

## 环境介质中病毒生态的研究\*

王德铭 (中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

**【摘要】** 病毒是许多人及重要经济动、植物病患的病原。一些病毒在环境中可因条件不同而生存数小时到数月, 并在水、气、土中迁移达若干公里。现有的污水处理方法对病毒, 特别是肠道病毒效果欠佳, 土地处置原污泥以及污水灌溉的水果和蔬菜能传播人肠道病毒。即使小至一个组织培养的感染剂量(病毒)也可引起人的疾病, 因此对环境介质中, 特别是饮水和食物中的少量病毒的去除也是重要的。现有的指示物不能确切地指示粪便污染, 更不能充分反映人肠道病毒的污染。大肠菌噬菌体在地表水、地下水和污水中比人肠道病毒更呈持久性, 还有许多适于选择分析技术特有性能, 因此很可能在一定条件下用它作人肠道病毒的指示物。作者对我国今后需要开展的研究提出了建议。

**关键词** 肠道病毒 大肠菌噬菌体 污水污泥 气溶胶 地下水

**Studies on the ecology of virus in environmental media.** Wang Deming (Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan 430072). -J. Appl. Ecol., 1990, 1(3): 277-286.

Viruses are responsible for a variety of diseases in human bodies as well as animals and plants of economic importance. Depending on environmental conditions, many of these viruses can survive in environmental media for several hours to several months. This can result in water, soil and aerial dissemination of such infectious agents over distances of several kilometers. Studies show that such viruses, at least of enteric nature which are shed in feces, can easily survive under present methods of sewage treatment. Raw sludge land disposal can present a risk of human illness through enteric virus contamination of market fruits and vegetables harvested from sewage-irrigated fields. Because as little as one tissue-culture infectious dose of virus may cause an infection in humans, it is important to eliminate even minute numbers of these microorganisms from environmental media, especially drinking water and food. Current indicators are not accurate monitors of fecal pollution and do not adequately reflect the presence of human enteric viruses. Coliphages are readily recovered from sewage from all parts of the world. In most cases, the persistence of coliphages in surface water, groundwater and sewage is greater than that of human enteric viruses and enteric bacteria. Coliphages have a number of unique characteristics which permit selective analytical techniques. In some ways, coliphages may serve as indicators when assessing the likely fate of human enteric viruses. Further research needs concerning the ecology of virus in China has been suggested by the author.

**Key words:** Enterovirus, Coliphage, Sewage sludge, Aerosol, Groundwater.

自从1929年Kling在美国纽约沿河流域地区发现比较集中的脊髓灰质炎病例以来, 陆续

在水、气、土、食物和物体上开展了病毒生态方面的研究, 并且逐渐形成了一门新的分支学科——环境病毒学。环境病毒学的基础是病毒生态学, 它研究的是环境介质(水、气、土及食物等)中离开宿主(人、生物或细胞)后的病

\* 本文主要内容曾在《全国首届环境病毒学学术讨论会》上报告。

本文于1990年2月26日收到。

毒的生存、传播及消长的现象和规律；探讨病毒与环境相互作用的机理以及病毒传播对人群和城市、农村、工矿企业等环境的影响；研究监测和控制环境中病毒的污染途径以及环境病毒方法论的研究。近年来我国已有一些科研单位和高等院校开展了这方面的研究，但与国外相比，无论从研究人员的数量及素质来看，都存在着差距。现有 50 多个国家，300 多个研究所、室或组在从事环境病毒的研究，其中如美国就有 100 多个机构及 500 人左右的队伍。从 1967 年开始，国际上每年都举行 1—2 次有关环境病毒学的学术会议，并有《水病毒学通讯》刊物问世，每年在各类刊物上发表的研究论文达数百篇，已出版专著 20 多部。在技术上，如病毒的浓缩和检测技术都有突破，达到了一定的精度。在此基础上，世界卫生组织在 1978 年提出了饮用水每 400—1000L 中不允许检出病毒的建议标准；美国亚利桑那州制定了娱乐用水和灌溉蔬菜用水的病毒学标准，要求 40L 水中不超过 1 个病毒，土地利用的废水，要求 40L 水中不超过 125 个病毒。我国也需要考虑制订控制环境质量的病毒学标准。在此项标准颁布之前，在环境质量的控制和评价中，是否可考虑饮用水按世界卫生组织的建议标准上限，即每 1000L 水中不允许检出病毒；娱乐用水和蔬菜灌溉用水，参照美国亚利桑那州的标准放宽 100 倍，即每 40L 水中不超过 100 个病毒，土地利用的废水同样放宽 100 倍，即每 40L 水中不超过 12500 个病毒，参照试行。

## 1 水环境

地表水，包括污水在内目前已发现对人类致病的病毒达 100 多种(型)，其中通过人类粪便排放到水体的即达 130 多种。有腺病毒(共有 41 个血清型)、星状病毒(5 个血清型)、嵌杯状病毒(2 个血清型)、冠状病毒、肠道传播的非甲、非乙型肝炎病毒，还有肠道病毒属中的脊髓灰质炎病毒(3 个血清型)、柯萨奇病毒 A

型(24 个血清型)、柯萨奇病毒 B 型(6 个血清型)、欧可病毒(34 个血清型)、“编号”肠道病毒(“Numbered” enteroviruses)(4 个血清型)、甲型肝炎病毒，还有诺沃克因子(Norwalk agent)、细小病毒(2 个血清型)、呼肠病毒(3 个血清型)、轮状病毒(4 个血清型)、“小圆病毒”(“Small round viruses”，2 个血清型)。从人尿中排出的有属于乳多空病毒科的 BK 病毒和 JC 病毒、巨细胞病毒、乙型肝炎病毒、麻疹病毒、腮腺炎病毒、风疹病毒。而人的残留遗弃、未经消毒的血液也可传播乙型肝炎病毒、丙型肝炎病毒、德耳塔肝炎病毒(Hepatitis delta viruses)、艾滋病病毒(2 个血清型)。污水中虽然尚未发现艾滋病病毒，但由于受艾滋病病毒感染的血液或其他物品未消毒或消毒不彻底而置入污水时，此种病毒在环境中如果具有一定的稳定性，即使一般认为此病毒不经粪便一口途径传播，也需引起高度重视。病毒经过污水或固体废弃物又可通过各种途径传染到人。病毒颗粒如与污泥结合，就有可能完成此种循环；污水中的污泥有时随意向地表水排放或投海处置，病毒附着弃置的污泥能随水流远距离输送而污染饮用水水源、娱乐用水区及贝、虾、鱼类养殖区。在干燥的环境中或者由于风速很大，在处置污泥固体时常会形成气溶胶，而脱水的污泥表面更易形成气溶胶，造成病毒传播。向土壤处置污水污泥，也常会因地表径流或土壤淋溶而污染地表水或地下水。随人粪便排出的各种病毒最终都进入生活污水，Melnick(1978)报道美国生活污水的肠道病毒平均密度为每升水 47000 个；我国上海的生活污水据蒋慧慧(1987)报道，其中病毒含量为 320—176000 pfu/L。Poyry 等<sup>[20]</sup>在芬兰 1984—1985 年发生脊髓灰质炎病毒后从废水检出此类病毒的 3 个血清型，但当全国实行口服疫苗计划后，在污水中只在 2 月内检出血清 1 型和 2 型，而脊髓灰质炎病毒 1 型始终未检出，表明三者均与疫苗有关。Amin<sup>[5]</sup>在阿拉伯海湾国

家巴林从污水处理的污泥中检出脊髓灰质炎病毒和柯萨奇病毒, 而此类污泥已用于农业, 作者认为对公共卫生造成威胁。Williams<sup>[33]</sup>报道, 未经处理的污水污泥每升含腺病毒 10800 个, 而同一污泥样品中的肠道病毒每升平均只含 1320 个。Hurst (1988) 也属于上述同一研究小组, 由于应用了更为敏感的检测技术, 则发现每升污泥含 54000 个腺病毒, 并计算出腺病毒比肠道病毒平均高出 94 倍, 而且这些腺病毒 80% 为第 40 和 41 血清型, 能够引起肠胃炎病患。星状病毒有 5 个血清型, 其中 4 个已可在实验室的细胞培养中传接繁衍, 这些病毒最初是由患肠胃炎的病人粪便中分离得到的。(星状病毒的第 3 血清型, 又被称为雪山因子, 也能引起人类肠胃炎病<sup>[32]</sup>) 嵌杯状病毒已有几株可在细胞培养中传接。冠状病毒因在电子显微镜中呈现出花瓣状突出物而得名, 它与嵌杯状病毒均能引起病人呕吐和腹泻<sup>[6, 22, 28]</sup>。肠道传播的非甲、非乙型肝炎病毒是多次水传播流行病爆发的病原, 其中包括闻名于世的 1955—1956 年的印度新德里肝炎流行病, 临床病例达 29000 人<sup>[11]</sup>, 此病毒已可将实验动物作为宿主进行传接。肠道病毒由肠道分离得到, 并以肠道为传播途径, 它们都可在实验室细胞培养系中复制, 在原污水中肠道病毒每升可达 400000 pfu, 在污水处理厂的污泥中肠道病毒达到 140000/L, 原污泥中则为 5000—28000/L。诺沃克因子是最初在俄亥俄州的诺沃克爆发肠胃炎的病原而得名, 这是由于病人食用受到污水感染的贝类和接触污水所致<sup>[21, 32]</sup>。根据 Cubitt 的研究, 认为从血清学上看, 诺沃克因子是一类嵌杯状病毒<sup>[14]</sup>。Moore 等<sup>[20]</sup>在 Lubbock 进行为期 3 年的研究, 他们从污水中检出病毒为 100—1000 pfu/L, 但当污水蓄积后, 每升水只含 < 10 pfu 的病毒。Bosch<sup>[10]</sup>等在巴塞罗那市的污水中 2 次检出轮状病毒, 而且均是该市病毒性腹泻流行期内进行的。在捷克的布拉格-波多利水厂的未处理水及处理水

的少数样品中发现脊髓灰质炎 1 型病毒, 当时正是实行脊髓灰质炎疫苗免疫计划之后<sup>[7]</sup>。Rose 等<sup>[27]</sup>在美国亚利桑那州的娱乐用水中发现脊髓灰质炎病毒 1 型、欧可病毒 1 型、柯萨奇病毒 B<sub>1</sub> 及 B<sub>2</sub> 型以及轮状病毒, 41 个水样中有 18 个为阳性, 而且其中有些水样是达到粪大肠杆菌标准的。Biziagos<sup>[9]</sup>等试验发现甲型肝炎病毒及脊髓灰质炎病毒 1 型在 4 °C 时一年内很少有失活的, 室温 300 天还可检测到甲型肝炎病毒, 但未检出脊髓灰质炎病毒 1 型。

污水处理上对病毒的去除进行了检测, 结果变化较大, 由于病毒易被有机物颗粒及金属阳离子的氢氧化化合物的沉淀物所吸附, 因此污水处理过程中病毒的去除在很大程度上是由于病毒对各种污泥组分的分配作用而定。Hurst (1979) 在他的博士论文中指出了不仅污泥本身的性质、粘土、有机物或者金属盐类絮凝物, 而且病毒的采样及血清型也与病毒的去除效果相联系, 这可能与病毒的蛋白质结构及等电点有关。被污泥固体物吸附的病毒增加了它们环境中的稳定性, 因此在污泥处置前必须注意破坏病毒的感染性。据 Gerba 等 (1975) 及 Safferman 等 (1976) 报道, 初步沉淀及活性污泥法处理去除肠道病毒的效果分别为 0—75% 及 40—95%。稳定塘对病毒的去除效果是很不稳定的, 其效率为 0—99%。Rao 等 (1981) 认为稳定塘底部形成一层污泥层, 它在吸附病毒而使去除率提高的过程中起了很大作用。Lance 等 (1978) 认为去除病毒效果的好坏还与停留时间、塘水温度和季节有关。综合许多研究报道的分析, 污水污泥中影响病毒生存的因素有: 洗涤剂、蒸发作用中的脱水、氨、需氧微生物的活性、需氧微生物的代谢物、需氧及厌氧消化作用中的可溶和可滤性产物以及由于加入 CaO 而使 pH 的提高等。生物滤池的病毒去除率为 0—84%, 许多研究者, 如 Foster 等 (1973) 及 Sproul (1976) 认为此种处理方法的去除率是小的, 并且很不稳定, 有时还会出现生物滤池处

理过程中病毒浓度增加的现象,这可能是由于粪便固体物的分解和病毒从被吸附的固体又回到水中所致。二级处理——活性污泥法如果操作正确,可以比较有效地去除病毒,但Akin等(1978)报道有时也会出现去除效果不良的情况。三级处理——物理化学法对病毒的去除是由所加化学物的种类和浓度以及污水的pH而定的。污水中投加硫酸铝后的混凝作用可去除接种入污水的人脊髓灰质炎病毒1型70—99.86%;如果加入钙或镁则去除率为98%,同时加入镁和碳酸钙时则去除率高于99.9%;加过量石灰时,由于pH的提高可使病毒灭活。化学混凝处理后的出水还可通过粗砂滤器,此法看来并非将病毒直接吸附在滤器上,而是将前面沉淀处理中由于过小而未能沉淀下来的悬浮絮凝物分离出来,另一可能的解释是砂粒将出水中所含未与固体结合的病毒吸附起来,砂滤可将二级处理出水中的人脊髓灰质炎病毒去除82—99.8%。还有用活性炭吸附病毒的,一般去除率为0—50%,但从饮用水中去除人脊髓灰质炎病毒的效率则较高,为78.5%,这可能是由于饮用水中有机物的含量较低之故。

污泥曝气池中通常均可发现肠道病毒,但在活化作用过程中大部分病毒都被污泥絮凝物所吸附,实验室的试验池证实活性污泥的曝气过程中肠道病毒被灭活;在污水处理厂中也观察到人欧可病毒7型在活性污泥曝气作用下被灭活的现象。需氧适温( $>45^{\circ}\text{C}$ )消化5天左右,98%的肠道病毒可灭活。在各种环境状况下,温度对病毒的灭活起了重要作用。厌氧消化中病毒的灭活同样与温度有很大关系,而与病毒的类型关系较小。在30—35 $^{\circ}\text{C}$ 厌氧消化的污泥中还可检出各种肠道病毒,其灭活率为50—90%/天,但当温度升至50 $^{\circ}\text{C}$ 时,厌氧消化的病毒灭活率可提高到99.9999%/天。分析表明,污泥厌氧消化时病毒的灭活率与消化温度呈显著相关,而滤器吸附的病毒则呈不相关,两者数据结合则相关显著性减小。原污泥蒸发

脱水也能使人脊髓灰质炎病毒灭活,脱水过程中病毒从衣壳中大量分解基因组RNA,从而遭到不可逆的破坏,柯萨奇病毒及呼肠病毒也可因蒸发脱水而灭活。看来污泥中肠道病毒都可能用蒸发脱水方法灭活。将经过消化的污泥应用于土壤系统,还有少量的病毒带入土壤。3次试验结果,污泥中病毒空斑形成单位(pfu)均随时间的增加而减少。施加石灰以提高污泥的pH值是使病毒灭活的有效措施。此外,还有应用辐射及巴氏灭菌法来处理污泥的。辐射法对寄生虫和细菌是很有效的,但由于污泥能为病毒提供保护,应用此法使病毒灭活不是很有效;但当加热和辐射两种方法同时使用时,即所谓热辐射作用(Thermoirradiation),即可大大提高对病毒的灭活作用。阴离子洗涤剂是污水污泥中的主要组分,能够降低呼肠病毒的热稳定性,而阳离子洗涤剂这方面的性能似乎比阴离子洗涤剂更强,每一类洗涤剂都能保护一些肠道病毒对热的抵御。但当污泥堆肥时,由于洗涤剂的降解,此一性能即大大减弱,还发现脱水时污泥固体物的浓缩也可改变污泥其他组分对病毒的热灭活效应。虽然尚无堆肥对病毒灭活效应的报道,但McKinle<sup>[19]</sup>及Nakasaki<sup>[23]</sup>报道了温度及堆肥的方式(通气或静止堆肥)会影响对病毒的灭活效应。

粪便物质污染水后会增加受污染的饮用水传播病毒病的机率,因为病毒在水中有较强的抵抗力,可生存数周甚至数月,虽然它们营严格的寄生生活,在水中并不繁殖,需要达到适宜宿主才能开始新的增殖循环,而且只要有一个传染性病毒,就足可使一个敏感宿主生病。自1980年以来世界各国已从饮水或水源水中发现肠道病毒多起,如西班牙(1980)在加氯的水中检测出呼肠病毒2及3型;加拿大(1980)在加氯的水(余氯为0.1—0.2mg/L)中发现脊髓灰质炎病毒1,2及3型;以色列(1980)在饮水中检出脊髓灰质炎病毒1型及欧可病毒7型,样品中43%为阳性;南太平洋(1982)在钻

井用作饮用的水中发现脊髓灰质炎病毒1型、腺病毒及肠道病毒; 英国(1982)在未加氯及加氯(余氯为0.02—0.09mg/L)水中发现脊髓灰质炎病毒1, 2及3型, 柯萨奇病毒3及5型, 欧可病毒7, 11及22型; 美国(1982)在加氯(余氯0.8mg/L)水中检出柯萨奇病毒3型; 西德(1983)在污染河道岸边的井水及加氯水中分离出肠道病毒; 英国(1984)在加氯的地下水中检出脊髓灰质炎病毒1型; 美国(1984)在未处理的地下水中发现甲型肝炎病毒, 4/6样品为阳性; 还在另一处加氯(总氯1.3—1.7mg/L)水中分离出11株脊髓灰质炎病毒1型, 其中有2株对氯产生抗性; 墨西哥(1984)在加氯(余氯0—0.26mg/L)并完全处理的水中检出轮状病毒、柯萨奇病毒3, 4, 5及6型以及肠道病毒; 还在另一处加氯(余氯为0.6—1.4mg/L)水中分离到轮状病毒、腺病毒和肠道病毒; 法国(1985)在未加氯水中发现呼肠病毒; 以色列(1985)也在未加氯水中检测到肠道病毒<sup>[17]</sup>; 加拿大(1985)在加氯并经完全处理的水中检出脊髓灰质炎3型、柯萨奇病毒B5型; 还在另一处加氯并经完全处理的水中发现脊髓灰质炎病毒1型和肠道病毒, 样品百分之百为阳性<sup>[24]</sup>。国内张楚瑜<sup>[4]</sup>在某市水厂自来水中检出柯萨奇病毒B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>及B<sub>5</sub>型, 腺病毒3, 7型及未定型, 这两类病毒都有很强的耐受性; 在某湖水中分离出柯萨奇B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>及脊髓灰质炎病毒1, 2及3型<sup>[3]</sup>。

已有许多报告提及当水质达到饮用水标准(大肠杆菌、细菌总数、余氯、pH及浊度)时, 但仍不能保证无病毒。美国有一半人口依靠地下水为主要饮用水源, 城区有95%饮水来自地下水, 我国北方及缺水城市地下水也是主要水源。目前土地处理系统的应用也越来越广泛, 在美国就有30%人口依赖土地处理系统, 因而有越来越多的污泥需要处置, 同时地下水也越来越依赖于污水的补给, 结果地下水受到的污染也越来越严重。Craun等<sup>[13]</sup>报道美

国每年发生的水传播疾病中有一半是地下水引起的。很多国家如美、英、印度和加纳等国都曾在地下水或深井中检出病毒, 我国有些地区甲型肝炎的流行也归因于井水受病毒污染而引起的。Keswick(1981)等曾在一井中检出脊髓灰质炎病毒, 这是受病毒污染的地表污水横向迁移91.5m(包括5.5m粘土层、2.5m油页岩、22.5m石灰岩)后进入深达30.5m的深井水中所致。

海水中的病毒以海湾和沿岸海水中较高, 因为每天有大量含病毒的污水或江河水不断注入。海水中的悬浮固体颗粒和海底的沉积物附着大量病毒, 使病毒维持感染性并长期存活, 可随水的流动而悬浮起来。有人从苏格兰的一个海湾水中检出腺病毒、脊髓灰质炎病毒和欧可病毒, Loh(1979)测定美国檀香山的火奴鲁鲁海湾病毒浓度达240pfu/L。Krikelis<sup>[18]</sup>评价了希腊克拉脱辛尼海边接纳污水的海水及污水中肠道病毒的数量, 海水中88%的样品、污水中100%的样品检出肠道病毒, 海水中有9个血清型, 污水中有13个血清型。

关于水肠道病毒的指示生物问题已有40多年的研究历史了。理想的病毒指示生物需符合以下条件:

- (1) 适用于一定类型的地表水或所有类型的地下水;
- (2) 在污染水中不繁殖;
- (3) 指示生物的量与肠道病毒的量恒定, 在污染水中的密度与人粪污染直接呈相关性;
- (4) 更理想的是能够以超过肠道病毒的水平而存在于污染水中;
- (5) 能快速检测和正确鉴定;
- (6) 对人不致病且易被定量;
- (7) 要有适用并可靠的检测方法;
- (8) 其物理特性与肠道病毒相似;
- (9) 在土壤中的吸附及地表水或地下水的传播与肠道病毒相似;
- (10) 检测指示生物时不产生假阳性

反应;

(11) 与最顽强的肠道病毒有相似的耐受环境压力的能力;

(12) 肠道病毒存在时, 指示生物应存在, 而病毒不存在时, 指示生物可能存在。

埃及开罗的饮用水及饮料经 El-Abagy 等<sup>[16]</sup>检测, 147 个样品中有 78 个样品发现大肠菌噬菌体, 4 个样品兼有大肠菌噬菌体及大肠菌, 65 个样品为阴性, 作者认为大肠菌噬菌体的出现, 可视为有人致病病毒的存在。Petrovičová<sup>[25]</sup>在 12 个水厂进行为期 1 年的检测中, 发现经过处理的水中可分离到脊髓灰质炎病毒或肠道病毒时, 也均有大肠菌噬菌体出现。有人分析了大肠菌作为水和污水中肠道病毒的指示生物, 认为不理想。因为大肠菌是细胞性的, 而病毒却是非细胞属性, 后者对环境压力的耐受性比前者要强, 从而在水中的存活时间也更长, 同时病毒远小于细菌, 在水中显胶体状态, 表面带电荷, 比细菌更易吸附到颗粒状物质上去, 这样就会造成病毒和细菌在水中分布上的巨大差异。也有人探求用单一病毒的分析技术来指示肠道病毒的存在, 但由于它们的专一性强, 并且时间长, 费用高, 需要特殊设备, 因此也不理想。大肠菌噬菌体与肠道病毒在许多特性方面比较近似, 其中特别是 RNA 大肠菌噬菌体似乎更适宜作为指示生物, 目前已对它进行了血清学分类。但尚须进行大量研究, 才能确定其作为理想的指示生物的依据。应该进一步研究:

(1) 在水及污水, 特别是地下水采样技术和样品处理技术的研究, 以求得到正确数量的大肠菌噬菌体;

(2) 在不同情况下选择最适宜的大肠菌宿主菌株或最佳的噬菌体-宿主组合;

(3) 要建立能表达污水中一定数量的噬菌体及与存在的相关粪便量或其中的肠道病毒量的数学模式;

(4) 对肠道外环境中控制噬菌体复制的

因子进行评价;

(5) 对地表水和地下水中的噬菌体进行鉴定研究;

(6) 建立区分人和动物肠道噬菌体的方法;

(7) 对噬菌体与地表水、土壤及地下水中的肠道病毒的持久性和传播(迁移)进行比较;

(8) 对多数肠道病毒无噬菌体或者污水样品中常有大肠菌噬菌体存在而肠道病毒并不总是可分离到等现象进行深入分析研究;

(9) 某些生物如牡蛎对大肠菌噬菌体和肠道病毒的吸附量不同(前者常为后者的数倍至数十倍); 夏季河口、海湾水中由于存在适宜的宿主菌, 噬菌体加速复制后对指示生物作用的影响等应进一步研究。

## 2 空气环境

空气传播疾病, 已久为人们所知晓, 但对空气传播病毒, 其重要性往往被忽略, 长期以来, 人们的注意力主要放在污染物、水和食物等媒介所传播的病毒上。空气本身不含病毒, 病毒是附着于其中的小颗粒(如气溶胶及尘埃)而悬浮于空中, 随着风力和气流而迁移。从理论上讲, 几乎任何病毒都能通过空气而传播, 关键是这些病毒能否在气溶胶中生存, 直径小于  $0.3\mu\text{m}$  的气溶胶可长久悬浮在空中, 而病毒在传播到达受体宿主之前能保持存活, 它们对易感宿主就有潜在的感染性。气溶胶是空气中大小不同的颗粒组成的分散物系, 其中大的颗粒可迅速沉降, 而小的则可在较长时间内悬浮于空中。气溶胶在空中悬浮的时间和它们从产生处飘移的距离在很大程度上受到气流和湍流的影响。气溶胶中病毒的数量通常比水环境中的病毒量高 100 倍以上, 而直径在  $0.2-5\mu\text{m}$  的气溶胶最易被人吸入。影响空气中病毒存活的条件有: 气温和相对湿度、喷雾和收集液体的特性和组成、大气中的气体和气溶胶化的化学

物质以及辐射等。例如, 在一定的实验条件下, 某些病毒在高和低的相对湿度时都能存活, 而在中等相对湿度时易失活; 人和动物的轮状病毒却是在20℃、50%的相对湿度的空气中生存最佳。肌醇的存在可阻止气溶胶化的禽肉瘤病毒在低的相对湿度下迅速失活, 它对流感病毒、Langat 病毒、塞姆利基森林病毒及口蹄疫病毒都有类似的稳定作用; 喷雾中多羟基复合物的出现也增加病毒在空气中的稳定性。在自然条件下, 空气中含有许多自然或人工产生的气态物质, 它们都能影响病毒气溶胶的存活。实验证实, 将含有流感病毒、痘苗病毒、柯萨奇病毒B<sub>1</sub>型、新培斯病毒、甲型流感病毒的空气以每分钟 2.831685m<sup>3</sup> 通过紫外线, 即可使99%以上的病毒失活。病毒在液气表面聚集, 而带有病毒液体的气化导致水泡破碎, 使病毒颗粒喷入空中, 喷出液体中的病毒颗粒浓度比来源于水中的要高出许多倍, 其中1—10μm 大小的颗粒有可能吸入并留存于肺中。

污水处理过程中的原污水及处理过的污水常有大量脊椎动物病毒, 将这些水用作喷洒灌溉, 一般认为会产生感染性病毒气溶胶, 在灌溉喷淋器的顺风方向50m 处或更远处可发现肠道病毒; 向海倾弃污水污泥, 由于产生拍岸浪花, 在合适的环境条件时有可能将病毒气溶胶带回内陆。虽然尚无直接的证据说明喷雾灌溉会传播人和动物的病毒病, 但已有人呼吁要注意在喷灌处周围的居民点发生传染病的危险。还有人报道喷淋灌溉水中受到猪水泡病病毒污染会引起此一病毒在环境中的广泛传播(当然此病毒是否由空气直接传播尚不能完全肯定)。Brenner 等<sup>[12]</sup>研究了污水喷灌处气溶胶中的大肠菌噬菌体及细菌, 未发现动物病毒。另一点为厕所冲水引起肠道病毒的传播也已受到人们的注意, 每次冲水可使肠道病毒吸附于便瓷的表面, 经多次冲洗即可形成气溶胶, 气溶胶将病毒带到空气中和厕所的其他物件表面。Wallis 等<sup>[39]</sup>就经常从那些粪便中含有病毒的

厕所冲洗所形成的气溶胶中检出脊髓灰质炎病毒。婴儿换洗的尿布也可能是肠道病毒气溶胶产生的重要来源。沾附于物体表面的传染性病毒当清洁打扫时可再次悬浮于空中。空气流动很差或使用循环空气时, 如医院、学校、交通工具或动物饲养场所, 易感染者密集, 感染性病毒气溶胶传播疾病的可能性大大增加。

表 1 及表 2 分别为含病毒气溶胶对志愿者的试验情况及天然气溶胶的采集和检验。总的来看, 通过各方面的试验和调查研究, 可得出

表 1 含病毒气溶胶对志愿者的试验

Tab.1 Experimental challenge of human volunteer to viral aerosols

病毒类型 Virus type	评论 Remarks	作者 Author
甲 2 型流感病毒	10L 含病毒气溶胶空气吸入试验者(血清负反应), 50%组织培养感染剂量—3	Alford (1966)
腺病毒 4 型	志愿者为新兵, 试验前已有血清抗体者未感染, 其余与天然感染者症状相同	Couch (1966)
柯萨奇病毒 A21 型	0.3—2.5μm 直径的小气溶胶颗粒无临床症状, 但抗体大量产生, 而16μm 直径的产生抗体较少	Couch (1969)
柯萨奇病毒 A21 型、鼻病毒(NIH-1734)、腺病毒 4 型	鼻腔滴入或吸入气溶胶均可产生与自然感染一样的急性呼吸道病, 并且咳嗽、打喷嚏时也产生空气传播病毒	Couch (1966)
鼻病毒(NIH-1734)	气溶胶病毒、曝污后使 8 个无此类抗体者全部感染	Cate (1965)

以下几点结论:

- (1) 吸入人工产生的含病毒气溶胶可使病毒在呼吸道内复制;
- (2) 与其他的病毒感染途径相比, 气溶胶只需少量病毒传染单位即可感染敏感宿主;
- (3) 通过气溶胶传染途径可产生病毒病的典型迹象和征状;
- (4) 对一宿主同时感染含细菌和病毒的气溶胶可产生协同效应;
- (5) 含病毒的呼吸道分泌物可成为病毒气溶胶的来源;

表 2 天然气溶胶的采集和检验

Tab.2 Sampling and detection of naturally occurred viral aerosols

空气采集处 Location of air sampled	所用采样器 Sampler used	测试空气的体积 Volume of air tested	检出的病毒 Virus recovered	说明 Remarks	作者 Author
传染病医院	内装紧压棉花的玻璃采样器	10L/min, 2—60 min	天花病毒	38次试验只1次发现病毒, 但采样器非常原始	Meiklejohn (1961)
陆军医院1440立方呎的房间	大容积空气采样器 (Litton Systems, Inc.) (LVAS)	5分钟采集1785立方呎	腺病毒4型	每277立方呎检出一个50%组织培养感染剂量	Artenstein (1966)
病毒感染的志愿应试者所在房间	LVAS	12分钟内采集82%的房间空气(1.2×10 <sup>5</sup> L)	柯萨奇病毒A21型	所得数据完全表明一个病人可以释放出足以传播发病的病毒	Gerone (1966)
发病兔所在房间	静电除尘器或玻璃撞击取样器	—	兔痘病毒	静电除尘器有少量病毒检出, 撞击取样器则未检出, 可能由于收集的气溶胶量少所致	Westwood (1966)
放置球棒(大批)的地窖空气	LVAS或玻璃撞击取样器 (AGI)-4	1.0×10 <sup>5</sup> —3.0×10 <sup>5</sup> L	狂犬病毒	这是第一次关于狂犬病毒在空气中分离得到的报道; LVAS法检出的病毒高于AGI-4法	Winkler (1968)
发病动物房中空气	LVAS及多级液体撞击取样器	6.0×10 <sup>4</sup> L	口蹄疫病毒	空气传播病毒的检出猪比牛、羊要多; 在合适的条件下, 病毒可传播100km	Sellers (1969)
病鸡房	LVAS及多级液体撞击取样器	200及33000L	新城疫病毒	200L空气样的病毒产生320个半数蛋致死剂量, 33000L者则为5.0×10 <sup>5</sup> 个半数蛋致死剂量; 离病鸡房下风向64m处可检出病毒	Hugh-Jones (1973)
污水喷洒灌溉处	旋风洗涤器LVAS	600L/min, 2h	欧可病毒1, 25, 29型 脊髓灰质炎病毒2型 柯萨奇病毒B1型	离喷出处100m空气样品中检出, 采样时40%相对湿度(尚非肠道病毒的最适者)	Fattal (1982)
猪厩	LVAS	6.0×10 <sup>4</sup> L	猪α疱疹病毒1型	病猪处空气样品总可检出病毒	Donadson (1983)

(6) 我们对空气中病毒的生存和失活机理了解很少, 需要系统深入研究, 为病毒气溶胶的有效灭活方法提供科学基础;

(7) 需研制高效、价廉和动态的空气采样器, 以便对空气中病毒进行有效监测;

(8) 工业污染物质与气溶胶病毒同时传播对人和动物的综合效应研究。

### 3 土壤环境及食物

病毒一旦进入土壤, 与土壤颗粒相结合, 后者对病毒起到保护作用, 大大延长了病毒的存活时间。曾对蓄水层中砂粒的4种肠道病毒持久性进行检验, 小颗粒砂粒比大颗粒更易与病毒结合, 某些阳离子可促进病毒与砂粒的聚集作用, 某些有机物则可影响病毒的吸附作

用<sup>[16]</sup>。受病毒污染的土壤还因地表迳流或渗透, 污染地表水和地下水; 向海洋倾倒含病毒的污泥, 又可将病毒带入海洋。当5℃时, 延时曝气污泥及氧化沟污泥中的病毒分别可存活38天和17天, 其pH为6—8, Berg等<sup>[8]</sup>还进一步在pH为3.5的污泥池进行试验, 发现5℃时病毒依然存活。一般塘底的污泥比其上的覆盖水, 其肠道病毒的含量要高1到4个数量级。由于目前人们大量利用土地处理系统来处理污水污泥和垃圾, 因而它们的农业利用所引起的环境问题已越来越受到人们的关注。

大多数病毒都可通过食物传播。用带有病毒的水或污水浇灌蔬菜, 即可使蔬菜受到病毒的污染, Larkin (1978) 在莴苣和小萝卜检出肠道病毒(可存活38天)。还有不少学者在芹菜、

胡椒、蕃茄和胡萝卜上检测到柯萨奇病毒、脊髓灰质炎病毒、埃柯病毒、呼肠病毒和腺病毒的存活情况,发现常温下有的病毒可存活2个月,在冰箱中贮存可存活10—15天。Ward等<sup>[31]</sup>用含脊髓灰质炎病毒和腺病毒的污水喷灌芹菜、菠菜、莴苣及蕃茄,蔬菜上的病毒可存活13天,收获的蔬菜立即在4℃贮存,病毒生存更久,脊髓灰质炎病毒可存活76天;而污水中的脊髓灰质炎病毒只能活48小时,腺病毒24小时即灭活。鱼、虾、贝类在养殖过程中也可因水受病毒污染而感染病毒;有的动物体内富集病毒,如每天过滤水1500L的牡蛎,组织中病毒浓度比水中高25—100倍;1988年初上海甲型肝炎病爆发,临床患者29万余人,死亡11人,其原因追踪到海水养殖的毛蚶,认为是受病毒污染的海水感染毛蚶,人食毛蚶而得病。一种类似诺沃克因子的雪山因子(Snow mountain agent)在美国马萨诸塞州海边所获的蛤类中发现,使人食后患肠胃炎,Truman<sup>[29]</sup>等认为这是世界上第一例有关贝类中雪山因子引起肠胃炎的报道。近年发现原生动物和线虫也有富集病毒的作用。还从肉类及牛奶中检出病毒,武汉大学病毒系还从饮料中检出过病毒。

#### 4 建 议

王德铭<sup>[1,2]</sup>论述过包括病毒在内的微生物对水的污染以及水、气、土、食品中的生物污染问题。我们还应在这方面加强宣传、教育工作。

对今后环境介质中病毒生态的研究,建议开展:

(1) 环境介质(水、气、土)中病毒污染的背景值研究;可以水(包括生活污水、灌溉用水、各种养殖用水及饮用水源等)为重点,并选择有代表性的流域、地区、城镇、农村、工矿区、牧场、林区、农田等进行水、气、土中病毒污染情况、存在的病毒种类和数量水平以及环境质量评价的研究;

(2) 环境介质(包括生物体)中病毒的迁移、存活、富集规律以及病毒与环境相互作用机理的研究;

(3) 环境介质,特别是水环境中病毒指示生物和指示系统的研究,要重视噬菌体作为环境中病毒污染的指示物的应用研究;

(4) 研究和建立病毒学的各项环境标准和控制质量的病毒学安全标准;

(5) 水环境中病毒污染对人体、生物健康影响的研究;

(6) 研究实验室病毒浓缩和试验技术的标准化和规范化,其技术工具、用品商品化问题;

(7) 环境介质中病毒污染的途径及控制措施的研究;重点进行水源水不受或少受病毒污染的措施研究以及饮用水的有效灭活或去除病毒的净水工艺研究;

(8) 环境介质中病毒生态软课题(环境保护、市政建设、公共卫生、经济建设中地位及相应对策)研究,建立数据库。

#### 参 考 文 献

- 1 王德铭. 1974. 水体污染与水生生物研究. 环境保护知识讲座选编. 中国建筑工业出版社, 北京, 14.
- 2 王德铭. 1983. 生物污染. 中国大百科全书环境科学卷. 中国大百科全书出版社, 北京, 317.
- 3 张楚瑜等. 1983. 武昌东湖水中病毒的分离鉴定. 中国环境科学, 3(4): 55.
- 4 张楚瑜等. 1984. 自来水病毒污染的初步研究. 环境科学, 5(2): 29.
- 5 Amin, O.M. 1988. Pathogenic microorganisms and helminths in sewage products, Arabian Gulf, Country of Bahrain. Am. J. Public Health, 70: 314.
- 6 Battaglia, M. et al. 1987. Human enteric coronaviruses, further characterization and immunoblotting of viral proteins. J. Infect. Dis., 155: 140.
- 7 Bendova, E. et al. 1988. Virological problems at the Prague-Podoli water works. Vodni Hospod., 38: 131.
- 8 Berg, G. et al. 1988. Low-temperature stability of viruses in sludges. Appl. Environ. Microbiol., 54: 839.
- 9 Bizziagos, E. et al. 1988. Long-term survival

- of hepatitis A virus and poliovirus type 1 in mineral water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54: 2750.
- 10 Bosch, A. et al. 1988. Non-seasonal distribution of rotavirus in Barcelona raw sewage. *Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. Abt. B.*, 186: 273.
  - 11 Bradley, D.W. et al. 1987. Enterically transmitted non-A, non-B hepatitis: serial passage of disease in cynomolgus macaques and temarins and recovery of disease-associated 27 to 34nm viruslike particles. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 84: 6277.
  - 12 Brenner, K.P. et al. 1988. Animal viruses coliphages, and bacteria in aerosols and wastewater at a spray irrigation site. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54: 409
  - 13 Craun, G. F. 1985. A summary of waterborn illness transmitted through contaminated groundwater. *J. Environ. Health*, 48: 122.
  - 14 Cubitt, W.D. et al. 1987. Antigenic relationships between human caliciviruses and norwalk virus. *J. Infect. Dis.*, 156: 806.
  - 15 Dizer, H. et al. 1988. Adsorption of several enteroviruses on sand from an aquifer. Influence of pH, grain size, water solutes and organic freight. *Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. Ser. B. Umwelthyg. Krankenhaushyg. Arbinetshyg Praev. Med.*, 185: 548.
  - 16 El-Abagy, M.M. et al. 1988. Incidence of coliphage in potable water supplies. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54: 1632.
  - 17 Guttman-Bass, N. et al. 1985. Analysis of tap water for viruses results of a survey. *Water Sci. Technol.*, 17: 89.
  - 18 Krikelis, V. et al. 1988. Evaluation of enteric virus levels and serotypes recovered from waste water and sea-water. *J. Hyg. Epidemiol. Microbiol. Immunol.*, 32: 153.
  - 19 McKinely, V.L. et al. 1985. Physical and chemical correlates of microbial activity and biomass in composting municipal sewage sludge. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50: 1395.
  - 20 Moore, B.E. et al. 1988. Microbial characterization of municipal wastewater at a spray irrigation site: the lubbock infection surveillance study. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 60: 1222.
  - 21 Morse, D.L. et al. 1986. Widespread outbreaks of clam and oyster-associated gastroenteritis; role of norwalk virus. *N. Engl. J. Med.*, 314: 678.
  - 22 Mortensen, M.L. et al. 1985. Coronaviruslike particles in human gastrointestinal disease: epidemiologic, clinical, and laboratory observation. *Am. J. Dis. Child.*, 139: 928.
  - 23 Nakasaki, K. et al. 1985. Effect of temperature on composting of sewage sludge. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50: 1526.
  - 24 Payment, P. et al. 1985. Elimination of viruses and indicator bacteria at each step of treatment during preparation of drinking water at seven water treatment plants. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50: 1418.
  - 25 Petrovicova, A. 1989. Detection of coliphages and enteroviruses in drinking water and its source. *Ergebnisse der Limnologie*, 33: 285.
  - 26 Poyry, T. et al. 1988. Viruses in sewage water during and after a poliomyelitis outbreak and subsequent nationwide oral poliovirus vaccination campaign in Finland. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54: 371.
  - 27 Rose, J.A. et al. 1988. Occurrence of rotaviruses and enteroviruses in recreational water of Oak Creek, Arizona. *Water Res.*, 21: 1375.
  - 28 Simhon, A. et al. 1985. Fecal rotaviruses, adenoviruses, coronaviruslike particles, and small round viruses in a cohort of rural Costa Rican children. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 34: 931.
  - 29 Truman, B.I. et al. 1987. Snow mountain agent gastroenteritis from clams. *Am. J. Epidemiol.*, 126: 516.
  - 30 Wallis, C. et al. 1985. Methods for detecting viruses in aerosols. *Appl. Environ. Microbiol.*, 50: 1181.
  - 31 Ward, B. K. et al. 1987. Virus survival on vegetables spray-irrigated with wastewater. *Water Res.*, 21: 57.
  - 32 Williams, F.P. Jr. et al. 1986. Waterborne viral gastroenteritis. *J. Am. Water Works Assoc.*, 78: 34.
  - 33 Williams, F. P. Jr. et al. 1988. Detection of environmental viruses in sludge enhancement of enterovirus plaque assay titers with 5-iodo-2'-deoxyuridine and comparison to adenovirus and coliphage titers. *Water Res.*, 22: 847.