城镇供水
CITY AND TOWN WATER SUPPLY

我国城市供水管网铁释放问题研究现状

李　礼[1,2]　李玉仙[1]　王　敏[1]　林爱武[1]　刘文君[2]
（1．北京市自来水集团有限责任公司技术研究院，北京 100192；2．清华大学，北京 100083）

摘要：我国关于管网铁释放问题的研究自2005年以来日渐蓬勃，已有不少较为深入的理论研究和控制对策的广泛应用。根据我国管网及供水特点，突变的水质参数与管垢特性是影响管网铁释放的主要因素，在水质参数方面的研究成果众多，一些成果已较好地解决了实际问题；少数研究则建立了铁释放的经验统计模型，并进行了模型的应用。此领域研究的问题是需进一步在管垢对水质的影响方面进行开拓，寻求能够表征这种影响的确切参数。

关键词：管网水质　铁释放　模型　水质稳定性　管垢

DOI:10.14143/j.cnki.czgs.2015.06.022

引言

饮用水水质安全问题一直是国内外水工业普遍关注的热点，随着城市经济的发展，区域性的水资源紧张问题凸显，因此有了较大规模的水资源开发利用，如远距离调水等，在实现了经济及社会效益的同时也为城市已有供水系统带来了一些问题，如管网铁释放现象的发生。由于城市管网的水源水质突变、水源频繁切换等带来了各种复杂的物理、化学和生物反应，致使原有管网内的管垢发生变化，管壁上铁大量溶出，用户端出现“黄水”现象，影响水质安全。

国内外的研究多集中在分析机理解释现象，也有尝试通过水质特征预测发生“黄水”的可能性。本文重点对我国国内的研究历史与现状做了总结与分析，并探讨了研究方向，以期更加深入的研究铁释放现象，为控制管网水质稳定性提供依据。

1. 城市供水管网”黄水”现状

1.1 国外”黄水”事件

对于管网铁释放带来的水质问题，国外普遍称为“红水”现象。例如1992年美国亚利桑那州图桑市引入科罗拉多河水取代当地的地下水源，水源切换后引发了较大规模的“黄水”现象。[23]

美国南加利福尼亚在北水南调过程中不同供水区域也出现过“黄水”问题，2003年由于地下水供水区域更换为北水南调工程的地表水，出现过”水土不服”而引起的“黄水”问题，控制方案采取水源勾兑和调节pH值的措施，“黄水”现象在持续2个月后逐渐消失。

1.2 国内“黄水”研究状况

相比于国外在本领域的研究，我国这方面开始得比较晚。2005~2006年我国对管网水质铁含量问题的研究首见报导，天津市自来水出现铁超标现象，牛璋彬等[1]开始对此问题有所关注。张晓健等[2]提出了管网铁稳定性问题为我国供水管网二次污染的主要问题。

2007年，由于滦河水源紧缺，天津市引入黄

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

河水源以缓解水资源短缺的现状，暂时替代原有的滦河水，“黄水”问题爆发。王洋等[3]研究了水源更换对管网水质的影响，牛璋彬等[4]提出了控制铁释放现象的理论临界铁释放速率。2008年的研究基本处在实验室的管网模拟阶段。

2008年底至2009年，河北水进京引发了北京市区局部地区的“黄水”事件，管网水中铁含量超标。事件发生后，有学者提出了用水质稳定性判别指数“拉森指数”[5]来分析“黄水”产生的原因，之后提出硫酸盐含量高是引发“黄水”的主要原因[6]。

2010年，石宝友等[7]开始对“黄水”产生的内在机理进行探讨。与此同时，刘扬[8]、迟海燕[9]的一些研究定位在海水淡化水水质对管网铁释放的研究，提出了一些铁释放的模型。对预测给水管网铁释放量具有一定的指导意义。

从2010年开始，此领域的研究大量开展，发展态势蓬勃。研究的目的都是为了找到管网铁释放的根本原因和影响因素，以期能够最终有效控制铁释放带来的管网二次污染，从而保障供水水质。本文对这段时期的研究成果做一综述。

2. 城市供水管网铁释放问题研究现状

2.1 管网铁释放影响因素

2.1.1 从水质理化指标角度的研究

用水质理化指标来分析判断铁释放的问题，是研究最多的领域，各种参数如pH、碱度、硬度、氯离子、硫酸根离子、溶解氧、水温、ORP、余氯等都有众多的研究，这些主要是影响效应与反应过程机理的探索。处于实验室小试中试规模。

主流结论有：

硫酸根浓度是最主要、最明显的一个影响因素。管垢中的铁释放速率与硫酸根的质量浓度明显正相关，硫酸根质量浓度越高，总铁释放量越大。[10]

较高的pH值和碱度能够抑制铁释放[11]。但碱度的影响不是一概而论的，在未造成明显的铁释放时，碱度的高低基本无影响，在已造成管垢铁释放的情况下，随着碱度的降低，铁的释放量明显增加。[12]

增加水中溶解氧浓度对铁释放具有明显抑制作用，但当溶解氧超过一定值时，其抑制作用降低。

适当调节进水余氯浓度可在一定程度上抑制铁释放，不同管垢特征对应的最佳余氯浓度不同。[13,14]

2.1.2 从管垢角度的研究

若要判别某种新水源进入管段后会不会引起铁释放，则要考虑原有管段中的管垢情况。不同的管垢特征会对管段铁释放程度有着不同的影响。因此，一部分学者着重研究了管垢的特征。

针对管垢的组成成分，研究大多使用电镜扫描方法观测管垢表面及内部的微观结构，进行成分分析、晶体结构的分析，研究成果较为一致，认为管垢主要成分含有 γ-FeOOH、α-FeOOH、$FeCO_3$、Fe_2O_3、Fe_3O_4 等.[6]

石宝友等[7]比较了发生过“黄水”和没有发生过“黄水”的管道腐蚀垢层成分发现，发生过“黄水”的管道存在较多的 β-FeOOH，但 Fe_3O_4 和 α-FeOOH 的含量较少；没有发生过“黄水”的管道以 Fe_3O_4 和 α-FeOOH 为主要成分。因此 Fe_3O_4 和 α-FeOOH 可能是形成管壁致密保护层的主要成分。

一些研究从感观上对管垢加以区分，如有的管垢呈瘤状，分布明显不均匀，管垢体现出密实状，并难以破坏，外部具有红褐色的圆滑表面，内部为黑色密实物质；而有的管垢则为均匀分布，厚度较铸铁薄，平均0.1 ~ 0.3cm，管垢较为松散，易于

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

城镇供水
CITY AND TOWN WATER SUPPLY

破坏，外部为红褐色凹凸面并散布细碎颗粒物，内部为松散黑色固体。

按管段历史水源水质可分为通地下水和地表水的管段，管垢有所区别，如白迪祺等[17]提出原通地下水的管段其 Fe_3O_4 和 α–FeOOH 的比例 M/G 值通常小于 0.5，而原通地表水的管道 M/G 值平均为 2.1。

2.1.3 从生物角度和水流状态角度的研究

从生物角度和水流状态角度来探讨铁释放相关规律的研究较少。一般认为，低余氯、低溶解氧的条件可促进硫酸盐还原菌的过量生长，通过微生物反应，加剧管材腐蚀程度，造成管网铁释放[22]。而管网水中的铁细菌数量和余氯值呈明显的负相关关系，与总铁及溶解性铁含量的相关性不明显，与颗粒性铁含量有一定的相关性。[18]

关于水流状态对铁释放的影响，研究普遍认为，水流停滞状态下，容易发生管网铁释放现象。随着水力停留时间的延长，铁化学腐蚀和腐蚀产物溶解反应会造成铁释放量的累积及铁化合物在管道中沉淀，水的 pH、碱度、溶解氧、余氯等各项指标下降，铁释放量增加程度明显；流速在一定范围内变化对铁释放影响不大，超出一定临界值后，流速变大则铁释放量随之变大。[19]

2.2 铁释放的水质参数模型

2.2.1 经验统计模型

研究多为经验统计模型，通过水质参数来计算铁释放量。选择影响因素的过程中没有考虑管垢参数值，若加入管垢参数来建立模型过于复杂，统计极为困难，因此，这些模型的提出没有考虑其他综合因素，仅根据水质指标来判断管网铁释放程度，具有一定的相关性，但较为片面。如全回归模型：

$$Fe=3.25\times10^{10}\frac{T^{0.101}\left[Cl^-\right]^{0.477}\left[SO_4^{2-}\right]^{0.691}HRT^{0.371}}{pH^{2.952}Alk^{0.051}Hardness^{5.458}}$$

和逐步回归模型：

$$Fe=1.04\times10^{13}\frac{HRT^{0.378}\left[Cl^-\right]^{0.495}\left[SO_4^{2-}\right]^{0.704}}{pH^{3.244}Hardness^{5.7}}$$

还有建立的动力学模型同样是基于水质参数的，如刘杨[8]选择了溶解氧、pH、碱度三个基于 siderite 的铁释放机理的参数模型：

$$d\left[Fe\right]=0.005\frac{\left(10^{-pH}\right)^{0.12}\left(\frac{0.946DO_0}{64}\right)}{\left(\frac{Alk}{100.1}\right)^{0.325}}dt$$

2.2.2 模型应用

目前研究的铁释放模型仅限于实验室管网试验，若要应用于实际管网仍有较大局限性。如迟海燕[9]提出，铁释放速率＜ 0.25mg/（m^2.h）为化学稳定性水质，铁释放速率≥ 0.25 mg/（m^2.h）则属于腐蚀性水质，释放速率越大，腐蚀性越大。其算式为：

$$VI=\frac{10^{0.4665}\left[Cl^-\right]^{0.1256}\left[SO_4^{2-}\right]^{0.369}}{Alk^{0.466}pH^{0.825}Hardness^{0.065}}$$

此判别指数只能计算 DN40 管材。

3. 探讨与展望

3.1 问题探讨

通过对主要研究结论的整理发现仍存在一些问题，下面进行几点探讨：

①铁释放模型在细节方面还存有一定的局限性，如各参数调节试验多为初始值的调整，而供水管网中发生的实际变化是维持一个相对恒定的水质条件不变。试验条件与真实条件的差异应在分析问题时加以考虑；

②试验结果多是浸泡过程中得到的，难以与水流状态相结合。考虑怎样结合水流流动给反应速度

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

带来的影响，也是有必要的；

③管垢特性的划分标准有待进一步研究，目前按管材（铸铁管、镀锌管）划分管垢特性过于笼统，应找出某种参数，来表征管垢对水质的影响。

3.2 展望

管垢与水质两者相辅相成，在管垢尚未形成时，不同的历史水源会导致形成不同质地的管垢，而已形成的管垢又会反过来影响现有水质。纵观目前的研究现状，大多是基于各城市实际的问题，研究已经形成的管垢对突变的水源的适应性，这之中含有多种类型的管垢应对突变的水源时的不同反应，但众多有关影响因素的结论仍没有很好的引入管垢特性不同带来的影响，也即这些结论是基于各种特定条件下的结论，还未形成能够解释“黄水”发生的统一规律，还不完整。

值得一提的是，将管垢分类的意识在现有研究中是逐渐出现的，比如一些研究有意识地区分了地下水和地表水形成的不同管垢[20,21]，直到2013年以后，这种把管垢区分对待来研究对水质影响的意图越来越明显，并已有一些定性的结论[13]。但对管垢特性还没有进一步的分类研究。而要想理清导致管网“黄水”发生的真正原因或影响因素，还需先对管垢特性有个清晰的认识。

因此笔者认为，本领域的研究还可以在管网水质与所形成管垢特性的关联性方面深入，即管段的历史水源水质条件会形成什么样特征的管垢，将管垢特性进行进一步归类，最终寻找到能够表征管垢给水质带来影响的特征参数。其中比较主要的方向如消毒剂种类对管垢形成的影响、水源种类（地下水、地表水、淡化海水等）对管垢形成的影响等。然后在其管垢各自的特征范围内进行水质影响因素的分析与铁释放模型的建立。在城市给水行业中面临管网铁释放的风险时，首先能对现有管网管垢特性作出评价，再去有针对性的提出理论，相信这样的研究将更高效地解决问题。

参考文献：

[1] 牛璋彬，王洋，张晓健，何文杰，韩宏大，阴沛军．某市给水管网中铁释放现象影响因素与控制对策分析[J]. 环境科学.2006，(02)：310～314.

[2] 张晓健，牛璋彬．给水管网中铁稳定性问题及其研究进展[J]. 中国给水排水.2006，22(2)：13～16.

[3] 王洋，牛璋彬，张晓健，陈超，何文杰，韩宏大．水源更换对给水管网水质的影响研究[J]. 环境科学.2007，(10)：2275～2279.

[4] 牛璋彬，王洋，张晓健，陈超，王生辉．给水管网中铁释放现象的影响因素研究[J]. 环境科学.2007，(10)：2270～2274.

[5] 王洋．给水管网铁稳定性特性及控制技术研究[D]. 清华大学，2009.

[6] 王洋，张晓健，陈超，潘安君，徐扬，廖平安，张素霞，顾军农．水源切换引起给水管网”黄水”问题原因分析[J]. 环境科学.2009，(12)：3555～3561.

[7] 石宝友，李涛，顾军农，胡学香，李嘉铭，王东升．北方某市水源更换过程中管网”黄水”产生机制的探讨[J]. 供水技术.2010，4(4)：12～15.

[8] 刘扬．水质变化对腐蚀管段中铁释放的影响[D]. 天津大学，2010.

[9] 迟海燕．非传统水源供水管网水质模型的研究[D]. 天津大学，2010.

[10] 米子龙，张晓健，陆品品，陈超，汪隽，顾军农．硫酸根浓度突变对给水管网铁释放的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版).2013，(05)：660～664.

[11] 米子龙，张晓健，王洋，陈超，顾军农．调节pH值和碱度对给水管网铁释放的控制作用[J]. 中国给水排水.2012，(13)：43～46.

[12] 米子龙，张晓健，陈超，陆品品，汪隽，顾军农．硫酸根和碱度变化对管网铁释放的影响[J]. 中国给水排水.2012，(01)：31～34.

[13] 孙慧芳，石宝友，吴永丽，顾军农，李玉仙，王东升．硫酸根、溶解氧和余氯对管垢铁释放的影响[J]. 中国给水排水.2013，29(22)：58～63.

[14] 王东升鲁智礼王刚亮石宝友孙慧芳徐硕顾军农李玉仙．消毒剂和溶解氧对管网铁释放影响的中试研究[J]. 环境工程学报.2014，8(4)：1410～1416.

（下转第67页）

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

GIS 应用不能仅仅局限于空间数据库和属性数据库的管理层面，更应该趋向于实现数据共享和不同系统之间的无缝对接与集成，这样才能更有效地发挥 GIS 的管理功效。

目前余姚市二水司供水管网 GIS 系统，对内具有与营业收费系统、管网监控系统、客服热线服务系统、办公自动化系统、仓储管理系统、档案管理系统的交互接口，有效地实现了不同系统之间数据共享和现代化营业所管理；对外顺应“智慧城市”建设的需要，逐步开展与数字城市地理空间框架、天地图平台的有效搭接，实现更开放、更大区域的数据共享和信息获取，发挥系统资源对整个社会的数据共享和信息服务。

5. 主要结论

通过上述分析，可得到如下主要结论：

（1）余姚市二水司管理范围较大，区域管道繁杂，建立供水管网信息系统对于科学管理管网资料和提高工作效率具有重要作用。

（2）简要分析了区域供水管网信息系统的架构及主要功能模块。

（3）着重分析了建立余姚市二水司管网信息系统所需的主要数据及数据获取方式，并对其中的注意事项进行了介绍。

（4）统一数据格式是建立管网信息的必要条件，数据采集应遵循规定的数据标准和数据格式，减少误输入率，提高数据库建设效率。

（5）系统功能的应用和开发必须建立在准确且具有标准化格式的数据基础之上，如果没有准确的管线数据和完善的空间图纸资料，系统的功能与应用将难以发挥其应有的功效。

参考文献：

[1] 周有德 .GIS 在沪北供水管网管理中的应用 [J]. 净水技术 .2012，31（4）：144 ~ 147

[2] 杨骥，林继贤，周志刚 . 广州市供水管网地理信息系统数据标准的研究与编制 [J]. 测绘通报 .2011 年第 7 期：82 ~ 84

[3] 朱新雨，殷国华，雷鸣，侯红松 . 浅谈城市地下管网 GIS 建设与应用——以驻马店为例 [J]. 中国科技信息 .2008 年第 1 期：162 ~ 163

[4] 邝诺，王欢欢，李骥 . 北京城市排水管网管理系统的设计与应用 [J]. 中国给水排水 . 2011，27（8）：71 ~ 73

[5] CJJ61-2003. 城市地下管线探测技术规程

作者通联：15867321062

（上接第 78 页）

[15] 牛璋彬，王洋，张晓健，何文杰，韩宏大，阴沛军 . 给水管网中管内壁腐蚀管垢特征分析 [J]. 环境科学 .2006，（06）：1150 ~ 1154.

[16] 黄纯凯，赵鹏，张宏伟，田一梅 . 给水管道腐蚀管垢的特征分析 [J]. 给水排水 .2011，（09）：155 ~ 159.

[17] 白迪祺，李玉仙，王敏，顾军农，石宝友，胡春 . 水源切换条件下管网发生“黄水”的预测与控制措施 [R]. 中国浙江宁波：2012.

[18] 王洋，牛璋彬，张晓健，王生辉 . 某市给水管网铁细菌生长特征调查 [J]. 中国给水排水 . 2007，（01）：34 ~ 37.

[19] 谭浩强，何文杰，韩宏大，李荣光，戴雪峰，尚修竹 . 水力条件对供水管网铁释放的影响研究 [J]. 中国给水排水 .2014，（03）：56 ~ 58.

[20] 鲁智礼，徐硕，石宝友，顾军农，杨帆，孙慧芳，曹楠，王东升 . 水源切换对管网铁释放影响的中试模拟研究 [J]. 给水排水 .2013，（05）：146 ~ 150.

[21] 杨帆，石宝友，王东升，顾军农，曹楠 . 水质化学组分变化对管道铁释放及管垢特征的影响 [J]. 中国给水排水 .2012，28（23）：59 ~ 64.

[22] 许保玖 . 给水处理理论 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.

[23] Reiber，Poulsom，Perry，et al.A generalframework for corrosion control based on utility experience[R].Denver: AWWA Research Foundation，1997.

作者通联：13146946071

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net