

浅谈我国海洋环境中人类肠病毒的污染监管

明红霞¹, 石婷婷¹, 苏洁¹, 樊景凤¹, 郭皓¹

(1.国家海洋环境监测中心 国家生态环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:介水传染病是当今世界主要环境问题之一, 其中人类肠病毒通过污染水体导致人类感染的胃肠道等疾病是主要传染病之一。本文以人类肠病毒经过污水处理厂排放为起点, 分析其进入海洋环境后通过海水或海产品等途径给人体健康带来的风险; 综述了国内外关于海洋环境中病原微生物的监测与评价技术体系的最新进展, 指出目前我国海洋环境微生物监测指标和评价方法还不能满足指示人类肠病毒污染的问题。基于此, 本文提出为更好地保护公众健康, 我国迫切需要制定切实可行的海洋环境中人类肠病毒的风险监管措施, 包括构建科学的海洋环境中人类肠病毒监测技术体系, 构建全国相关的监测网络体系, 构建海洋环境中人类肠病毒风险评价和预警体系, 制定加强我国海洋环境中人类肠病毒的污染监管办法等。

关键词:海洋环境; 人类肠病毒; 污染监管

中图分类号:X55

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2021)02-0303-06

Discussion on pollution control of human enteric viruses in marine environment of China

MING Hong-xia¹, SHI Ting-ting¹, SU Jie¹, FAN Jing-feng¹, GUO Hao¹

(1.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Water-borne infectious diseases are one of the major environmental problems in the world today, of which enteric viruses are the main pathogen that causes human gastrointestinal and other diseases. This paper analyzes the pollution of enteric viruses into the marine environment and the harm to human health caused by bathing beaches and seafood. This paper reviews the latest status of human enteric viruses surveillance in the marine environment at home and abroad, and points out that the current indicators and evaluation methods of microorganisms in the marine environment in China cannot indicate human enteric viruses contamination. Based on these, 4 suggestions are proposed. The first one is to formulate the technical supervision system. The second one is construct the related national monitoring network system of human enteric viruses in our marine environment. The third one is to carry out risk assessment and early warning research on human enteric viruses in our marine environment and construct the relevant system. The fourth one is to strengthen the supervision of human enteric viruses pollution in China's marine environment.

Key words: marine environment; human enteric viruses; pollution supervision

介水传染病是当今世界危害范围最广的环境问题之一, 其中病毒污染居于首位^[1], 在已知

的介水传播病毒中, 肠病毒是导致人类发病和死亡的主要病原体, 主要通过粪-口途径传播^[2]。人

收稿日期: 2020-03-26, 修订日期: 2020-04-22

基金项目: 国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项基金项目(2017YFC1404500); 国家自然科学基金项目(41406129); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807186); 辽宁省“百千万人才工程”项目

作者简介: 明红霞(1981—), 女, 山东德州人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为海洋微生物, E-mail: mingtianhx@163.com

通讯作者: 樊景凤(1972—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为海洋微生物学与生态学, E-mail: jffan@nmemc.org.cn

类肠病毒指可经过人类肠道系统进行传播的病毒性病原体,主要包括诺如病毒、甲肝病毒、戊肝病毒、肠道病毒、轮状病毒、杯状病毒、星状病毒和肠道腺病毒等,除可引起丙类传染病中报告病例数前两位的手足口病和其他感染性腹泻病外,还可引起病毒性肝炎、脊髓灰质炎等多种介水传播的乙类传染病,严重危害人体健康^[3]。

中科院院士贺福初在《求是》杂志上提出,目前全球生物安全形势非常严峻,病原体跨物种感染,跨地域传播,造成新发突发传染病不断出现,已成为世界各国共同面对的重大生物安全问题^[4]。人类肠病毒可通过污水、地表径流、固体废弃物填埋及化粪池进入饮用水水源地、河流、湖泊、水库,最终汇入海洋,海洋可为人类肠病毒提供栖息场所和传播机会^[5-6]。人类肠病毒在水环境中具有存活时间长(几天到上百天)、感染剂量低($10 \sim 100$ 个病毒粒子)、对热和一般消毒剂抵抗能力强及能被长距离输运等特点^[7]。双壳贝类能够富集海水中的人类肠病毒,海水浴场是人类肠病毒传染的高风险区域,肠病毒可通过生食海产品或误吞海水等途径进入人体。

随着沿海地区人口快速增长,由陆源排污带来的人类肠病毒导致近海污染加剧,由介水传播的人类肠病毒传染病案例不胜枚举,海洋环境中的人类肠病毒已严重威胁到人类公共安全及海产品安全。因此,迫切需要加强我国海洋环境中人类肠病毒污染的监管。围绕这一问题,本文从海洋环境中人类肠病毒的污染现状及其对人体健康的危害、海洋环境中人类肠病毒的监管现状及存在问题展开讨论,并就我国海洋环境中人类肠病毒监管给出对策建议。

1 海洋环境中人类肠病毒的污染现状及其对人体健康的危害

1.1 人类肠病毒可冲破污水处理的防线进入海洋环境

生活污水排放是人类肠病毒进入水环境的重要途径。据估计,肠病毒感染者的粪便中病毒粒子高达 $10^{10} \sim 10^{13}$ PFU/g^[7],城市生活污水作为人类粪便的主要接纳者,是人类肠病毒的重要载体,然而,国内外现行的污水处理工艺并不能将

人类肠病毒有效去除^[8-12]。澳大利亚、南非、美国、瑞士、埃及、法国等国家的几千个污水处理厂原污水中普遍存在人类肠病毒(腺病毒、轮状病毒、诺如病毒、埃可病毒等),其浓度可高达 10^5 PFU/L^[13],即使经过二级、三级处理后,污水中病毒浓度仍然较高,如美国夏威夷经二级处理的出水中病毒浓度仍高达 5222 PFU/L^[14],如此高浓度的人类肠病毒被排出后进入水环境,可能会导致循环污染。

1.2 海水中人类肠病毒的污染已严重威胁到公众健康

1.2.1 海水受人类肠病毒的污染状况不容乐观

从全球来看,约有 90% 的废水未经处理直接排放到河流、湖泊或海洋中^[15],海洋作为各种污水、河水的汇集地,普遍受到人类肠病毒的污染。地中海以色列近岸、波罗的海德国近岸和黑海罗马尼亚近岸的人类肠病毒阳性检出率分别为 27%、36% 和 22%;美国夏威夷近岸海水中人类肠病毒阳性检出率为 6%^[16];在巴西南部,87% 的养殖海水和 80% 的沉积物样本都检测到肠道腺病毒^[17]。我国近海海洋综合调查与评价专项(简称 908 专项)结果显示,2007 年全国 10 个典型海水浴场普遍受到人类肠病毒的污染,轮状病毒、星状病毒、脊髓灰质炎病毒、腺病毒和甲肝病毒的阳性检出率分别为 40%、35%、40%、35% 和 5%(表 1)^[18];2019 年 1 月—12 月,青岛第一海水浴场的人海排污口处人类肠病毒污染最为严重,其人类肠道腺病毒、星状病毒、诺如病毒和肠道病毒的阳性检出率分别为 100%、100%、75% 和 17%^[19]。

1.2.2 介海水传播的人类肠病毒给人体健康带来巨大威胁

因游泳、帆船、冲浪或其他海上娱乐活动而感染腹泻等疾病的主要病原体是人类肠病毒^[20]。每年因在不洁浴场中游泳而引发的腹泻性疾病多达 1.2 亿例,死亡人数 200 万以上^[21]。世界卫生组织在 2010—2014 年和美国在 2009—2010 年的调查结果均显示,诺如病毒是娱乐用水感染中最流行的病原体,占 45%。2014 年夏季,芬兰海水浴场相继暴发了 15 起疾病,1453 人腹泻,病原体是诺如病毒^[22]。2018 年,英国多地海水浴场

因诺如病毒感染而使近百人暴发腹泻性疾病, 导致浴场关闭。此外, 2014 年 1 月, 美国有两艘游轮上分别有近 700 名乘客和 170 名船员出现腹泻性疾病, 病原体也是诺如病毒^[23]。

表 1 全国 10 个海水浴场中人类肠病毒的污染状况^[18]
Tab.1 The pollution of human enteric viruses in 10 bathing beaches of China^[18]

病毒种类	各浴场人类肠病毒阳性检出率/(%)										10个海水浴场肠病毒阳性检出率/(%)
	北戴河老虎石浴场	大连金石滩浴场	烟台金石滩浴场	青岛第一海水浴场	连云港连岛浴场	宁波松兰山浴场	厦门黄厝浴场	深圳大小梅沙浴场	北海银滩浴场	三亚亚龙湾浴场	
轮状病毒	100	100	0	0	0	50	50	100	0	0	40
星状病毒	0	100	100	0	0	50	0	0	0	100	35
脊髓灰质炎病毒	50	50	0	50	50	0	0	50	0	100	40
腺病毒	0	100	50	50	50	100	0	0	0	0	35
甲肝病毒	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	5
诺如病毒	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.3 海产品中人类肠病毒的污染可致食源性疾病暴发流行

1.3.1 海产品普遍受到人类肠病毒的污染

双壳贝类是人类肠病毒的主要传播载体, 世界各地每年均有因生食海产品导致的食源性人类肠病毒的疾病暴发。在美国, 每年有 3300 万例食源性疾病, 其中 8% 是因生食牡蛎引起的, 主要病原体为诺如病毒。在腹泻性疾病的暴发

案例中, 硬壳蛤和牡蛎分别占 54% 和 44%^[24]。在中国, 双壳贝类也普遍受到人类肠病毒的污染, 908 专项调查结果显示, 全国 10 个沿海城市的蛤蜊、牡蛎、贻贝、缢蛏、竹蛏、毛蚶、泥蚶、扇贝等双壳贝类均存在不同程度的人类肠病毒污染, 其中, 尤以人们消费最多的牡蛎和贻贝的污染最为严重(表 2)^[25]。

表 2 我国海产贝类中人类肠病毒的污染状况^[25]
Tab.2 The pollution of human enteric viruses in marine shellfish of China^[25]

贝类名称	人类肠病毒阳性检出率/(%)					
	甲肝病毒	诺如病毒	轮状病毒	星状病毒	脊髓灰质炎病毒	肠道腺病毒
蛤蜊	4	15	9	3	15	5
牡蛎	6	12	0	18	29	29
贻贝	6	6	0	6	17	0
缢蛏、竹蛏	0	5	11	5	16	16
毛蚶、泥蚶	11	22	11	0	0	11
扇贝	13	0	0	13	0	13
所有贝类	5	12	7	6	15	9

1.3.2 因食用被人类肠病毒污染的海产品导致大量疾病暴发

海产品作为人类肠病毒传播的中间宿主, 对肠病毒传播扩散起到了推波助澜的作用。每年因食源性疾病导致的死亡人数可达 180 万, 而因生食或食用未煮熟的海产品引起的食物中毒占 20%, 除甲肝病毒外, 诺如病毒是美国、英国、澳大利亚、日本、中国等国家食源性疾病的主要病

原体^[26]。1978 年, 我国宁波市发生一起由生食泥蚶所致的甲肝暴发, 35 天内出现 1265 例病例^[27]。1988 年, 上海发生因食用被甲肝病毒污染的毛蚶而导致甲肝大流行, 造成 31 万多人感染, 31 人死亡, 直接经济损失近 5 亿元^[28]。2006 年 11 月, 日本、新加坡、意大利等地相继发生了与贝类有关的诺如病毒集体感染事件, 特别是日本, 不到两个月累计感染 35.76 万人^[29]; 2016 年

12月和2017年4月,加拿大先后发生两次与食用牡蛎有关的诺如病毒感染,造成449人感染,12个养殖场关闭^[30]。此外,欧洲、法国、意大利、爱尔兰、丹麦、英国和美国也有大量的因食用诺如病毒污染的双壳贝类引发的疾病暴发案例^[31]。

2 海洋环境中人类肠病毒的监管现状及存在问题

2.1 水环境中微生物监测指标不能指示人类肠病毒的污染

因水环境中的病原体种类繁多,且多来源于粪便,国内外普遍采用粪便污染指示细菌(FIB)——大肠菌群或肠球菌反映水体中包括人类肠病毒在内的病原体污染状况。目前,美国环境保护署(EPA)、世界卫生组织、加拿大等国家和组织采用肠球菌来评价海水浴场受到人类粪便污染的程度^[32-33],美国EPA和加拿大环境署采用分区分级分类的方法,通过关停浴场或贝类采集区等方式进行地表水和海洋环境中病原体的监督与管理。除医院废水外^[34],我国采用总大肠菌群或粪大肠菌群指标评价城镇污水、地下水、地表水、浴场海水中的粪便污染^[35-38],在海水浴场或海水增养殖区尚无相应监管措施。然而,在美国加利福尼亚浴场、德国沿岸海洋潟湖、芬兰浴场、我国大连星海浴场等区域的大量研究及流行病学调查结果表明,粪便污染指示细菌无法准确指示水环境中的病毒污染情况,在粪便污染指示细菌指标合格的样本中,仍有肠病毒被检出^[39-40]。

2.2 人类肠病毒尚未纳入我国海洋环境和海产品监测范畴

20世纪90年代就有学者指出,肠道腺病毒是科学的粪便污染指示病毒,后来这一观点在欧洲许多国家相继得到肯定,并被逐步应用到实际环境监测中^[41]。美国EPA于2012年提出,在监测FIB的同时,将人类肠病毒、噬菌体、产气荚膜梭菌等作为选择性指标纳入浴场海水质量监测范围^[32];欧盟在2005年颁布的食品微生物标准包括海产品中诺如病毒的检测^[42];国际标准化组织(ISO)于2013年发布了检测贝类中甲肝病毒和诺如病毒的标准方法^[33]。我国虽然已在环境监测的行业标准中颁布了肠病毒的检测方法^[43],

但是肠病毒尚未被纳入海洋环境的监测范围,一旦海洋环境被人类肠病毒污染且未能及时防控,将借助海水或海产品广泛传播,导致疫情的大规模暴发,严重威胁公众健康。

2.3 我国水质标准中的微生物评价方法不能表征肠病毒的人体健康风险

微生物定量风险评估(QMRA)用于定量评价病原体引起人类感染、致病或致死风险的概率^[44]。世界卫生组织已发布关于QMRA的应用指南,强调除饮用水外,娱乐水体和再生水都有必要进行定量微生物风险评估,以指导公众防范健康风险^[15]。该方法已被荷兰、法国、日本等国家应用到有关水质和公众健康的管理策略中,成为环境风险评价的准则和指南^[45]。在我国,人类肠病毒的风险评价技术已应用到了饮用水源水、景观水^[46]、再生水^[47-49]以及海水中^[50]。然而,除医疗机构水污染物排放标准外,在我国现行的地下水、地表水、污水、养殖用水以及海水环境卫生标准中,微生物的安全评价主要是基于指示细菌浓度的等级划分(表3)^[34-38],尚未对其潜在人体健康风险进行评估,亦未开展人类肠病毒造成的人体健康风险评价。

3 我国海洋环境中人类肠病毒监管对策建议

3.1 构建科学的海洋环境中人类肠病毒监测技术体系

在现行监测海洋环境中粪便污染指示细菌的同时,制定海洋环境中人类肠病毒的监测标准,在入海排污口、海水浴场、海水增养殖区等近岸海域增加海水和海产品中人类肠病毒的监测指标,包括甲肝病毒、诺如病毒、轮状病毒和肠道腺病毒等,全面掌握我国海洋环境中人类肠病毒的污染情况,并制定浴场关闭等风险防范措施。

3.2 加强海洋环境中人类肠病毒相关的基础科研和监测产品的研发工作

加强我国海洋环境中人类肠病毒的基础研究,研发海洋环境中人类肠病毒的快速精准检测方法以及试剂盒、生物芯片等“硬核”成果,加强海洋环境中人类肠病毒的健康风险评估和预警技术研发,研究海洋环境中人类肠病毒的人体健康风险阈值,将防控模式由被动预警变为主动防控,

表 3 不同水环境中微生物的评价标准

Tab.3 Evaluation criteria of microorganisms in different water environments

标准名称	生物学指标	分类等级					
		I 类		II 类	III 类	IV 类	V 类
		A 标准	B 标准				
《医疗机构水污染物排放标准》 GB18466-2006 ^[34]	粪大肠菌群/个·L ⁻¹			达标排放 ^a			
	肠道致病菌			不得检出			
	肠道病毒			不得检出			
《城镇污水处理厂污染物排放标准》 GB18918-2002 ^[35]	粪大肠菌群/个·L ⁻¹	≤1000	≤10000	≤10000	—	—	—
《地表水环境质量标准》 GB 3838-2002 ^[36]	粪大肠菌群/个·L ⁻¹	≤200		≤2000	≤10000	≤20000	≤40000
《地下水质量标准》 GBT 14848-2017 ^[37]	总大肠菌群/ MPN·(100 mL) ⁻¹ 或 CFU·(100 mL) ⁻¹		≤3.0			≤100	>100
	菌落总数CFU·mL ⁻¹		≤100			≤1000	>1000
《海水水质标准》 GB 3097-1997 ^[38]	大肠菌群/个·L ⁻¹	≤10000供人生食的贝类培养殖水质≤700				—	—
	粪大肠菌群/个·L ⁻¹	≤2000供人生食的贝类培养殖水质≤140				—	—
	病原体	供人生食的贝类培养殖水质不得含有病原体 ^b					

注: a: 粪大肠菌群的排放标准为500, 预处理标准为5000; b: 沙门氏菌、霍乱弧菌、志贺氏菌、大肠埃希氏菌、铜绿假单胞菌

杜绝介水传播人类肠病毒传染病疫情的暴发。

3.3 加强我国海洋环境中人类肠病毒的污染监管

回顾历史, 让我们再次意识到环境监管的重要性, 防微杜渐, 需要切实落实海洋环境中人类肠病毒的监管工作。我国沿海分布着数百个海水浴场和海水增殖殖区。水产养殖产量居世界首位, 水质微生物安全和海产品食用安全是保障公众健康、蓝色经济可持续发展的根基。因此, 建议将海洋环境中人类肠病毒的防线关口前移至污水处理厂和入海排污口, 开展海洋环境中人类肠病毒污染的常规、应急监测。坚持陆海统筹理念, 严把人类肠病毒入海的源头关, 切断粪-口传播途径, 做好污水处理与监管。建议在现有环境监测工作基础上, 增补人类肠病毒作为出水控制指标; 加强污水消毒环节, 实现病原体的有效消杀, 阻断人类肠病毒通过污水进行传播扩散的途径; 构建全国海洋环境中人类肠病毒的监测网络, 打造陆海统筹监管“一张网”, 做好介水传播传染病疫情的应急管理; 依据评价结果实施分区分级分类监管。

参考文献:

[1] 郑 祥, 张 巍, 石 磊, 等. 新型冠状病毒在水环境中潜在

传播途径与风险控制关键节点[J]. 环境保护, 2020, 48(3/4): 87-89.

[2] 郭 旋, 李君文, 王新为, 等. 水中肠道食源性病毒的多重 RT-PCR检测法[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(10): 876-880.

[3] 夏海华, 原 韬, 于 冲, 等. 水体中的肠道致病病毒[J]. 黑龙江科学, 2014, 5(4): 9-11, 22.

[4] 贺福初, 高福锁. 生物安全: 国防战略制高点[J]. 求是, 2014, (1): 53-54.

[5] 岳龙涛. 海洋环境主要人致病性病原体寡核苷酸检测芯片的研制与应用[D]. 济南: 山东省医学科学院, 2009.

[6] 明红霞, 樊景凤, 朱 琳. 渤海湾肠道病毒的季节分布及其污染类型分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 162-169.

[7] 明红霞. 海水中胃肠道感染病毒的原定性检测及风险评价[D]. 天津: 南开大学, 2012.

[8] 吉 铮, 王晓昌, 张崇森. 城市生活污水及二级处理水中手足口病病毒及肠道病毒的赋存状态[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 1029-1035.

[9] UEKI Y, SANO D, WATANABE T, et al. Norovirus pathway in water environment estimated by genetic analysis of strains from patients of gastroenteritis, sewage, treated wastewater, river water and oysters[J]. Water Research, 2005, 39(18): 4271-4280.

[10] MASCLAUX F G, HOTZ P, FRIEDLI D, et al. High occurrence of hepatitis E virus in samples from wastewater treatment plants in Switzerland and comparison with other enteric viruses[J]. Water Research, 2013, 47(14): 5101-5109.

[11] PUSCH D, OH D Y, WOLF S, et al. Detection of enteric viruses and bacterial indicators in German environmental waters[J]. Archives of Virology, 2005, 150(5): 929-947.

[12] 王晓昌, 张崇森, 马晓妍. 城市污水再生利用和水环境质量保障[J]. 中国科学基金, 2014, 28(5): 323-329.

[13] ADEFISOYE M A, NWODO U U, GREEN E, et al.

- Quantitative PCR detection and characterisation of human adenovirus, rotavirus and hepatitis A virus in discharged effluents of two wastewater treatment facilities in the eastern cape, South Africa[J]. *Food & Environmental Virology*, 2016, 8(4): 262-274.
- [14] FUJIOKA R S, LOH P C. Recycling of water for irrigation: Persistence of enteroviruses in sewage effluent and natural waters receiving the effluent[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1978, 9(2): 213-226.
- [15] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality, fourth edition[S]. 2011, ISBN: 9789241548151.
- [16] PREVOST B, LUCAS F S, GONCALVES A, et al. Large scale survey of enteric viruses in river and waste water underlines the health status of the local population[J]. *Environment international*, 2015, 79: 42-50.
- [17] EL-SENOUSY W M, ABOU-ELELA S I. Assessment and evaluation of an integrated hybrid anaerobic-aerobic sewage treatment system for the removal of enteric viruses[J]. *Food & Environmental Virology*, 2017, 9(3): 287-303.
- [18] 樊景凤, 明红霞, 王 斌, 等. 中国近海病原生物[M]. 北京: 海洋出版社, 2019.
- [19] 苗 静. 水中人类肠病毒污染的预测新技术研究[D]. 北京: 军事科学院, 2019.
- [20] 樊景凤, 陈吉平. 近岸海洋环境中人类致病性病毒的研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(S2): 129-136.
- [21] Giampaoli S, Spica V R. Health and safety in recreational waters[J]. *Bulletin of the World Health Organization*, 2014, 92(2): 79-79.
- [22] KAUPPINEN A, AL-HELLO H, ZACHEUS O, et al. Increase in outbreaks of gastroenteritis linked to bathing water in Finland in summer 2014[J]. *Eurosurveillance*, 2017, 22(8): 30470.
- [23] PARRA G I, GREEN K Y. Genome of Emerging Norovirus GII. 17, United States, 2014[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2015, 21(8): 1477-1479.
- [24] PHIL B. Management of Norovirus Contaminated Shellfish Production Areas: where are we now and where are we going?[C]//ICMSS09. Nantes, France, 2009.
- [25] MING H X, FAN J F, WU L J, et al. Prevalence of human enteric viruses and a potential indicator of contamination in shellfish in China[J]. *Journal of Food Safety*, 2013, 33(2): 209-214.
- [26] RASMUSSEN L D, SCHULTZ A C, UHRBRAND K, et al. Molecular evidence of oysters as vehicle of Norovirus GII. P17-GII. 17[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2016, 22(11): 2024-2025.
- [27] 俞顺章. 上海甲肝流行的反思[J]. *科学*, 1988, (4): 285-290.
- [28] TANG Y W, WANG J X, XU Z Y, et al. A serologically confirmed, case-control study, of a large outbreak of hepatitis A in China, associated with consumption of clams[J]. *Epidemiology and Infection*, 1991, 107(3): 651-658.
- [29] 刘军义. 海产诺如病毒(Norovirus)检测和养殖水体生物修复研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉病毒研究所, 2007.
- [30] MEGHNATH K, HASSELBACK P, MCCORMICK R, et al. Outbreaks of Norovirus and acute gastroenteritis associated with British Columbia oysters, 2016-2017[J]. *Food and Environmental Virology*, 2019, 11(2): 138-148.
- [31] KIM J H, LEE J, HONG S, et al. Cholera outbreak due to raw seafood consumption in South Korea, 2016[J]. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 2018, 99(1): 168-170.
- [32] EPA-820-F-12-061, 2012 Recreational water quality criteria[S].
- [33] ISO/TS 15216-1: 2013, Microbiology of food and animal feed- Horizontal method for determination of hepatitis A virus and norovirus in food using real-time RT-PCR-Part 1: Method for quantification[S].
- [34] GB 18466-2005, 医疗机构水污染物排放标准[S].
- [35] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [36] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [37] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [38] GB 3097-1997, 海水水质标准[S].
- [39] FAN J F, MING H X, WU L J, et al. Investigation of fecal coliform and typical enteric virus in representative beaches of China[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 13(2): 72-82.
- [40] JIANG S C, CHU W P, HE J W. Seasonal detection of human viruses and coliphage in Newport Bay, California[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(20): 6468-6474.
- [41] 孙志浩, 明红霞, 王 斌. 替代指示微生物在粪便污染源示踪中的研究现状[J]. *生命科学*, 2019, (6): 620-627.
- [42] Commission Regulation (EC) No 2073/2005 of 15 November 2005 on microbiological criteria for foodstuffs[Z].
- [43] HY/T 147.5-2013, 海洋监测技术规程第5部分: 海洋生态[S].
- [44] 石 岩, 常永凯, 明红霞, 等. 大连付家庄海水浴场人体健康风险评估[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(4): 517-522.
- [45] HERTEL R F. Outline on risk assessment programme of existing substances in the European Union[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 1996, 2(2/3): 93-96.
- [46] 张崇森. 水环境中肠道病原体的PCR检测方法与健康风险评估研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [47] 何星海, 马世豪, 李安定. 再生水利用中肠道病毒的健康风险[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(3): 88-90.
- [48] 仇付国, 王晓昌. 城市回用污水中病毒对人体健康风险的评价[J]. *环境与健康杂志*, 2003, 20(4): 197-199.
- [49] 张德友. 北京地区水环境中轮状病毒的分布规律及其健康风险评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [50] MING H X, ZHU L, FENG J F, et al. Risk assessment of rotavirus infection in surface seawater from Bohai Bay, China[J]. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, 20(4): 929-940.