠菌群含量为表层海水大于底层海水^[38]。浙江近岸海域第一次航行表层和底层水类大肠菌群含量均值分别为 460 个/L 和 1 150 个/L; 第二次航行分别为 750 个/L 和 370 个/L^[42]。

2.3 水域类型差异特性

a. 内陆水域河流水系粪大肠菌群含量明显高于湖泊水库。河流由于承受了较多的人为干扰, 粪大肠菌群含量要明显高于其他水域, 河流粪大肠菌群含量多为 $10^4 \sim 10^6$ 个/L 量级, 局部可高达 $10^7 \sim 10^8$ 个/L。湖泊粪大肠菌群含量多为 $10^3 \sim 10^4$ 个/L 量级, 水库粪大肠菌群含量多为 $10^2 \sim 10^3$ 个/L 量级。

b. 内陆水域水库粪大肠菌群含量低于湖泊。水库由于受到了较好的保护水质好于湖泊, 水库水体中粪大肠菌群含量在 $10^2 \sim 10^3$ 个/L 量级 ($50 \sim 2.8 \times 10^3$ 个/L), 而湖泊水体中粪大肠菌群含量多在 $10^3 \sim 10^4$ 个/L 量级, 部分地区如武昌东湖水果湖污染严重, 可达 $3.68 \times 10^4 \sim 4.4 \times 10^7$ 个/L。

c. 海域粪大肠菌群含量相比于内陆水域较低。海域粪大肠菌群含量在 $10^2 \sim 10^3$ 个/L 量级, 而内陆水域则在 $10^2 \sim 10^6$ 个/L 量级, 以 10^4 个/L 以上的量级较为常见。不同水域的水体物理化学特性的不同导致其粪大肠菌群含量的不同, 高盐度的海水由于具有抑菌作用, 会加剧粪大肠菌群的衰亡, 因此其粪大肠菌群含量低于内陆河流湖泊。

3 污染影响因素

3.1 降雨径流影响

粪大肠菌群含量年际年内的波动主要受降雨冲刷的影响, 降雨导致地表径流携带大量的工农业生活污水进入水体, 增大水体粪大肠菌群含量, 松花江吉林段 2005 年粪大肠菌群含量的升高与 2005 年的降雨存在密切的关系^[23], 辽东湾 2002 年夏季粪大肠菌群含量较高也与夏季降雨量较大、陆源污水大

量入海有关^[35], 海口某浴场 2000 年 7 月某日粪大肠菌群检出量就与当日降雨量存在明显的正相关关系^[2], 洱海 2007—2008 年丰水期粪大肠菌群含量的严重超标系季节性的雨水冲刷带来的生活污染物大量流入所致^[31]。

3.2 水体物理化学特性影响

a. 水体粪大肠菌群含量与有机物含量正相关。在河流湖泊等水体中, 微生物数量往往和有机物的含量成正比, COD 和 BOD 指标可反映水体中有机物含量的高低, 宜宾三江水体中粪大肠菌群含量与 COD_{Mn} 指数变化趋势相同, 二者呈正相关关系^[10]。浑河(抚顺段) 2005 年水体中粪大肠菌群含量与 COD 含量存在明显的相关关系, COD 含量高的水体, 粪大肠菌群含量也高, 且两者变化趋势相同^[25]。杭州湾水体中粪大肠菌群含量与水体中 COD 含量呈正相关关系^[41]。长江尚山断面 2002—2005 年水体粪大肠菌群含量与 BOD₅ 或 COD 之间的相关分析表明, 粪大肠菌群含量与 BOD₅ 的相关性好于 COD^[2]。松花江吉林段水体粪大肠菌群含量与 COD_{Mn} 指数变化趋势相同, 二者正相关^[23]。

b. 水体粪大肠菌群含量与富营养化程度正相关。水体粪大肠菌群含量与水体富营养化程度呈正相关关系, 黄河兰州段的研究则表明粪大肠菌群含量与总磷有较强的相关性^[15-16]。杭州湾粪大肠菌群含量与无机磷等环境因子的相关性较高^[41]。杭州西湖粪大肠菌群含量与水体富营养化程度正相关^[29]。长江口水域粪大肠菌群含量与富营养化程度成正比^[40]。

c. 水体粪大肠菌群含量与盐度负相关。高盐度的海水具有抑菌作用, 会加剧粪大肠菌群的衰亡, 海域粪大肠菌群含量低于内陆水域在一定程度上与海水的高盐度有关。焦俊鹏等^[41]在 1999 年 5—6 月对杭州湾的调查显示, 粪大肠菌群含量与盐度负相关, 而蔡雷鸣等^[38]在罗源湾也得到相似的结论。长江口粪大肠菌群含量的空间分布与盐度负相关^[14]。

d. 水体粪大肠菌群含量与温度正相关。大多数微生物对水体温度都极其敏感, 粪大肠菌群最适宜的生存温度为 37℃ 左右, 夏季水温较适合粪大肠菌群的生存。黄秀清等^[14]在长江口水域的研究结果表明, 粪大肠菌群的含量与水温的相关系数 $R^2 = 0.601$, 含量与水温正相关。杭州湾粪大肠菌群含量与水温相关系数 $R^2 = 0.622$, 含量与水温正相关^[41]。

4 结论

a. 我国地表水体粪大肠菌群含量较高, 范围为

20~10⁸个/L,水体受到较为严重的粪便污染。河流粪大肠菌群含量最高,湖泊次之,近岸海域和水库最低。

b. 粪大肠菌群含量年际之间波动较大,无明显的规律性变化,年内丰水期含量高于枯水期含量;空间分布南北向无明显的特点,东西向东部水域含量明显高于西部;流域上游含量低于下游,局部近岸区含量则高于远岸区,表明人为干扰严重的水体粪大肠菌群含量高于干扰轻的水体;而粪大肠菌群含量在水体表底的分布则较为复杂。

c. 粪大肠菌群含量时间分布特性主要与降雨径流有关,降雨量大则相应水体粪大肠菌群含量较高;空间分布特性受众多因素影响,包括有机物含量、富营养程度、盐度、温度等,有机物含量、富营养程度、温度高则粪大肠菌群含量高,盐度高则粪大肠菌群含量低。

参考文献:

[1] COLE D, LONG S C, SOBSDY M D. Evaluation of F+RNA and DNA coliphages as source-specific indicators of fecal contamination in surface waters [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(11): 6507-6514.

[2] 赵恒光. 我国重要水域粪大肠菌群污染现状研究[D]. 北京:清华大学, 2014.

[3] 何晓青. 新中国在预防和控制伤寒方面的成就[J]. 中华流行病学杂志, 2000, 21(1): 61-63. (HE Xiaoping. Achievements on preventing and controlling typhoid in China [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2000, 21(1): 61-63. (in Chinese))

[4] 林玫, 黄柏青, 唐振柱, 等. 2001—2004年广西伤寒副伤寒监测[J]. 现代预防医学, 2006, 33(10): 1834-1837. (LIN Mei, HUANG Baiqing, TANG Zhengzhu, et al. Analysis on date of surveillance of typhoid and paratyphoid fever in Guangxi [J]. Modern Preventive Medicine, 2006, 33(10): 1834-1837. (in Chinese))

[5] 姚光海, 王涛, 田克诚, 等. 贵州省 1999—2007 年伤寒副伤寒流行特征分析[J]. 医学动物防制, 2009, 25(3): 161-163. (YAO Guanghai, WANG Tao, TIAN Kecheng, et al. Epidemiological analysis on typhoid fever and paratyphoid fever from 1999 to 2007 in Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Pest Control, 2009, 25(3): 161-163. (in Chinese))

[6] PACHEPSKY Y A, SHELTON D R. Escherichia Coli and Fecal Coliforms in freshwater and estuarine sediments[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 41: 1067-1110.

[7] BRADFORD S A, YATES S R, BETTAHAR M, et al. Physical factors affecting the transport and fate of colloids

in saturated porous media [J]. Water Resource Research, 2002, 38(12): 1327-1338.

[8] TALLON P, MAGAJNA B, LOFRANCO C, et al. Microbial indicators of Faecal Contamination in water: a current perspective [J]. Water Air and Soil Pollution, 2005, 166: 139-166.

[9] 卢素锦, 石宏霄, 李鹏, 等. 三江源长江地表水水环境现状评价[J]. 环境和健康杂志, 2009, 26(7): 604-605. (LU Sujing, SHI Hongxiao, LI Peng, et al. Environmental assessment for water of Yangtze River of source area of Lantsang, Yellow and Yangtse River [J]. Journal of Environment Health, 2009, 26(7): 604-605. (in Chinese))

[10] 宋在兰, 张兰, 黄斌. 宜宾市三江水体粪大肠菌群污染现状调查[J]. 四川环境, 2003, 22(6): 36-38. (SONG Zailan, ZHANG Lan, HUANG Bing. Investigation on pollution of Faecal Coliform at the Three River Joint [J]. Sicuan Environment, 2003, 22(6): 36-38. (in Chinese))

[11] 杨永春, 刘治国. 近 30 年来中国西部河谷型城市水体污染变化趋势与机制[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 22-35. (YANG Yongcun, LIU Zhiguo. The changing trend and mechanism of water pollution of valley-city in the west of China during recent 30 years [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(1): 22-35. (in Chinese))

[12] 李东, 张晟, 黄川, 等. 重庆城市污水粪大肠菌污染源调查[J]. 中国给水排水, 2005, 21(8): 23-25. (LI Dong, ZHANG Sheng, HUANG Chuan, et al. Investigation and control for Faecal Coliform pollution source in Chongqing municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(8): 23-25. (in Chinese))

[13] 陈英, 刘晓玲, 张华珍, 等. 三峡库区巴东段水质状况及其变化趋势研究[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(6): 40-41. (CHEN Ying, LIU Xiaoling, ZHANG Huazheng, et al. Change of water quality in Badong section of Three Georges Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 28(6): 40-41. (in Chinese))

[14] 黄秀清, 彭立功, 洪君超. 长江口水域异养细菌及粪大肠菌群的生态分布[J]. 海洋环境科学, 1993, 12(1): 29-34. (HUANG Xiuqing, PENG Ligong, HONG Junchao. Ecological distribution of heterotrophic bacteria and Faecal Coliforms in the Yangtze River Estuary [J]. Marine Environmental Science, 1993, 12(1): 29-34. (in Chinese))

[15] 张锐坚, 张国珍, 武福平. 黄河兰州段水质污染分析评价及防治对策[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(12): 27-30. (ZHANG Ruijian, ZHANG Guozhen, WU Fuping. Assessment and countermeasure on the water pollution of Lanzhou reach of Yellow River [J]. Environment Science and Management, 2007, 32(12): 27-30. (in Chinese))

[16] 王利荣, 刘发民, 张静. 黄河兰州段粪大肠菌群污染研

- 究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (增刊1): 63-67. (WANG Lirong, LIU Famin, ZHANG Jing. Study on the present condition of the Fecal Coliform pollution in the Lanzhou section of the Yellow River [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33 (Sup1): 63-67. (in Chinese))
- [17] 郭爱莲, 宁东俊, 韩芳桥, 等. 西安地区河流水质的卫生细菌学调查和建议[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1998, 28(1): 60-63. (GUO Ailian, NING Dongjun, HAN Fangqiao, et al. A bacterium investigation about the water quality in the rivers Xi'an area and some suggestions[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1998, 28(1): 60-63. (in Chinese))
- [18] 何歆, 冯佳和, 李松青, 等. 珠江(广州河段)前航道水域生态环境评价[J]. 水利渔业, 2007, 27(1): 74-75. (HE Yun, FENG Jiahe, LI Songqing, et al. Evaluation of ecological environment of front course in the Pearl River (Guangzhou section) [J]. Reservoir Fisheries, 2007, 27(1): 74-75. (in Chinese))
- [19] 胡晓娟, 张俊, 杨宇峰, 等. 珠江广州河段水质及微生物周年变化特征[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3): 89-93. (HU Xiaojuan, ZHANG Jun, YANG Yufeng, et al. Study on the annual changes in water quality and microorganism in the Guangzhou section of the Pearl River [J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(3): 89-93. (in Chinese))
- [20] 徐留发, 崔春明, 朱晓东. 海河水中大肠菌群与粪大肠菌群的分布及相关性初步研究[J]. 环境与健康杂志, 1998, 15(4): 192. (XU Liufa, CUI Chunming, ZHU Xiaodong. Preliminary study on distribution and correlation between total coliforms and Faecal Coliform in the Haihe River [J]. Journal of Environment and Health, 1998, 15(4): 192. (in Chinese))
- [21] 吴丽娜, 吕严, 赵光宇, 等. 天津市津河有机物和生物性污染调查研究[J]. 环境与健康杂志, 2003, 20(5): 292-293. (WU Lina, NÜ Yan, ZHAO Guangyu, et al. An elementary study on organic and biological contamination in Jin River of Tianjin [J]. Journal of Environment and Health, 2003, 20(5): 292-293. (in Chinese))
- [22] 杨勇, 魏源送, 郑祥, 等. 北京温榆河流域微生物污染调查研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 9-18. (YANG Yong, WEI YuanSong, ZHENG Xiang, et al. Investigation of microbial contamination in Wenyu River of Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 9-18. (in Chinese))
- [23] 李英赞, 刘冀艳, 展鹏. 吉林市饮用水水源松花江段污染现状和对策[J]. 吉林化工学院学报, 2010, 27(2): 21-23. (LI Yingzan, LIU Jinyan, ZHAN Peng. Present situation and countermeasures of the contaminated drinking water source within the section of Songhua River in Jilin City [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2010, 27(2): 21-23. (in Chinese))
- [24] 张楠, 孟伟, 张远, 等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 162-170. (ZHANG Nan, MENG Wei, ZHANG Yuan, et al. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Liao River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 162-170. (in Chinese))
- [25] 唐伟, 于波, 张国平, 等. 浑河(抚顺段)水质粪大肠菌群污染现状研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(7): 76-78. (TANG Wei, YU Bo, ZHANG Guoping, et al. Investigation on pollution of Faecal Coliform at the Fushun section of Hunhe River [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(7): 76-78. (in Chinese))
- [26] 万欢, 吴根福. 京杭大运河杭州段水体中微生物生理群生态分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1581-1587. (WAN Huan, WU Genfu. Physiological group distribution of microorganisms in the water body of the Hangzhou section of the Grand Canal [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(6): 1581-1587. (in Chinese))
- [27] 徐晓云, 陈效民, 谢继征. 模糊综合评价法用于京杭运河扬州段的水质评价[J]. 中国给水排水, 2008, 24(24): 107-110. (XU Xiaoyun, CHEN Xiaomin, XIE Jizheng. Evaluation on water quality of Jinghang Canal in Yangzhou by fuzzy comprehensive assessment method [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(24): 107-110. (in Chinese))
- [28] 詹丽. 钱塘江(杭州段)粪大肠菌群污染现状研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2011, 21(11): 2770-2772. (ZHAN Li. Analysis of pollution of Fecal Coliform in Qiantang River (Hangzhou section) [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2011, 21(11): 2770-2772. (in Chinese))
- [29] 吴洁, 虞左明, 钱天鸣, 等. 杭州西湖水体粪大肠菌群的监测及环境意义[J]. 中国环境监测, 2000, 16(5): 51-53. (WU Jie, YU Zuoming, QIAN Tianming, et al. The monitoring of Fecal Coliform in Hangzhou West Lake and its environment significance [J]. Environmental Monitoring in China, 2000, 16(5): 51-53. (in Chinese))
- [30] 李小峰, 张楚瑜, 王祖卿. 武昌东湖生物污染的研究及病毒指示物的初探[J]. 环境科学学报, 1990, 10(4): 488-493. (LI Xiaofeng, ZHANG Chuyu, WANG Zuqing. Biological pollution and viral indicator in Donghu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(4): 488-493. (in Chinese))
- [31] 焦春香, 刘东平, 陶景丽, 等. 大理洱海水体粪大肠菌群污染状况初步调查[J]. 大理学院学报, 2010, 9(8): 29-31. (JIAO Chunxiang, LIU Dongping, TAO Jingli, et al. A preliminary investigation into Fecal Coliform pollution in

- Dali Erhai Lake [J]. Journal of Dali University, 2010, 9 (8):29-31. (in Chinese))
- [32] 王树生, 吕景才, 赵元凤, 等. 辽阳水库生物指标的分析与评价[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30 (增刊 1): 141-144. (WANG Shusheng, LÜ Jingcai, ZHAO Yuanfeng, et al. Analysis and valuation of biological index of Liaoyang Reservoir [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30 (Sup1): 141-144. (in Chinese))
- [33] 周小飞, 栾乔林, 黄少华, 等. 沙河水库水环境质量的调查与评价[J]. 华南热带农业大学学报, 2005, 11 (3): 47-49. (ZHOU Xiaofei, LUAN Qiaolin, HUANG Shaohua, et al. Assessment on water environment quality of Shahe Reservoir [J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2005, 11 (3): 47-49. (in Chinese))
- [34] 林凤翱, 于占国, 梁玉波, 等. 辽东湾沿岸贝类和环境中的粪大肠菌和细菌总数[J]. 海洋环境科学, 2004, 23 (3): 43-45. (LIN Fengao, YU Zhanguo, LIANG Yubo, et al. The Fecal Coliform and total bacteria in shellfish in the coastal environment of Liaodong Bay [J]. Marine Environmental Science, 2004, 23 (3): 43-45. (in Chinese))
- [35] 樊景凤, 宋立超, 张喜昌, 等. 辽东湾沿岸水域甲肝病毒和粪大肠菌群分布[J]. 海洋环境科学, 2004, 23 (4): 35-37. (FAN Jingfeng, SONG Lichao, ZHANG Xichang, et al. Distribution of hepatitis a virus and Faecal Coliform in the coastal Liaodong Bay [J]. Marine Environmental Science, 2004, 23 (4): 35-37. (in Chinese))
- [36] FAN Jingfeng, MING Hongxia, WU Lijun, et al. Investigation of Fecal Coliform and typical enteric virus in representative beaches of China [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 13 (2): 72-82.
- [37] 贺杰, 林凤翱, 卞正和, 等. 渤、黄海沿岸几种经济贝类及其生存环境中的粪大肠菌群[J]. 海洋环境科学, 2002, 23 (4): 42-46. (HE Jie, LIN Fengao, BIAN Zhenghe, et al. Fecal Coliform bacteria in shellfish and habitat in Bohai and Yellow Sea coast [J]. Marine Environmental Science, 2002, 23 (4): 42-46. (in Chinese))
- [38] 蔡雷鸣, 翁葵洲, 吴品煌, 等. 罗源湾海水中粪大肠菌群的来源及空间分布[J]. 海洋环境科学, 2009, 28 (4): 414-420. (CAI Leiming, WENG Zhenzhou, WU Pinhuang, et al. Spatial distribution and sources of Fecal Coliform bacteria in Luoyuan Bay [J]. Marine Environmental Science, 2009, 28 (4): 414-420. (in Chinese))
- [39] 华秀红, 王进, 韩岚, 等. 启东海域海洋生物污染调查评价[J]. 南京师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29 (1): 89-92. (HUA Xiuhong, WANG Jin, HAN Lan, et al. Investigation on pollution of seacoast ecosystem of Qidong, Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science, 2006, 29 (1): 89-92. (in Chinese))
- [40] 方涛, 李道季, 唐静亮, 等. 长江口及毗邻海域粪大肠菌和细菌总数在夏秋季的变化[J]. 海洋湖沼通报, 2010 (3): 36-40. (FANG Tao, LI Daoji, TANG Jingliang, et al. Distribution of the Fecal Coliform and total bacteria in Changjiang Estuary and its adjacent sea in summer and autumn [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010 (3): 36-40. (in Chinese))
- [41] 焦俊鹏, 章守宇, 杨红, 等. 杭州湾粪大肠杆菌和异养细菌的分布特征及其环境因子[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9 (3): 210-213. (JIAO Junpeng, ZHANG Shouyu, YANG Hong, et al. Distribution of Faecal Coliform bacteria and heterotrophic bacteria and its environment factors in Hangzhou Bay [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2000, 9 (3): 210-213. (in Chinese))
- [42] 杜爱芳. 浙江近岸海域细菌学分析[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29 (5): 523-528. (DU Aifang. Bacterial analysis in the water samples from the seacoast of Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science, 2003, 29 (5): 523-528. (in Chinese))
- [43] 张瑜斌, 章洁香, 肖丽华, 等. 湛江湾粪大肠菌群的时空分布及其与主要环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2012, 31 (4): 504-509. (ZHANG Yubing, ZHANG Jiexiang, XIAO Lihua, et al. Spatial and temporal distribution of Fecal Coliform and relationship between it and main environmental factors in Zhanjiang Bay [J]. Marine Environmental Science, 2012, 31 (4): 504-509. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-01-19 编辑: 熊水斌)

· 简讯 ·

《水利水电科技进展》再次入选 CSCD 核心期刊

经中国科学引文数据库(CSCD)定量遴选、专家定性评估,《水利水电科技进展》再次入选 CSCD 核心期刊。2015—2016 年度中国科学引文数据库收录来源期刊 1 200 种,其中中国出版的英文期刊 194 种,中文期刊 1 006 种。中文期刊中,核心期刊 872 种,扩展期刊 328 种。中国科学引文数据库来源期刊每两年遴选一次。每次遴选均采用定量与定性相结合的方法,定量数据来自于中国科学引文数据库,定性评价则通过聘请国内专家对期刊进行定性评估。定量与定性综合评估结果构成了中国科学引文数据库来源期刊。

(本刊编辑部供稿)