

城市景观娱乐水体微生物风险评价

孙傅¹, 沙婧¹, 张一帆^{1,2}, 刘彦华¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. Department of Chemical & Environmental Engineering, Yale University, New Haven, CT 06511, USA)

摘要: 随着城市居民亲水娱乐活动日益增加, 开展景观娱乐水体微生物风险评价, 并以此为基础开展有效的风险管理, 对于人口密集的城市区域尤为重要。以我国南方某城市3个典型景观娱乐水体为案例, 采用定量微生物风险评价的方法框架, 综合运用水质监测、社会调查、文献调研等方法开展暴露评价, 并由此开展基于粪大肠菌(FC)、大肠埃希氏菌(EC)和肠球菌(ENT)的多微生物指标人体健康风险评价。结果表明, 基于FC、EC和ENT的多指标微生物风险评价结果具有一定的一致性和可比性; 位于城市居住区的B河段不宜作为人体直接或非直接接触的娱乐水体, 其对公众健康的风险主要来源于用作家庭杂用水; 位于城市公共开放空间的C河段和风景旅游区的E湖可以满足现有的景观娱乐功能要求, 其对公众健康的风险主要来源于各种休闲娱乐活动; 应重视与城市景观娱乐水体功能不匹配的无序利用(如作为家庭杂用水)对公众健康的风险。

关键词: 城市水体; 景观娱乐; 微生物风险评价; 暴露评价; Monte Carlo 模拟

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0933-10

Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses

SUN Fu¹, SHA Jing¹, ZHANG Yi-fan^{1,2}, LIU Yan-hua¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Chemical & Environmental Engineering, Yale University, New Haven, CT 06511, USA)

Abstract: With the increasing public access to urban water bodies for aesthetical and recreational purposes, it is of critical importance for densely populated urban areas to conduct microbial risk assessment and accordingly implement effective risk management. Based on the methodology of quantitative microbial risk assessment, a case study was conducted on three typical urban water bodies for aesthetical and recreational uses in a southern city in China. Exposure assessment was carried out through water quality monitoring, field survey and literature review, and accordingly human health risk was assessed with different dose-response equations based on fecal coliforms (FC), *Escherichia coli* (EC) and Enterococci (ENT). Microbial risk estimated by different dose-response equations was found consistent with and comparable to each other. Stream B located in a residential area was not suitable for primary- or secondary-contact recreational uses, and its microbial risk to the public mainly came from water abstraction for household miscellaneous uses. Stream C and Lake E, located in a public open space and a scenic area respectively, could meet the current recreational requirements, and their microbial risk to the public was generally attributed to various recreational activities. It was necessary to address the public health risk associated with the unauthorized or inappropriate water uses (e. g. abstraction for household miscellaneous uses) of urban aesthetical and recreational water bodies.

Key words: urban water bodies; aesthetical and recreational uses; microbial risk assessment; exposure assessment; Monte Carlo simulation

景观娱乐是地表水体的重要功能之一, 对于城市水体而言, 无论其是否具有其它使用功能, 它们在客观上都发挥着一定的景观娱乐功能^[1]。根据水体与人体接触程度的不同, 景观娱乐活动通常可以分为直接接触(如游泳、潜水、冲浪等)、非直接接触(如划船、捕鱼等)和无接触(如欣赏等)三类^[2]。随着社会经济发展和人们对生活品质的要求提高, 城市越来越重视水体周边滨水空间的规划和设计, 以满足公众亲水娱乐活动的需求^[3,4]。但是, 城市水体容易受到各种自然源和人为源的污染, 如污水处理厂出水、降雨径流、排水管网溢流、散排生活污水

等, 人类和动物排泄的各种细菌(如沙门氏菌、志贺氏菌等)、病毒(如甲肝病毒、诺如病毒等)和原生动物(如隐孢子虫、贾第鞭毛虫等)等病原微生物进入水体后将会对亲水休闲娱乐活动的参与者构成健康风险^[2]。大量研究表明, 在受到微生物污染的水体中进行游泳、划船、钓鱼等娱乐活动, 有可能引发急性肠胃疾病、呼吸道疾病、皮肤疾病、耳部感

收稿日期: 2012-05-24; 修订日期: 2012-07-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07318-001-02, 2009ZX07318-008)

作者简介: 孙傅(1981~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为城市水系统水质模拟与风险管理, E-mail: sunfu@tsinghua.org.cn

染、眼部不适等症状^[5-10]。因此,在当前城市区域人口密集、公众亲水娱乐活动日益增多、城市水环境质量总体较差^[11,12]、大量城市水体依靠污水处理厂出水补给^[13,14]的形势下,开展景观娱乐水体微生物风险评价研究,并以此为基础提出有效的风险管理策略,具有现实迫切性和实践意义。

近 10 年来,美国、加拿大、荷兰、新加坡、南非、泰国等开展了大量针对景观娱乐水体的微生物风险评价研究,评价了游泳、划船、钓鱼、冲浪、喷泉等亲水休闲娱乐活动中参与者的健康风险,选取的微生物评价指标包括大肠埃希氏菌、肠球菌、隐孢子虫、贾第鞭毛虫、沙门氏菌、诺如病毒、腺病毒等^[9,15-23]。目前,我国针对景观娱乐水体微生物风险的研究尚少,仇付国等^[24,25]和何星海等^[26]评价了再生水用作景观娱乐用水时肠道病毒对人体健康的风险,张崇森等^[27,28]评价了西安市景观娱乐水体中肠道病毒、大肠埃希氏菌、沙门氏菌、志贺氏菌等对人体健康的风险。同时,现有微生物风险评价研究中人体暴露途径和频率特别是暴露剂量通常是基于经验和假设确定的^[20,24,26-28],缺乏现实数据的支持,因而在具体案例应用中可能忽略某些重要暴露途径或者导致风险评价结果具有较大的不确定性,而近些年出现的关于亲水休闲娱乐活动中暴露剂量的研究^[22,29,30]则为提高微生物风险评价结果的可靠性提供了可能。本研究以我国南方某城市的典型景观娱乐水体为案例,采用定量微生物风险评价(quantitative microbial risk assessment, QMRA)的方法框架,综合运用水质监测、社会调查、文献调研等研究方法开展暴露评价,并由此开展基于多微生物指标的人体健康风险评价。

1 材料与方法

1.1 案例城市和水体

本研究以我国南方某城市为案例,该市属于典型的南方河网城市,水系发达。综合考虑水体类型和暴露途径的代表性,本研究选择以下 3 个景观娱乐水体开展微生物风险评价。

B 河段位于该市老城区中一处繁华的商业街区,河道从两侧密集的老式居民住宅、小型商铺和餐馆中穿过,这些建筑的墙体与水体直接相连,有些建筑设有台阶通往水体。该河段水面较窄,以景观功能为主,无水上娱乐项目。

C 河段为环绕该市老城区的河道中一段,河道西侧为公园,东侧是主干道路,东侧河滨带设有亲水

走廊。该河段水面较宽,有游船通行,兼有景观和娱乐功能。

E 湖位于该市新城区,属于城市内湖,是该市的一个重要旅游景区,兼有景观和娱乐功能。E 湖四周分布着众多绿地、广场、游乐园等,同时水上设有游船、快艇等娱乐项目,节假日游客众多。

1.2 QMRA 方法

QMRA 是指利用风险评价原理定量评估人体暴露于致病微生物后出现不良健康效应可能性的过程^[31-33]。虽然不同研究^[31-33]对 QMRA 方法的描述存在差异,但它们总体上遵循了美国国家研究委员会(National Research Council)1983 年提出的风险评价方法框架,包括危害识别、剂量-反应评价、暴露评价和风险表征 4 个步骤^[34]。该方法框架在文献^[31-34]中已有详细论述,并且在大量案例研究^[15-21,24-28]中得到应用,故不再赘述。本研究亦基于该方法框架开展 QMRA,以下结合案例研究说明具体方法和内容。

1.3 危害识别

如前文所述,大量研究表明,在受到微生物污染的水体中进行亲水娱乐活动时,水中的致病微生物有可能引发急性肠胃疾病、呼吸道疾病、皮肤疾病、耳部感染、眼部不适等症状^[5-10]。由于水中病原微生物种类繁多,但通常数量较少,分离、培养和量化困难,所以在实践中世界各国都是通过监测适当的微生物替代指标来指示病原微生物的多寡,由此评估水体的微生物污染状况及其对人体健康的风险^[2,35]。国内外常用的微生物指标包括总大肠菌(total coliforms, TC)、粪大肠菌(fecal coliforms, FC)、大肠埃希氏菌(*Escherichia coli*, EC)和肠球菌(enterococci, ENT)^[36]。考虑到剂量-反应方程的可获得性(见 1.4 节),本研究选取 FC、EC 和 ENT 这 3 个微生物指标开展人体健康风险评价。

1.4 剂量-反应评价

表 1 汇总了文献中报道的表征水体中微生物浓度与暴露人群中不良健康效应发生率之间定量关系的剂量-反应方程,这些方程均适用于本研究涉及的淡水水体。表 1 中除了编号为 DR3 的关于 EC 的剂量-反应方程需要输入微生物摄入量之外,其它 4 个方程只需要输入水体中微生物浓度即可。这是因为这 4 个剂量-反应方程都是基于游泳行为建立的,与游泳行为的暴露剂量相对应。因此,当利用这 4 个公式计算其它暴露途径(如划船、钓鱼等)的人体健康风险时,应对公式中的微生物浓度 M 进行修

正,以体现不同暴露剂量的影响^[38]. 修正方法见式(1).

$$M' = M \times V_{\text{non-swim}} / V_{\text{swim}} \quad (1)$$

表1 微生物风险评价的剂量-反应方程

Table 1 Dose-response equations for microbial risk assessment

编号	指标	剂量-反应方程	变量含义及取值	文献来源
DR1	FC	$\log_{10} \frac{Ps}{1-Ps} = 0.18 \times \log_{10} M - 1.44$	Ps: 感染疾病的概率; M: 每 100 mL 水中 FC 数量	[37]
DR2	FC	$Ps = 5.21 \times \log_{10} M + 3.81$	Ps: 每 1 000 人出现肠胃疾病症状的数量; M: 每 100 mL 水中 FC 数量	[6]
DR3	EC	$Ps = 1 - \left[1 + \frac{d}{d_{50}} (2^{1/\alpha} - 1) \right]^{-\alpha}$	Ps: 感染疾病的概率; d: 摄入剂量; d ₅₀ : 半数感染剂量, 取 8.6×10^7 ; α : 斜率参数, 取 0.177 8	[31]
DR4	EC	$Ps = 10.39 \times \log_{10} M - 5.56$	Ps: 每 1 000 人出现肠胃疾病症状的数量; M: 每 100 mL 水中 EC 数量	[6]
DR5	ENT	$Ps = 14.30 \times \log_{10} M - 4.50$	Ps: 每 1 000 人出现肠胃疾病症状的数量; M: 每 100 mL 水中 ENT 数量	[6]

1.5 暴露评价

暴露评价是本研究的重点内容之一,主要包括识别暴露人群和途径以及量化暴露频率、浓度和剂量. 本研究通过社会调查确定暴露人群、途径和频率,于 2011 年 5 月对 B、C 和 E 这 3 个案例水体开展现场调查,同时访谈水体周边居民和正在进行各种亲水休闲娱乐活动的人群;通过水质监测确定暴露浓度,于 2011 年 1 月、5 月、6 月和 10 月对 3 个案例水体进行了 12 个批次的采样,检测其中 FC、EC 和 ENT 等指标的浓度,具体方法参见文献[36];通过文献调研收集关于亲水休闲娱乐活动中暴露剂量研究的最新成果,并结合案例水体暴露人群和途径的具体特征,确定不同暴露途径的暴露剂量.

1.6 风险表征

在上述步骤的基础上,对于每种暴露途径,根据表 1 所示的剂量-反应方程可以计算单次暴露的健康风险 Ps. 设年暴露次数为 N,则暴露人群的年健康风险 Py 的计算公式如式(2)所示.

$$Py = 1 - (1 - Ps)^N \quad (2)$$

考虑暴露频率、浓度和剂量的可变性和不确定性,本研究通过 Monte Carlo 模拟计算不同暴露途径下人体健康风险的概率分布,计算步骤如图 1 所示,其中计算次数 I 设为 10 000. 在此基础上,可以进一步计算不同人群在多种暴露途径下的健康风险,评价风险是否可接受、各种暴露途径的贡献等.

2 结果与分析

2.1 暴露评价

2.1.1 暴露人群和途径

通过现场考察和居民问卷调查发现,B 河段的

式中 M' 和 M 分别表示修正后微生物浓度和水体中实际微生物浓度,V_{swim} 和 V_{non-swim} 分别表示游泳和其它非游泳暴露途径的摄入量.

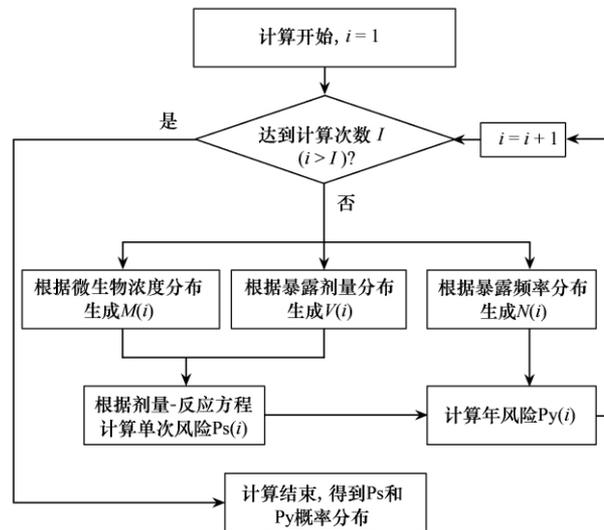


图1 运用 Monte Carlo 模拟计算微生物风险的步骤

Fig. 1 Procedure of Monte Carlo simulation for microbial risk assessment

暴露人群可以分为 2 类,即职业人群和非职业人群. 职业人群主要包括从事河道保洁以及在河道沿岸从事自行车修理的人员,前者的日常工作是乘船打捞水体中杂物,后者需要在日常工作中取用河道中的水. 这 2 类人群在工作中与水体频繁接触. 非职业人群是指河道沿岸的普通居民,主要暴露途径是取河道中的水作家庭杂用,如拖地、浇花、擦洗家具等,也有少量居民在河道从事休闲活动,如钓鱼.

C 河段的暴露人群主要是从事休闲娱乐活动的人群,主要暴露途径是钓鱼. 虽然河道边的警示牌明令禁止游泳和垂钓,但是钓鱼仍然构成公众暴露的主要途径. 另外,C 河段可以通行游船,多以大型游船为主,因此游客暴露水体的可能性较小,故不予考虑.

E 湖是该市一个重要的旅游景区,其暴露人群也可以分为职业人群和非职业人群 2 类。职业人群是指从事游船、快艇等水上交通、娱乐工具驾驶的人群,非职业人群是指在水体周边进行休闲娱乐活动的本地居民和外地游客。需要指出的是,本地居民和外地游客的暴露途径存在明显差异,本地居民的休闲娱乐活动更为多样化,包括划船、观赏喷泉、捕捉鱼虾、钓鱼、游泳等,而外地居民以划船和观赏喷泉为主。虽然 E 湖也设有禁止游泳和垂钓的警示牌,但是这些暴露途径仍然存在。

2.1.2 暴露频率

根据 3 个案例水体暴露人群的问卷调查,整理得到各个暴露人群的暴露途径及其相应的暴露频率,结果如表 2 所示。对于表 2 中暴露人次低于 20 的暴露途径以及无接触的情况,在后续微生物风险计算时认为其暴露频率服从均匀分布,取值为其平均暴露频率;对于暴露人次大于或等于 20 的暴露途径,风险计算时取其经验分布作为输入。

2.1.3 暴露剂量

本研究中游泳的暴露剂量在综合文献 [22, 29, 30, 39] 研究结果的基础上得到,划船和钓鱼的暴露剂量直接采用文献 [30] 的研究结果,游船驾驶的暴露剂量采用文献 [30] 中摩托艇的研究结果替代。河道保洁、自行车修理、赏玩喷泉、捕捉鱼虾、洗手、擦洗家具、洗衣等暴露途径均需要手部等多次接触水体,并且可能出现水花飞溅,因此认为其暴露剂量与文献 [30] 中趟水和泼水的暴露剂量相当。拖地、浇花、冲厕等暴露途径通常借助工具或容器完成,人体与水体接触的可能性低于洗手、擦洗家具、洗衣等,但是由于现有文献中缺乏可以直接参照的数据,本研究仍采用文献 [30] 中趟水和泼水的暴露剂量替代,因而是偏于保守的。同时,参照文献 [17, 21, 22, 33] 的方法,本研究认为表 2 中所列各种暴露途径(除无接触之外)的暴露剂量均服从对数正态分布,其相应正态分布的参数 μ 和 σ 列于表 3 中。

表 2 微生物风险的暴露途径及其频率
Table 2 Routes and frequencies of microbial exposure

案例水体	暴露人群及样本数	暴露途径	暴露人次	平均暴露频率 /次·a ⁻¹	暴露频率的概率分布
B 河段	职业人群 (6 人)	河道保洁	2	365.0	均匀分布
		自行车修理	4	365.0	均匀分布
		无接触	26	0.0	均匀分布
	非职业人群 (本地居民 74 人)	钓鱼	2	78.2	均匀分布
		拖地	42	301.7	经验分布
		擦洗家具	20	328.5	经验分布
		洗衣	7	208.6	均匀分布
		洗手	4	365.0	均匀分布
		浇花	17	239.2	均匀分布
C 河段	休闲娱乐人群 (13 人)	钓鱼	13	216.5	均匀分布
	职业人群(4 人)	游船驾驶	4	365.0	均匀分布
无接触		10	0.0	均匀分布	
划船		42	14.9	经验分布	
赏玩喷泉		15	51.3	均匀分布	
非职业人群 (本地居民 80 人)		捕捉鱼虾	7	225.4	均匀分布
		浇花	9	96.0	均匀分布
		钓鱼	6	75.3	均匀分布
		游泳	5	52.1	均匀分布
E 湖	非职业人群 (外地游客 77 人)	无接触	15	0.0	均匀分布
		划船	58	6.0	经验分布
		赏玩喷泉	10	2.2	均匀分布
		捕捉鱼虾	1	12.0	均匀分布

2.1.4 暴露浓度

表 4 所示为 2011 年 3 个案例水体中 FC、EC 和 ENT 监测结果的统计特征。从中可见看出,对于每

一个水体而言,指示微生物的检出率按照 FC、ENT、EC 的次序递减;对于每一项微生物指标而言,其检出率通常按照 B、C、E 的次序递减。从各项微生物

指标的检出值也可以看出 ,B、C、E 这 3 个水体受到微生物污染的程度依次递减. 详细的监测结果及其讨论参见文献 [36]. 由于本研究中暴露浓度的数据量有限 ,尚不足以推导或设定其概率分布 ,因此在采用图 1 所示的步骤计算微生物风险的概率分布时需做简化处理 ,即在每次 Monte Carlo 模拟中 ,对于每一组暴露剂量 $V(i)$ 和暴露频率 $N(i)$,分别代入 12 个暴露浓度数据计算 P_s 和 P_y ,将 12 组 P_s 和 P_y 取均值后得到此次 Monte Carlo 模拟的 $P_s(i)$ 和 $P_y(i)$ 值.

表 3 微生物风险的暴露途径及其剂量概率分布的参数
Table 3 Parameters of the probability distributions of exposure doses for different routes of microbial exposure

暴露行为	暴露途径	暴露剂量概率分布的参数	
		μ	σ
职业行为	河道保洁、自行车修理	0.788	0.936
	游船驾驶	0.742	0.959
	游泳	2.079	1.453
休闲娱乐行为	钓鱼	0.693	0.964
	划船	0.833	0.940
	赏玩喷泉、捕捉鱼虾	0.788	0.936
家庭杂用行为	拖地、擦洗家具、洗衣、洗手、浇花、冲厕	0.788	0.936

表 4 微生物风险的暴露浓度¹⁾
Table 4 Exposure concentrations of different indicator bacteria

水体	样本数	检出样本数			FC 检出值/CFU·L ⁻¹		EC 检出值/MPN·L ⁻¹		ENT 检出值/CFU·L ⁻¹	
		FC	EC	ENT	范围	GM	范围	GM	范围	GM
B 河段	12	12	7	11	$3.0 \times 10^2 \sim 5.4 \times 10^6$	6.5×10^4	10 ~ 200	63	$39 \sim 2.3 \times 10^4$	636
C 河段	12	12	5	8	$1.2 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^6$	1.3×10^4	10 ~ 120	45	$53 \sim 1.2 \times 10^4$	289
E 湖	12	11	2	6	$1.1 \times 10^2 \sim 7.0 \times 10^4$	1.4×10^3	10 ~ 20	14	$53 \sim 2.3 \times 10^3$	66

1) GM 表示几何平均值

2.2 风险评价

图 2 ~ 图 4 给出了根据表 1 中不同剂量-反应方程计算得到的 B、C 和 E 这 3 个案例水体的微生物

风险 ,包括单次暴露的健康风险和年健康风险. 图 2 ~ 图 4 均以箱式图表示不同暴露途径下微生物风险的概率分布 ,其中矩形上下两边分别对应第 75 和第

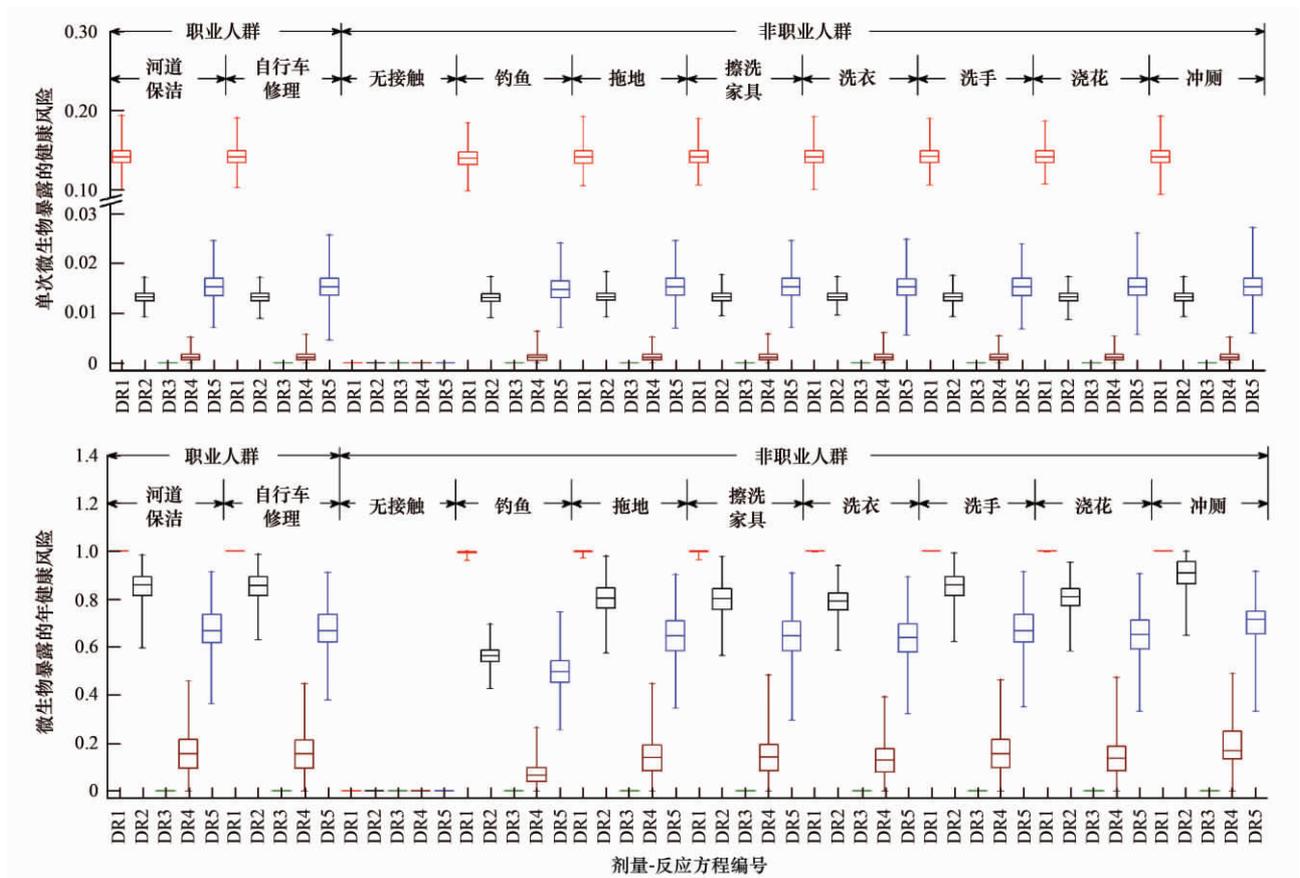


图 2 不同剂量-反应方程计算得到的 B 河段微生物风险

Fig. 2 Estimated microbial risk of Stream B according to different dose-response equations

25 百分位数, 矩形内的横线表示中位数, 而纵向触须线分别延伸至最大值和最小值。

2.2.1 剂量-反应方程的影响

以 B 河段为例, 从图 2 可以看出, 按表 1 中 DR1 方程计算得到的不同暴露途径下单次微生物暴露的健康风险约为 0.1~0.2, 按 DR2 和 DR5 方程计算得到的健康风险约为 0.01~0.03, 而按 DR3 和 DR4 计算得到的健康风险均低于 0.01。虽然 DR1 和 DR2 都是基于 FC 建立的剂量-反应方程, 但二者计算得到的风险相差近一个数量级, 这是因为 DR1 中 P_s 是暴露人群出现肠胃、呼吸道、皮肤、耳部、眼部等多种疾病症状的总体风险^[37], 而 DR2 中 P_s 仅

是出现肠胃疾病症状的风险^[6]。基于 FC 的 DR2 方程和基于 ENT 的 DR5 方程中 P_s 都是暴露人群出现肠胃疾病症状的风险, 二者的计算结果较为近似。基于 EC 建立的 DR3 和 DR4 方程中 P_s 分别与 DR1 和 DR2 方程相同, 但其计算结果比其它方程低 1~2 个数量级, 这与 B 河段中 EC 检出率以及检出浓度较低有关。不同剂量-反应方程对微生物风险评价结果的这种影响同样出现在 B 河段年健康风险的计算结果中以及 C 和 E 水体微生物风险评价结果中。因此, 对于本研究的 3 个案例水体, 不同剂量-反应方程得到的微生物风险评价结果具有一定的一致性和可比性。

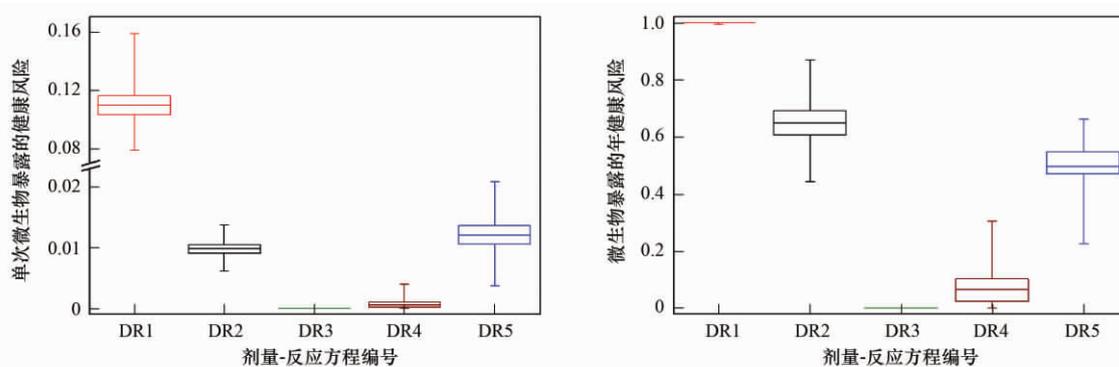


图 3 不同剂量-反应方程计算得到的 C 河段微生物风险

Fig. 3 Estimated microbial risk of Stream C according to different dose-response equations

2.2.2 不同暴露途径下单次暴露的健康风险

现有研究^[24~28]通常选取饮用水中微生物可接受年风险水平 10^{-4} 衡量景观娱乐水体的微生物风险是否处于可接受水平, 但景观娱乐水体的微生物风险在很大程度上是可以规避的, 因此以饮用水的要求来衡量偏于严格。美国 1986 年的《水质基准》将 8×10^{-3} 作为淡水水体中游泳人群单次微生物暴露出现高可信度肠胃疾病症状风险的可接受水平^[40]。由于文献[40]中 8×10^{-3} 的可接受风险水平是针对高可信度肠胃疾病症状的, 本研究依据文献[6, 40]中的方程将其折算成与表 1 中 DR2、DR4 和 DR5 方程中 P_s 相对应的全部肠胃疾病症状的可接受风险水平, 为 1.7×10^{-2} , 即每 100 人中不超过 1.7 人在单次暴露后出现肠胃疾病症状。

以此衡量, B 河段根据 FC 和 EC 计算得到的不同暴露途径下单次暴露的微生物风险几乎全部处于可接受水平, 但根据 ENT 计算得到的微生物风险处于可接受水平的概率约为 75%~80%。从偏安全的角度考虑, B 河段不宜作为人体直接接触或非直接接触的娱乐水体。C 河段和 E 湖的微生物污染程度

低于 B 河段, 不同暴露途径下单次暴露的微生物风险处于可接受水平的概率均接近 100%, 因此可以满足其景观娱乐功能。虽然 C 河段和 E 湖均禁止游泳和垂钓, 但在 E 湖游泳和垂钓以及在 C 河段垂钓的单次暴露风险是可以接受的。

2.2.3 不同暴露人群的年健康风险及其构成

从图 2 可以看出, 按表 1 中 DR1 方程计算得到的 B 河段职业人群的年健康风险几乎为 1, 即在 1 a 中这些人群几乎都有可能出现肠胃、呼吸道、皮肤、耳部、眼部等疾病症状; 以 FC、EC 和 ENT 计算得到的职业人群感染肠胃疾病的年风险分别为 0.6~1.0、0~0.5 和 0.3~0.9。对于暴露途径多样的非职业人群, 其年健康风险可以根据图 2 中不同暴露途径的年健康风险以及表 2 中不同暴露途径的暴露人次加权计算得到。计算结果表明, 以 FC 计算得到的 B 河段本地居民的年健康风险为 1.2~1.3, 即 1a 中本地居民通过休闲娱乐和取水作家庭杂用等活动出现微生物感染疾病的次数可能高于 1 次; 以 FC、EC 和 ENT 计算得到的暴露人群感染肠胃疾病的年风险分别为 0.8~1.2、0.0~0.4 和 0.6~

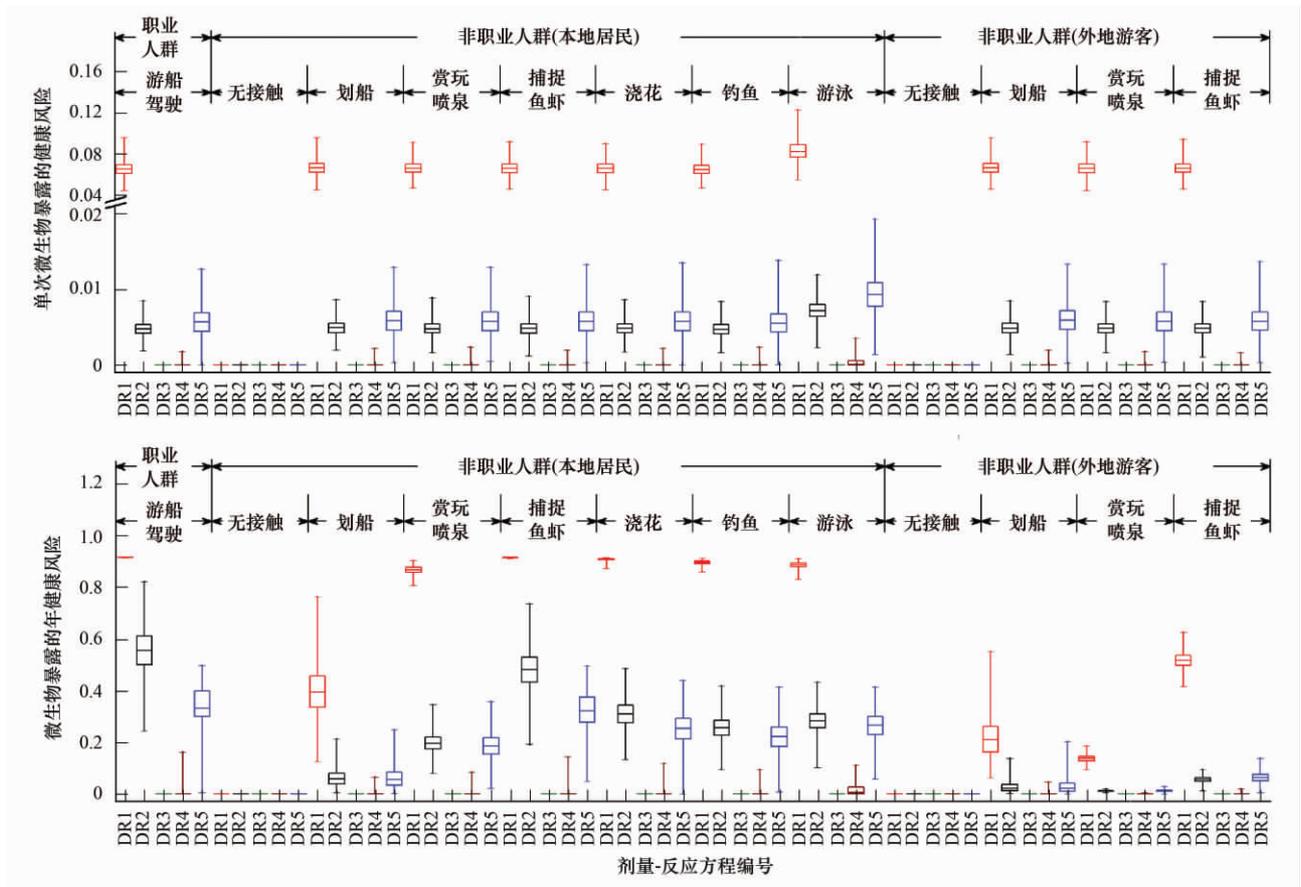


图 4 不同剂量-反应方程计算得到的 E 湖微生物风险

Fig. 4 Estimated microbial risk of Lake E according to different dose-response equations

1.0. 需要指出的是 这里计算得到各类暴露人群的年健康风险并不代表总人口的年健康风险,由于涉及表 2 中各类暴露途径的人群在总人口中所占比例未知,所以本研究尚不能由此推测总人口的年健康风险.

类似地,可以计算 C 河段和 E 湖不同暴露人群的年健康风险,这里不再赘述. 根据计算结果,可以发现 3 个案例水体不同暴露人群年健康风险的大小排序为: B 河段非职业人群 > B 河段职业人群 > C 河段休闲娱乐人群 > E 湖职业人群 > E 湖非职业人群(本地居民) > E 湖非职业人群(外地游客).

对于暴露途径多样的 B 河段和 E 湖非职业人群,图 5 ~ 图 7 给出了不同暴露途径对其年健康风险均值的贡献率. 从图 5 ~ 图 7 分别可以看出, B 河段本地居民的年健康风险主要来源于拖地、擦洗家具、洗衣和浇花这 4 个暴露途径,其贡献率之和在 90% 左右; 对于在 E 湖休闲娱乐的本地居民而言,除钓鱼的贡献率较低(约为 10%)之外,其它暴露途径的贡献率基本相当,而在 E 湖休闲娱乐的外地游客的年健康风险主要来源于划船这一暴露途径,其

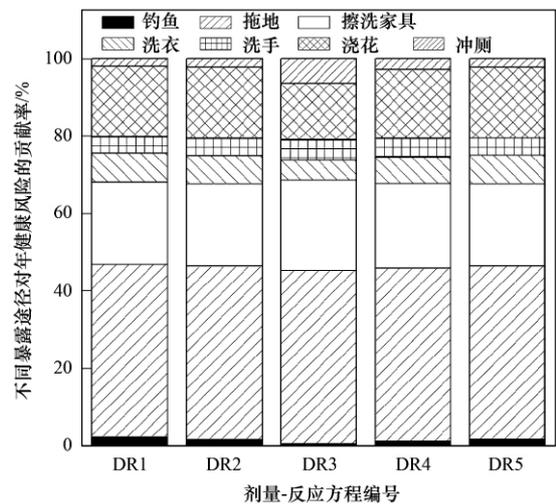


图 5 B 河段本地居民年健康风险构成

Fig. 5 Contribution of different exposure routes to the total annual microbial risk of local residents related to Stream B

贡献率约为 90%.

3 讨论

本研究中 3 个案例水体是典型的 3 类城市水体. B 河段代表了位于城市居住区的一般景观水

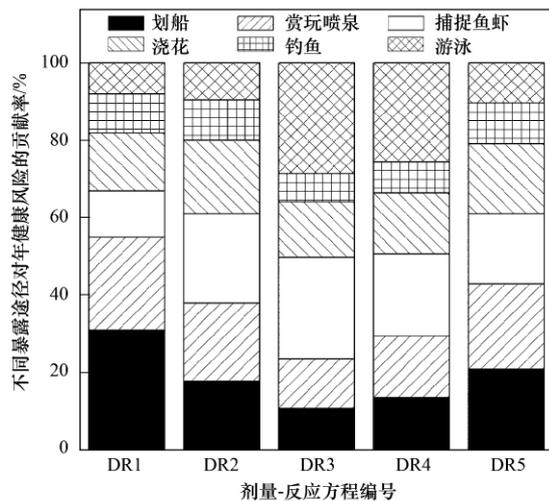


图6 E湖本地居民年健康风险构成

Fig. 6 Contribution of different exposure routes to the total annual microbial risk of local residents related to Lake E

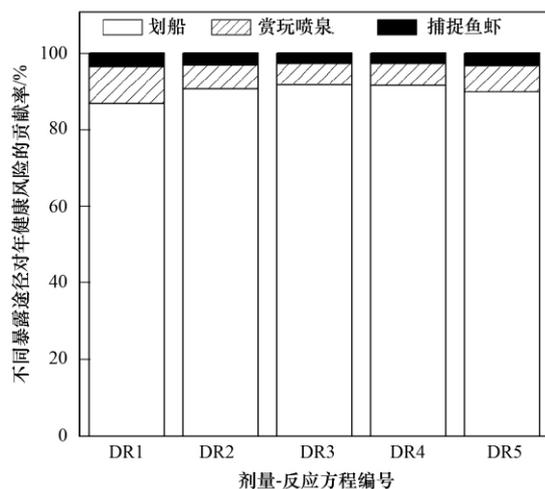


图7 E湖外地游客年健康风险构成

Fig. 7 Contribution of different exposure routes to the total annual microbial risk of tourists related to Lake E

体与居民日常活动场所的空间距离较近,因而容易受到生活源的污染;C河段代表了城市公共开放空间的景观娱乐水体,通常与绿地、滨水公园等景观设计相结合,为公众提供休闲娱乐场所;E湖代表了城市风景旅游区的景观娱乐水体,通常是城市的重要旅游目的地,设有丰富的休闲娱乐设施和活动项目。从水体健康风险管理的角度来看,设有亲水休闲娱乐项目的城市风景旅游区水体是传统的管理重点,因为这些亲水活动类型和暴露途径是明确的、可预见的。而城市一般景观水体在风险管理中的重要性往往被忽视,这一方面是因为这些水体主要发挥景观功能,因此被默认为与人体极少接触,或者管理部门通过制定法律法规限制人体与其接触(如禁

止游泳和垂钓),另一方面则是因为对实际中公众与这些水体接触的可能途径缺乏足够的调查和研究。

城市水环境健康风险管理的上述现状恰好与本研究的结果相吻合,即:微生物风险可以预见的E湖因为得到有效的环境管理,其水质是3个水体中最好的,人体健康风险是最低的;B河段污染突出,其水质是3个水体中最差的,同时因为存在诸多不可预见的、与其功能不匹配的无序利用(如作为家庭杂用水),其人体健康风险是最高的;C河段则介于B河段和E湖二者之间。由于暴露途径多样、暴露频率较高,B河段普通居民的健康风险甚至高于职业人群。由此可见,城市景观娱乐水体不当利用造成的人体健康风险应引起重视。另外,B河段本地居民的健康风险主要来源于取水用于拖地、擦洗家具、洗衣等家务活动,这些行为还可能直接污染水体,对水环境和人体健康均为不利。因此,城市环境、卫生和水资源等主管部门在做好城市重点景观娱乐水体健康风险管理的同时,应重视一般景观水体(特别是那些依靠未经消毒处理的污水处理厂出水补给的水体)的人体健康风险,通过加强公众环境和卫生宣传教育以及城市水政管理等措施保障公众健康。

4 结论

(1) 公众暴露于城市景观娱乐水体的途径既包括游泳、划船、钓鱼、观赏喷泉等常规休闲娱乐活动,也包括与水体功能不匹配的无序利用行为,如取水用于拖地、擦洗家具、洗衣等家务活动。

(2) 对于3个案例水体而言,基于FC、EC和ENT的多指标微生物风险评价结果具有一定的一致性和可比性。

(3) C河段和E湖可以满足其现有的景观娱乐功能要求,而B河段不宜作为人体直接或非直接接触的娱乐水体。

(4) B河段本地居民的健康风险主要来源于取水作家庭杂用,而在E湖休闲娱乐的本地居民和外地游客的健康风险主要来源于各种休闲娱乐活动。

(5) 应重视与城市景观娱乐水体功能不匹配的无序利用(如作为家庭杂用水)对人体健康的风险,通过加强公众环境和卫生宣传教育以及城市水政管理等措施保障公众健康。

参考文献:

[1] 刘双江,刘志培,杨惠芳,等. 京津市区部分河流及湖泊水

- 质的卫生细菌学调查[J]. 环境科学, 1993, 14(3): 86-89.
- [2] National Health and Medical Research Council. Guidelines for managing risks in recreational water[M]. Canberra: Australian Government, 2008.
- [3] 蒋娟娟, 蒋建武. 城市滨水空间亲水性设计[J]. 中外建筑, 2009, (10): 98-99.
- [4] 宋庆辉, 杨志峰. 对我国城市河流综合管理的思考[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 377-382.
- [5] Stevenson A H. Studies of bathing water quality and health[J]. American Journal of Public Health, 1953, 43(5): 529-538.
- [6] Dufour A P. Health effects criteria for fresh recreational waters [R]. EPA-600/1-84-004. Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 1984.
- [7] Ferley J P, Zmirou D, Balducci F, et al. Epidemiological significance of microbiological pollution criteria for river recreational waters [J]. International Journal of Epidemiology, 1989, 18(1): 198-205.
- [8] Fewtrell L, Godfree A F, Jones F, et al. Health effects of white-water canoeing [J]. The Lancet, 1992, 339(8809): 1587-1589.
- [9] Roberts J D, Silbergeld E K, Graczyk T. A probabilistic risk assessment of cryptosporidium exposure among Baltimore urban anglers [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 2007, 70(18): 1568-1576.
- [10] Dorevitch S, Pratap P, Wroblewski M, et al. Health risks of limited-contact water recreation [J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(2): 192-197.
- [11] 陈冬福. 城市内河存在问题分析及治理措施——以宁波市镇海区为例[J]. 中国水运, 2008, 8(6): 30-31.
- [12] 王秀朵, 金朝晖, 赵乐军, 等. 降雨径流对天津景观河道水体的污染分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(15): 51-53.
- [13] 马文林, 马明明. 再生水补给城市河湖问题探讨[J]. 水资源保护, 2007, 23(增刊2): 102-104.
- [14] 李娜, 杨建, 常江, 等. 不同工艺再生水补给对景观湖水质变化的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1276-1280.
- [15] Steyn M, Jagals P, Genthe B. Assessment of microbial infection risks posed by ingestion of water during domestic water use and full-contact recreation in a mid-southern African region [J]. Water Science and Technology, 2004, 50(1): 301-308.
- [16] Van Heerden J, Ehlers M M, Vivier J C, et al. Risk assessment of adenoviruses detected in treated drinking water and recreational water [J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, 99(4): 926-933.
- [17] Stone D L, Harding A K, Hope B K, et al. Exposure assessment and risk of gastrointestinal illness among surfers [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 2008, 71(24): 1603-1615.
- [18] Dixon C C. Microbial risk assessment for recreational use of the Kranji Reservoir, Singapore [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [19] Pintar K D M, Fazil A, Pollari F, et al. A risk assessment model to evaluate the role of fecal contamination in recreational water on the incidence of cryptosporidiosis at the community level in Ontario [J]. Risk Analysis, 2010, 30(1): 49-64.
- [20] Yajima A, Koottatep T. Assessment of *E. coli* and *Salmonella* spp. infection risks associated with different fecal sludge disposal practices in Thailand [J]. Journal of Water and Health, 2010, 8(2): 355-364.
- [21] Rijal G, Tolson J K, Petropoulou C, et al. Microbial risk assessment for recreational use of the Chicago Area Waterway System [J]. Journal of Water and Health, 2011, 9(1): 169-186.
- [22] Schets F M, Schijven J F, De Roda Husman A M. Exposure assessment for swimmers in bathing waters and swimming pools [J]. Water Research, 2011, 45(7): 2392-2400.
- [23] Weir M H, Pepe Razzolini M T, Rose J B, et al. Water reclamation redesign for reducing *Cryptosporidium* risks at a recreational spray park using stochastic models [J]. Water Research, 2011, 45(19): 6505-6514.
- [24] 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.
- [25] 仇付国, 王晓昌. 直接超滤再生水的回用健康风险评价[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 5-8.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 张崇森, 王晓昌, 彭党聪. 西安市景观水体肠道病毒实时荧光定量 RT-PCR 检测与健康风险评估[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3): 85-88.
- [29] Dufour A P, Evans O, Behymer T D, et al. Water ingestion during swimming activities in a pool: a pilot study [J]. Journal of Water and Health, 2006, 4(4): 425-430.
- [30] Dorevitch S, Panthi S, Huang Y, et al. Water ingestion during water recreation [J]. Water Research, 2011, 45(5): 2020-2028.
- [31] Haas C N, Rose J B, Gerba C P. Quantitative microbial risk assessment [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [32] ILSI Risk Science Institute. Revised framework for microbial risk assessment [M]. Washington, DC: ILSI Press, 2000.
- [33] Soller J A. Use of microbial risk assessment to inform the national estimate of acute gastrointestinal illness attributable to microbes in drinking water [J]. Journal of Water and Health, 2006, 4(Suppl. 2): 165-186.
- [34] National Research Council. Risk assessment in the federal government: managing the process [M]. Washington, DC: National Academy Press, 1983.
- [35] 刘芳, 吴晓磊. 指示水体病源污染的微生物及其检测[J]. 环境工程学报, 2007, 1(2): 139-144.
- [36] 孙傅, 沙婧, 刘彦华. 南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3778-3786.
- [37] Seyfried P L, Tobin R S, Brown N E, et al. A prospective study

- of swimming-related illness. II. Morbidity and the microbiological quality of water[J]. American Journal of Public Health, 1985, 75(9): 1071-1075.
- [38] Donovan E, Unice K, Roberts J D, et al. Risk of gastrointestinal disease associated with exposure to pathogens in the water of the Lower Passaic River [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(4): 994-1003.
- [39] Filipsson M, Lindström M, Peltola P, et al. Exposure to contaminated sediments during recreational activities at a public bathing place [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1-3): 200-207.
- [40] US Environmental Protection Agency. Quality criteria for water 1986 [M]. EPA 440/5-86-001. Washington, DC: Office of Water, 1986.

欢迎订阅 2013 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE; 美国化学文摘 CA; 俄罗斯文摘杂志 AJ; 美国生物学文摘预评 BP; 美国医学索引 IM; 日本科学技术情报中心数据库 JICST; 英国动物学记录 ZR; 剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences; 剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts; 剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等; 国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD); 中文科技期刊数据库(维普); 中国期刊全文数据库(CNKI); 数字化期刊全文数据库(万方); 中国科学引文数据库(CSCD); 中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2013 年为 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn