

病毒在土壤中的存活时间与传播能力及其影响因素

吴颐杭, 刘奇缘, 杨书慧, 马瑾*

中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

摘要: 土壤是病毒在自然界主要的分布场所,也是病毒传播的一种媒介. 对流感病毒、肠道病毒、甲型肝炎病毒和冠状病毒在土壤中的存活与传播进行了系统分析,并探究了病毒在土壤中吸附与存活的主要影响因素. 结果表明:流感病毒、肠道病毒、甲型肝炎病毒和冠状病毒均能在土壤中存活较长时间,并能以土壤为介质进行传播,进而导致人体暴露;土壤微生物、含水量、土壤类型及温度是影响病毒在土壤中吸附与存活的主要因素,土壤微生物的存在、含水量的降低以及温度的升高可能阻碍病毒在土壤中的存活,黏粒含量及pH较高的土壤中病毒的吸附量与存活率较高,而金属氧化物及有机质含量较高的土壤中病毒的吸附量与存活率较低. 基于上述分析,对病毒在土壤中存活与传播的研究提出了有针对性的建议,如系统开展我国土壤病毒的调查研究,加强病毒在土壤中存活、传播规律及影响因素的研究等. 研究显示,土壤在病毒的环境传播过程中具有重要作用,不可忽视病毒经土壤传播产生的风险.

关键词: 病毒; 土壤; 存活; 传播; 影响因素

中图分类号: X172

文章编号: 1001-6929(2020)07-1611-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.05.40

Survival Time and Transmission Ability of Viruses in Soil and Its Influencing Factors

WU Yihang, LIU Qiyuan, YANG Shuhui, MA Jin*

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Soil is the main distribution place of viruses in nature and an important medium for virus transmission. The survival and transmission of influenza virus, enterovirus, hepatitis A virus and coronavirus in soil and the main influencing factors were analyzed systematically. The results showed that influenza viruses, enteroviruses, hepatitis A viruses and coronaviruses could survive in soil for a long time. In addition, these viruses could be transmitted through soil and lead to human infection through soil exposure. Soil microorganisms, water content, soil type and temperature were found to be the main factors affecting the adsorption and survival of virus in soil. The presence of soil microorganisms, low soil moisture content and high temperature could hinder the survival of viruses in soil. In soil with high clay content and pH, the adsorption capacity and survival rate of viruses were high, while in the soil with high metal oxide and organic matter content, the adsorption capacity and survival rate of viruses were low. Based on the above analysis, specific suggestions about the studies of virus survival and transmission in soil were put forward, such as systematic investigation on soil viruses in China need to be carried out and research on the survival, transmission and influencing factors of viruses in soil need to be strengthened. This study shows that soil plays an important role in the environmental transmission of viruses, so the risk posed by environmental transmission of viruses should not be ignored.

Keywords: virus; soil; survival; transmission; influencing factors

2020年3月11日,世界卫生组织正式宣布新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情为全球大流行. 研究^[1-4]表明,呼吸道飞沫和直接接触是新型冠状病毒的主要传播方式,也存在气溶胶传播以及粪口传播的

可能. 事实上,病毒作为一种特殊的纳米颗粒^[5],也在不断参与地球化学循环过程,因此新型冠状病毒在环境介质中的存活与传播应引起足够重视. 目前,关于病毒在环境介质尤其在土壤中存活与传播的研究

收稿日期: 2020-03-31 修订日期: 2020-05-20

作者简介: 吴颐杭(1998-),女,四川南充人,2287911846@qq.com.

* 责任作者,马瑾(1978-),男,山西临汾人,研究员,博士,博导,主要从事土壤环境与健康研究,majin@craes.org.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.42041003)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42041003)

较为鲜见. 在众多环境介质中, 病毒在土壤中的存活与传播尤为重要. 土壤是微生物的主要栖息地, 包括细菌、真菌、古菌、原生动物等, 而这些生物均受到各种病毒的侵染, 因此土壤成为病毒最主要的分布场所^[6], 在病毒传播过程中的作用不可忽视^[7-12].

病毒可通过多种途径进入土壤, 如感染患者和野生动物的粪便、尸体以及被病毒污染的医疗废弃物等的不当处理, 部分病毒还可存在于患者的唾液、痰液中^[13], 因此患者随地吐痰也可能导致病毒进入土壤. 病毒能以休眠状态持久存在于土壤中, 而且休眠状态下仍具有感染性^[14]; 此外, 土壤中存储的病毒还可能通过地表径流或渗透污染地下水造成更广泛的传播^[15], 人体则可通过口腔摄入、皮肤接触、呼吸吸入等多种途径暴露于带有病毒的土壤和地下水. 事实上, 病毒在土壤中的存活与传播受多种环境因素的影响, 研究并掌握这些规律能为有效控制病毒环境传播提供科学依据. 该研究选择了流感病毒、肠道病毒、甲型肝炎病毒和冠状病毒等典型病毒种类, 对其在土壤中的存活与传播及其主要影响因素进行了系统分析, 以期制定病毒环境传播防控对策提供参考.

1 病毒在土壤中的存活与传播

1.1 流感病毒

流感病毒有四类, 分别为甲型、乙型、丙型、丁型, 其中甲型流感病毒可感染人类及多种动物, 而且许多甲型流感病毒具有人传人的能力, 导致全球范围的大流行, 自16世纪以来全球已发生过多次甲型流感大流行^[16]. 不同流感病毒与宿主结合的受体不同, 人流感病毒可与人类肺和上呼吸道细胞唾液酸 α -2,6半乳糖受体结合, 动物流感病毒与鸟类、猪的上皮细胞唾液酸 α -2,3半乳糖受体结合, 但动物流感病毒也可与人类下呼吸道中的唾液酸 α -2,3半乳糖受体结合从而使人类患病, 如甲型H5N1流感病毒(H5N1)可感染肺泡巨噬细胞从而在人类中广泛传播^[17]. 流感病毒可通过飞沫传播, 经呼吸道感染人体^[18], 直接接触被感染的动物或受污染的环境也可感染流感病毒^[19]. 如人类直接接触被病毒污染的动物粪便、水体和土壤等则可能感染禽流感病毒^[20]. 2009年由甲型H1N1流感病毒引起的疫情在全球213个国家流行, 造成17483例患者死亡^[21]. H5N1是一种高致病性禽流感病毒, 禽类易感且发病迅速, 病死率极高, 在一定条件下还可造成人类感染及有限人传人事件^[22]. 据报道, 人类感染H5N1后病死率超过50%^[23]. 1997年H5N1在中国香港家禽间暴发并首次造成人群感染, 2003年H5N1在东亚和东南亚再次出现, 2005年

H5N1从亚洲传播到欧洲和非洲^[24].

部分流感病毒可在土壤中存活较长的时间, 如H9亚型禽流感病毒在土壤中的存活时间大于5d^[8], H5N1在低温条件下可能在土壤中存在13d以上^[25]. 此外, 土壤还可能作为禽流感病毒的传播介质, 如使用未经处理的家禽粪便做为土壤肥料也可能是人体感染H5N1的一种途径^[26]; Horm等^[27]也认为受污染的淤泥和土壤可能是甲型禽流感的贮存器和传播源; Gutierrez等^[11]研究了被H5N1污染土壤传播病毒的情况, 将含有不同浓度病毒的粪便堆放于土壤中, 并将土壤放置在饲养鸡容器的底部, 发现当鸡暴露于含有高浓度病毒的土壤时, 鸡会感染病毒, 并在第4天时全部死亡, 进一步证明病毒能在土壤中存活并传播.

1.2 肠道病毒

肠道病毒包括脊髓灰质炎病毒、柯萨奇病毒、埃可病毒以及新型肠道病毒等, 属于RNA病毒. 肠道病毒可引起多种传染性疾病, 如手足口病、脊髓灰质炎、急性呼吸道感染以及严重的神经并发症等^[28]. 肠道病毒通常在消化道复制后传播到其他器官, 如肠道病毒71型(EV71)可侵染中枢神经系统、呼吸系统以及消化系统^[29], 其主要传播方式是粪-口传播^[30]. 由于脊髓灰质炎疫苗的研制成功, 世界卫生组织宣布世界大部分地区已消灭了脊髓灰质炎, 但仍需注意非脊髓灰质炎肠道病毒可能导致疾病的局部暴发^[31]. 已发生多起由于肠道病毒传播导致的疾病暴发, 如由EV71引起的手足口病曾在新加坡暴发, 导致学校关闭以防止病毒传播^[32]; 2014年, 美国大范围暴发的严重呼吸道疾病也被证明与肠道病毒D68有关^[33].

肠道病毒感染患者的粪便中存在高浓度病毒, 每克粪便中肠道病毒数量可达 10^6 个, 因而土壤也成为肠道病毒传播的一种介质. 研究^[34]表明, 脊髓灰质炎病毒、柯萨奇A型和B型病毒均可以通过土壤进行传播. 肠道病毒可在土壤中存活很长时间, 研究^[35]表明肠道病毒在土壤中的存活时间可达2~4个月, 被病毒污染的土壤中脊髓灰质炎病毒在冬季可存活96d, 在夏季可存活11d. 当使用经氯化消毒处理后的污水进行灌溉时, 仍可在距土壤表面1.5m以下的沟井中检测到埃可病毒, 说明病毒在土壤中具有一定的垂向迁移能力^[15]. 此外, 土壤中的病毒还可能通过地表径流传播, 甚至进入地下水. Jean等^[36]对中国台湾一个小村庄暴发的手足口病开展了研究, 发现造成手足口病暴发的原因可能是含有肠道病毒的污水渗入土壤, 土壤中存储的病毒在强降雨的条件下迁移到地

下水中污染该村庄的井水,最终导致人体感染.由此可见,肠道病毒存在通过土壤传播进而危害人体健康的可能性.

1.3 甲型肝炎病毒

甲型肝炎曾在世界多个国家暴发,据估计发展中国家有90%的儿童在6岁前就感染了甲型肝炎^[37].引起甲型肝炎的是一种属于小RNA病毒科嗜肝病毒属的甲型肝炎病毒(HAV).HAV进入人体后通过胃肠道进入肝脏,其在肝脏的复制会对肝细胞造成损害从而引发肝炎.HAV通常可在患者的粪便中检测到,粪-口传播是其主要传播方式^[15].受感染动物的唾液腺、扁桃体和淋巴腺均含有病毒,表明病毒也可通过唾液传播,而且这些地方的病毒含量是粪便中的数千倍^[37].1988年,HAV曾在我国上海市大规模暴发,流行高峰期时,每天发病人数高达 1.9×10^4 人,流行5个月内造成30多万人感染,47人死亡^[38].

虽然感染HAV患者的病死率通常小于1%,但这种病毒具有高度传染性,而且对外界环境的适应能力较强^[34].HAV可以稳定存在于60℃以下的水中,当水溶液中含高浓度二价阳离子时甚至可以在80℃的温度下稳定存在;HAV还可在pH为1~10的极端环境下稳定存在,在粪便中的存活时间超过一个月^[37].HAV也可在土壤中长期存活,如在印度穆萨河附近采集的403个土壤样本中,有19.1%的土壤样本被HAV污染,而且在37℃下土壤中的HAV可存活13周^[39].HAV在红壤土及海洋底泥中的存活时间可在56d以上^[37].HAV在土壤中的存活时间高于脊髓灰质炎病毒和艾柯病毒,而且其受高温和土壤微生物活动的影响较小^[40].由于HAV在土壤中存活时间较长,而且土壤可能是HAV传播的媒介,因此含病毒的唾液、粪便、污水等一旦进入土壤中,便可能会产生潜在的健康风险.2005年浙江省萧山区瓜沥镇东方村先后出现了9例甲型肝炎疑似病例,经流行病学调查和实验室检查,发现是由于农村简易公厕污染了较为静止的地表水,而被病毒污染的地表水再渗透穿过土壤从而扩散污染浅井水所致^[35].由此可见,土壤在病毒储存和传播过程中发挥着重要作用,被病毒污染的土壤也会危害人体健康,因此需要加大防范力度,防止病毒传播.

1.4 冠状病毒

目前已发现的可以感染人类的冠状病毒共有7种^[41],其中已经引起大流行的主要包括SARS病毒(SARS-Cov)、MERS病毒(MERS-Cov)以及新型冠状病毒(2019-nCoV).研究发现,人体中SARS病毒和

新型冠状病毒的受体均为血管紧张素转换酶2(ACE2),SARS病毒进入人体后主要感染有纤毛的支气管上皮细胞和人肺Ⅱ型上皮细胞而引起严重急性呼吸综合征^[42-44];而新型冠状病毒不仅可引起严重的呼吸窘迫综合征和多器官衰竭,还可导致患者的肝功能异常,攻击人体肾脏^[45].MERS病毒的受体为下呼吸道、胃肠道和肾脏中均存在的二肽基肽酶(DPP4),MERS病毒也可引起严重的非典型肺炎,还可以造成胃肠道细胞损伤,攻击肾脏造成急性肾衰竭^[42].可感染人类的冠状病毒通常是经呼吸道传播引起人体上呼吸道感染,不过有研究发现SARS病毒可在肠道中进行复制^[46],存在粪-口传播的可能^[47].2002年暴发的SARS在全球30多个国家蔓延,共有8000多名确诊病例^[48],病死率约为10%^[49].2012年中东暴发的中东急性呼吸综合症同样也是由冠状病毒引起,不过引发中东急性呼吸综合症的MERS病毒是一种更加致命的病毒,感染患者病死率高达32%^[50].新型冠状病毒虽致死率不如SARS病毒和MERS病毒,但其具有更高的传染性.

学者对冠状病毒进行了大量的研究.研究^[51-52]发现,在4℃条件下,SARS病毒在废水中可存活14d,在粪便或尿液中至少可存在17d,在血液中大约可存活15d.李敬云等^[53]发现,SARS病毒在模拟污染的木片、棉布表面及土壤中大约可以存活6h;也有研究^[54]表明,SARS病毒可在土壤、金属、塑料、玻璃等表面存活3d,其存活时间可能与环境条件有关.由于传染性支气管炎病毒(IBV)与SARS病毒均为冠状病毒,且与SARS病毒的亲缘关系较近,马雪姣等^[55]研究了IBV在土壤中的运移机理,结果表明IBV在土柱中存在损失过程,包括不可逆吸附和衰变等,但不包括失活,因此IBV可能存在于土壤中并具有一定的活性.美国国家过敏和传染病研究所研究^[56]表明,新型冠状病毒可在塑料表面存活3d以上.2013年,Kupferschmidt等^[57]研究表明,人类可能通过接触被蝙蝠粪便污染的土壤或尘土而感染MERS病毒.由此可见,被病毒污染的土壤也可能是一种潜在危害源.

综上,有些病毒是可以长时间存在于土壤中,并可能通过各种途径进入土壤从而使人体暴露于污染环境而造成危害.由此可见,研究病毒在土壤中的存活与传播对控制病毒传播具有重要意义.

2 病毒在土壤中吸附与存活的影响因素

病毒进入土壤后,在土壤的传播过程中,吸附和灭活是去除病毒的主要过程^[58],因此该研究主要探

讨了影响土壤中病毒吸附与灭活的因素. 研究^[59]表明,病毒在土壤中的吸附与灭活易受到多种因素的影响,如土壤微生物、含水量、土壤类型及温度等.

2.1 土壤微生物

尽管对病毒吸附、灭活行为与土壤性质的关系进行了大量研究,但多数研究都没有考虑土壤自身微生物对病毒环境行为的影响^[60]. 然而, Hurst 等^[61]研究表明,土壤中固有需氧微生物的存在会阻碍脊髓灰质炎病毒在壤质砂土上的生长,使土壤中病毒的灭活率增加 2~3 倍. 蒋艳等^[62]发现,微生物影响土壤病毒的存活可能是因为微生物生长过程中的某些代谢产物会影响部分病毒的消亡,细菌影响病毒浓度的机理是细菌生长前期吸附病毒导致病毒浓度降低,而生长后期则可能是由于细胞吸附和胞外分泌物导致病毒死亡. Callan 等^[63]研究表明,铜绿假单胞菌可以分泌一种蛋白酶和弹性蛋白酶来裂解流感病毒血凝素. 也有研究^[64]表明,土壤微生物对病毒的存活没有显著影响,这可能是因为微生物对病毒的影响与病毒的类型有关,而且由于影响微生物生存的环境参数较多且相互作用,因此得到的结论可能不一致.

2.2 土壤含水量

土壤含水量是影响病毒存活的另一重要因素,土壤含水量降低导致病毒失活速度加快^[60]. 研究^[64]表明,在干燥条件下病毒可在施用污泥的土壤中存活 8 d,而潮湿条件下病毒在土壤中的存活时间可达 35 d,这可能是因为干燥条件下病毒成分可能发生解离,核酸发生降解,因而潮湿厌氧条件更有利于病毒在土壤中的存活. 另有研究^[60]发现,土壤含水量降低时,病毒对固体基质的吸附作用增强,这可能是由于在静电力和范德华力的作用下病毒逐渐靠近固体表面从而进入土壤颗粒周围较薄的水膜. Yeager 等^[65]研究表明,干燥土壤会导致柯萨奇病毒和脊髓灰质炎病毒快速失活. 针对脊髓灰质炎 1 型病毒的研究^[66]发现,当土壤含水率从 5% 增至 15% 时,该病毒的存活时间会缩短,而当土壤含水率超过饱和含水率时,病毒存活时间反而又增加. 因此,土壤含水率对病毒的存活影响机制比较复杂,这可能是因为土壤对病毒的吸附程度及吸附机理与土壤含水率有关.

2.3 土壤类型

不同类型土壤的黏粒含量、金属氧化物含量、pH 及有机质含量等存在差异,而这些因素均会影响病毒在土壤中的环境行为. 赵炳梓等^[67]研究了 4 种不同土壤对病毒的吸附能力,结果表明红黏土、赤红壤、砖红壤、红壤土在没有其他因素影响下对病毒的吸附能

力分别为 99.1%、95.71%、70.82%、23.4%,这可能是由于红黏土的黏粒含量高,而土壤中黏土成分越多,对病毒的吸附力越大. JIN 等^[68]研究了肝炎病毒在 5 种黏粒含量不同的土壤中的存活时间,发现病毒在黏粒含量最高的黏土中存活时间最长. 另有研究^[58,69-70]表明,金属氧化物也会显著影响病毒的存活和吸附,土壤中金属氧化物导致病毒失活可能是由于病毒与金属氧化物之间强烈的吸附反应所致,这种吸附反应是静电相互作用的结果,可能导致病毒解体或传染性降低甚至丧失传染性. 土壤 pH 是影响病毒附着于土壤表面的重要环境因子,这是因为大部分病毒的蛋白质外壳是由可离子化的氨基酸组成的,而土壤 pH 会显著影响病毒的离子化程度,进而影响病毒在土壤表面的吸附行为^[71]. 研究^[72]表明,pH 较低有利于病毒的吸附,pH 增高可使吸附的病毒释放出来,如脊髓灰质炎病毒在 pH 为 5.5 时的吸附量高于 pH 为 7 时的吸附量. 土壤有机质主要以腐殖酸形式存在,而腐殖酸一般与病毒颗粒一样带负电荷,因此会与病毒竞争相同的结合位点从而降低病毒的吸附^[58].

2.4 温度

温度是影响病毒在土壤中存活的重要因素,许多研究表明温度升高会促进病毒的灭活^[58]. SARS 病毒便是一种受温度显著影响的病毒,世界卫生组织认为 SARS 病毒可以在 0 °C 时无限期存活,不过在常温下 2 d 可以灭活 90% 的病毒. 柯萨奇 A9 病毒在 30 °C 的灭活率高于在 15 °C 的灭活率,温度升高促进柯萨奇 A9 病毒的灭活可能是饱和土壤中微生物活性增强的结果^[73]. JIN 等^[68]研究发现,在 4 °C 饱和土壤中脊髓灰质炎病毒可存活 180 d,当温度升至 37 °C 时,12 d 后病毒就全部死亡. 还有学者进行了在实际环境中病毒存活情况的研究. 如 Tierney 等^[74]研究了冬季和夏季种植蔬菜的淤泥改良土壤中脊髓灰质炎病毒的存活情况,结果表明冬季病毒在土壤中的存活期可达 96 d,而夏季生存期为 11 d;另有研究^[75]表明,温度升高会促进病毒在土壤表面的吸附,这主要是因为病毒蛋白质分子表面吸热伸张或吸附速率随温度的升高而增加所致.

目前,关于环境因素对病毒在土壤中环境行为的研究较多,但多数仅研究单一条件对病毒的影响,而关于环境因素共同作用的研究较少^[60]. 当环境因素共同作用时可能会产生更为复杂的影响机制,而自然环境中这些因素往往同时存在,共同影响病毒在土壤中的环境行为. 因此,还需深入探究多种因素共同作用时对病毒在土壤中存活与传播的影响.

3 对病毒在土壤中传播研究的建议

目前,有关病毒在土壤中存活、传播及其影响因素的研究仍非常有限,亟需开展相关研究.在上述分析的基础上,提出如下建议:①系统开展我国土壤病毒的调查研究,全面掌握重点区域土壤环境中存在的病毒种类、数量、分布特征等;对一些由病毒引起的重大疾病事件进行专项研究,研究病毒在不同土壤中的迁移特征、机理和消失途径,明确土壤在不同种类病毒传播过程中的作用;此外,由于多种病毒均是由动物传染至人类,需针对重点可能携带病毒的野生动物(如蝙蝠)活动区域开展系统调查.②加强病毒特别是新出现病毒在土壤中存活、传播规律及影响因素的研究,自然条件下土壤中的病毒存活与传播易受多种因素影响,需筛选出对病毒影响最大的关键因素,并加强对多种关键因素复合影响下病毒在土壤中存活与传播的研究,彻底明晰新型病毒在环境介质中的来源与传播途径,为科学研判和预测病毒的环境传播提供科学依据.③已有研究证明,土壤中含有大量病毒,且土壤接触也是人类及其他动物暴露于病毒的潜在途径,但对新型冠状病毒在土壤中的存活及传播的认识还非常有限,建议系统开展相关研究.

4 结论

a) 土壤是各种病毒在自然环境中的主要赋存场所,也是病毒的天然基因库;同时,土壤对于病毒的传播和人体暴露也发挥着重要作用,人体可能通过多种暴露途径摄入携带病毒的土壤颗粒.

b) 流感病毒、肠道病毒、甲型肝炎病毒及冠状病毒等均可能在土壤中存活较长时间,而且土壤可能是病毒传播的一种介质.病毒作为一种特殊的生命体,其在土壤中的存活、传播等生命过程及环境行为受土壤类型、土壤微生物、以及土壤温度和湿度等因素影响.

c) 关于病毒在土壤中存活、传播及其关键影响因素的研究非常有限,需要系统开展我国土壤中病毒的调查研究,明晰病毒在土壤中的环境传播途径,为病毒的环境溯源及风险防控提供科学依据.

参考文献(References):

[1] 李雪秋,蔡文锋,黄丽芬,等.广州市2003年重症急性呼吸综合征与2020年新型冠状病毒肺炎流行特征对比分析[J].中华流行病学杂志,2020,41(5):634-637.
LI Xueqiu, CAI Wenfeng, HUANG Lifeng, *et al.* Comparison of epidemic characteristics between SARS in 2003 and COVID-19 in 2020 in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(5):634-637.

[2] 冯录召.新型冠状病毒可通过气溶胶传播[N/OL].成都:大众健康

报社,2020-02-27[2020-03-30].<http://210.76.211.142/rwt/CNKI/http/NNYHGLUDN3WXTLUPMW4A/KXReader/Detail?TIMESTAMP=637254811151636250&DBCOD=CCND&TABLEName=CCNDLAST2020&FileName=DZJK202002270030&RESULT=1&SIGN=%2blfnH8sF6%2bwLX4Ql3YXqkhHIDvQ%3d>.

- [3] YEO C, KAUSHAL S, YEO D. Enteric involvement of coronaviruses: is a faecal-oral transmission of SARS-Cov-2 possible? [J]. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 2020, 5(4):335-337.
- [4] 丘杨,王宁,曾文,等.新型冠状病毒能否通过气溶胶传播? [J]. *三峡生态环境监测*, 2020, 5(2):1-5.
QIU Yang, WANG Ning, ZENG Wen, *et al.* Aerosol transmission and what it means for COVID-19: a brief summary [J]. *Ecology and Environment Monitoring of Three Gorges*, 2020, 5(2):1-5.
- [5] HOHELLA M F, MOGK D W, RANVILLE J, *et al.* Natural, incidental, and engineered nanomaterials and their impacts on the earth system [J]. *Science*, 2019, 363(6434):1414-1425.
- [6] 王光华.掀开土壤生物“暗物质”:土壤病毒的神秘面纱[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(6):35-44.
WANG Guanghua. Lift mysterious veil of soil virus: ‘dark matter’ of soil biota [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(6):35-44.
- [7] YOSHIMOTO R, SASAKI H, TAKAHASHI T, *et al.* Contribution of soil components to adsorption of pepper mild mottle virus by Japanese soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46:96-102.
- [8] 于洋.鸡场土壤中H9亚型禽流感病毒的检测与化学消毒剂的筛选[D].武汉:华中农业大学,2012:10-12.
- [9] 陈苗苗.水稻条纹病毒土传媒介的研究[D].南京:南京农业大学,2011:14-16.
- [10] SAUNDERS S E, BARTZ J C, BARTELT-HUNT S L. Soil-mediated prion transmission: is local soil-type a key determinant of prion disease incidence? [J]. *Chemosphere*, 2012, 87(7):661-667.
- [11] GUTIERREA R A, BUCHY P. Contaminated soil and transmission of influenza virus (H5N1) [J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2012, 18(9):1530-1531.
- [12] LINARD C, TERSAGO K, LEIRS H, *et al.* Environment conditions and Puumala virus transmission in Belgium [J]. *International Journal of Health Geographics*, 2007, 6(55):1-11.
- [13] WU Yongjian, GUO Cheng, TANG Lantian, *et al.* Prolonged presence of SARS-CoV-2 viral RNA in faecal samples [J]. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 2020, 5(5):434-435.
- [14] BULTMAN M W, FISHER F S, PAPPAGIANIS P. *Essentials of medical geology* [M]. Rev. ed. Berlin, Germany: Springer, 2013: 477-504.
- [15] 郑耀通.环境病毒学[M].北京:化学工业出版社,2006:1-130.
- [16] HAMPSON A W, MACKENZIE J S. The influenza viruses [J]. *The Medical journal of Australia*, 2006, 185(S10):39-43.
- [17] 朱艳慧,王升启.流感病毒生命周期研究进展[J]. *生物技术通讯*, 2019, 30(3):430-434.
ZHU Yanhui, WANG Shengqi. Research advances in influenza virus life cycle [J]. *Letters in Biotechnology*, 2019, 30(3):430-434.
- [18] SORRELL E M, SCHRAUWEN E J A, LINSTER M, *et al.*

- Predicting 'airborne' influenza viruses: (trans-) mission impossible? [J]. *Current Opinion in Virology*, 2011, 1(6): 635-642.
- [19] MCARTHUR D B. Emerging Infectious Diseases [J]. *Nursing Clinics of North America*, 2019, 54: 297-311.
- [20] 卫兰.应用生态位模型预测汉坦病毒和禽流感病毒感染风险分布[D].北京:中国人民解放军军事医学科学院, 2011: 39-40.
- [21] BRADLEY B T, BRYAN A. Emerging respiratory infections: the infectious disease pathology of SARS, MERS, pandemic influenza, and Legionella [J]. *Seminars in Diagnostic Pathology*, 2019, 36(3): 152-159.
- [22] WANG Hua, FENG Zijian, SHU Yuelong, *et al.* Probable limited person-to-person transmission of highly pathogenic avian influenza A (H5N1) virus in China [J]. *The Lancet*, 2008, 371(9622): 1427-1434.
- [23] RUDENKO L, SELLWOOD C, RUSSELL C, *et al.* Will there ever be a new influenza pandemic and are we prepared? [J]. *Vaccine*, 2015, 33(49): 7037-7040.
- [24] POOVORAWAN Y, PYUNGPORN S, PRACHAYANGPRECHA S, *et al.* Global alert to avian influenza virus infection: from H5N1 to H7N9 [J]. *Pathogens and Global Health*, 2013, 107(5): 217-223.
- [25] WOOD J P, CHOI W, CHAPPIE D J, *et al.* Environmental persistence of a highly pathogenic avian influenza (H5N1) virus [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(19): 7515-7520.
- [26] BEIGEL J, FARRAR J, HAN A, *et al.* Avian influenza A (H5N1) infection in humans [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2005, 353(13): 1374-1385.
- [27] HORM S V, DEBOOSERE N, GUTIERREZ R A, *et al.* Direct detection of highly pathogenic avian influenza A/H5N1 virus from mud specimens [J]. *Journal of Virological Methods*, 2011, 176(1/2): 69-73.
- [28] ALEXANDER L G, SAMIA N N, MESSACAR K, *et al.* A novel outbreak enterovirus D68 strain associated with acute flaccid myelitis cases in the USA (2012-14): a retrospective cohort study [J]. *The Lancet Infectious Diseases*, 2015, 15(6): 671-682.
- [29] 陈鑫, 赵彬彬, 武婧, 等. 手足口病从感染到发病的分子机制 [J]. *中国比较医学杂志*, 2019, 29(1): 101-106.
- CHEN Xin, ZHAO Binbin, WU Jing, *et al.* Molecular mechanism of hand, foot, and mouth disease: from infection to disease [J]. *Chinese Journal of Comparative Medicine*, 2019, 29(1): 101-106.
- [30] 吴疆. 我国手足口病与重症肠道病毒感染的流行病学研究现状 [J]. *中国小儿急救医学*, 2008, 15(2): 100-102.
- [31] SARIKA S, WILLIAM D R, PETER I A, *et al.* Global epidemiology of nonpolio enteroviruses causing severe neurological complications: a systematic review and meta-analysis [J]. *Reviews in Medical Virology*, 2020, 30(1): 1-13.
- [32] SIEGEL K, COOK A, LA H. The impact of hand, foot and mouth disease control policies in Singapore: a qualitative analysis of public perceptions [J]. *Public Health Policy*, 2017, 38(2): 271-287.
- [33] LEVY A, ROBERTS J, LANG J, *et al.* Enterovirus D68 disease and molecule epidemiology in Australia [J]. *Journal of Clinical Virology: the Official Publication of the Pan American Society for Clinical Virology*, 2015, 69: 117-121.
- [34] NIEDER R, BENBI D K, REICHL F X. Soil components and human health [M]. Berlin: Springer, 2018: 723-810.
- [35] 环境保护部自然生态保护司. 土壤污染与人体健康 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 365-371.
- [36] JEAN J S, GUO H R, CHEN S H, *et al.* The association between rainfall rate and occurrence of an enterovirus epidemic due to a contaminated well [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, 101(6): 1224-1231.
- [37] SHIEH Y C, CROMEANS T L, SOBSEY M D. *Encyclopedia of food microbiology* [M]. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2014: 738-744.
- [38] 韩思阳. 甲型肝炎的流行病特征及甲肝疫苗的保护效果研究进展 [J]. *生物化工*, 2018, 4(5): 140-143.
- HAN Siyang. Epidemiological characteristics of hepatitis A virus and its protective effects [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2018, 4(5): 140-143.
- [39] PARASHAR D, KHALKAR P, ARANKALLE V A. Survival of hepatitis A and E viruses in soil samples [J]. *Clinical Microbiology and Infection*, 2011. doi: 10.1111/j.1469-0691.2011.03652.x.
- [40] RAPHAEL R A, SATTAR S A, SPRINGTHORPE V S. Long-term survival of human rotavirus in raw and treated river water [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1985, 31(2): 124-128.
- [41] ABDEL-MONEIM A S. Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV): evidence and speculations [J]. *Archives of Virology*, 2014, 159(7): 1575-1584.
- [42] 王慧, 高振, 林跃家, 等. 既往病毒性呼吸道传染病研究对抗 COVID-19 药物研发的启示 [J]. *中国现代应用药学*, 2020, 37(5): 513-524.
- WANG Hui, GAO Zhen, LIN Yuejia, *et al.* Implications of previous studies on viral respiratory infections for anti-COVID-19 drug development [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2020, 37(5): 513-524.
- [43] LETKO M, MARZI A, MUNSTER V. Functional assessment of cell entry and receptor usage for SARS-CoV-2 and other lineage B betacoronaviruses [J]. *Nature Microbiology*, 2020, 5(4): 562-569.
- [44] ZHOU Peng, YANG Xinglou, WANG Xianguang, *et al.* A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin [J]. *Nature*, 2020, 579(7798): 270-273.
- [45] 李光明, 潘昕. 28 例亳州市新型冠状病毒肺炎患者肝损伤的特征分析 [J]. *临床肝胆病杂志*, 2020, 36(4): 772-774.
- LI Guangming, PAN Xin. Features of liver injury in patients with coronavirus disease 2019 in Bozhou, China [J]. *Journal of Clinical Hepatology*, 2020, 36(4): 772-774.
- [46] CLERI D J, RICKETTI A J, VERNALEO J R. Severe acute respiratory syndrome (SARS) [J]. *Infectious Disease Clinics of North America*, 2010, 21(1): 175-202.
- [47] 梁万年, 黄若刚, 赵锐, 等. SARS 病毒及其流行特征 [J]. *中国全科医学*, 2003, 6(7): 527-529.
- [48] VIJAYANAND P, WILKINS E, WOODHEAD M. Severe acute respiratory syndrome (SARS): a review [J]. *Clinical Medicine*, 2004, 4(2): 152-160.
- [49] BOLLES M, DONALDSON E, BARIC R. SARS-CoV and emergent

- coronaviruses: viral determinants of interspecies transmission [J]. *Current Opinion in Virology*, 2011, 1(6): 624-634.
- [50] AHMADZADEH J, MOBARAKI K, MOUSAVI S J, *et al.* The risk factors associated with MERS-Cov patient fatality: a global survey [J]. *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 2020, 96(3): 1-5.
- [51] WANG X W, LI J S, JIN M, *et al.* Study on the resistance of severe acute respiratory syndrome-associated coronavirus [J]. *Journal of Virological Methods*, 2005, 126(1/2): 171-177.
- [52] 黎源倩. 中华医学百科全书卫生检验学 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2017: 409-413.
- [53] 李敬云, 鲍作义, 刘思扬, 等. SARS 病毒在外界环境物品中生存和抵抗能力的研究 [J]. *中国消毒学杂志*, 2003, 20(2): 33-35. LI Jjingyun, BAO Zuoyi, LIU Siyang, *et al.* Survival study of SARS virus *in vitro* [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2003, 20(2): 33-35.
- [54] 孟继鸿. SARS 基础与临床 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2003: 28-31.
- [55] 马雪姣, 金妍, 黄元仿, 等. 冠状病毒 IBV 和噬菌体 MS2 在饱和多孔介质中的运移规律 [J]. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 113-117. MA Xuejiao, JIN Yan, HUANG Yuanfang, *et al.* Transport of avian infectious bronchitis virus (IBV) and bacteriophage (MS2) in saturated porous media [J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(2): 113-117.
- [56] NEEITJE V D, TRENTON B, DYLAN-H M, *et al.* Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2020, 382(16): 1564-1567.
- [57] KUPFERSCHMIDT K. Emerging infectious diseases link to MERS virus underscores bats' puzzling threat [J]. *Science*, 2013, 341(6149): 948-949.
- [58] SCHIJVEN J F, HASSANIZADEH S M. Removal of viruses by soil passage: overview of modeling, processes, and parameters [J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2000, 30(1): 49-127.
- [59] 王秋英, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 土壤对病毒的吸附行为及其在环境净化中的作用 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 808-816. WANG Qiuying, ZHAO Bingzi, ZHANG Jiabao, *et al.* Virus adsorbing behavior of soil and its significance in natural disinfection [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 808-816.
- [60] ZHAO Bingzi, ZHANG Hui, ZHANG Jiabao, *et al.* Virus adsorption and inactivation in soil as influenced by autochthonous microorganisms and water content [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(3): 649-659.
- [61] HURST C J. Influence of aerobic microorganisms upon virus survival in soil [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1988, 34(5): 696-699.
- [62] 蒋艳, 赵炳梓. 细菌生长过程中的病毒消失行为研究 [J]. *土壤*, 2013, 45(3): 522-528. JIANG Yan, ZHAO Bingzi. Effects of bacterial growth process on virus removal [J]. *Soils*, 2013, 45(3): 522-528.
- [63] CALLAN R J, HARTMANN F A, WEST S E H, *et al.* Cleavage of influenza A virus H1 hemagglutinin by swine respiratory bacterial proteases [J]. *Journal of Virology*, 1997, 71(10): 7579-7585.
- [64] 赵炳梓, 张佳宝. 病毒在土壤中的迁移行为 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 306-313. ZHAO Bingzi, ZHANG Jiabao. Transport of viruses in the soil: an overview [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 306-313.
- [65] YEAGER J G, O'BRIEN R T. Enterovirus inactivation in soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1979, 38(4): 694-701.
- [66] HURST C J, GERBA C P, CECH I. Effects of environmental variables and soil characteristics on virus survival in soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, 40(6): 1067-1079.
- [67] 赵炳梓, 蒋艳. 外源细菌添加对红壤吸附病毒的影响 [J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 505-512. ZHAO Bingzi, JIANG Yan. Virus adsorption onto red soil as influenced by additional bacteria [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 505-512.
- [68] JIN Y, FLURY M. Fate and transport of viruses in porous media [J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 77(2): 39-102.
- [69] CHU Yanjie, JIN Yan, FLURY M, *et al.* Mechanisms of virus removal during transport in unsaturated porous media [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 253-263.
- [70] CHU Yanjie, JIN Yan, BAUMANN T, *et al.* Effect of soil properties on saturated and unsaturated virus transport through columns [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(6): 2017-2025.
- [71] 赵炳梓, 张辉, 沈林林, 等. 病毒在不同环境介质中去向研究进展 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 405-412. ZHAO Bingzi, ZHANG Hui, SHEN Linlin, *et al.* Fate of virus in different environment media: a review [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 405-412.
- [72] BALES R C, LI S, MAGUIRE K M, *et al.* MS-2 and poliovirus transport in porous media: hydrophobic effects and chemical perturbations [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(4): 957-963.
- [73] NASSER A M, GLOZMAN R, NITZAN Y. Contribution of microbial activity to virus reduction in saturated soil [J]. *Water Research*, 2002, 36(10): 2589-2595.
- [74] TIERNEY J T, SULLIVAN R, LARKIN E P. Persistence of poliovirus 1 in soil and on vegetables grown in soil previously flooded with inoculated sewage sludge or effluent [J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1977, 33(1): 109-113.
- [75] 王秋英. 土壤中病毒的吸附行为及其环境效应 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 10-15. (责任编辑: 刘方)