

给水深度处理及饮用水安全保障技术交流会

湖北 武汉 2013年6月21-23日

南水北调水源切换对北方受水区供水管网水质影响的分析

石宝友 博士 副研究员

中国科学院生态环境研究中心
环境水质学国家重点实验室



研究背景：南水北调：水质问题？



中线受水区人口1.57亿人，其中北京市1972万人、天津市1115万人、河北省5172万人、河南省6440万人

南水北调路线图



丹江口水库

引水渠和涵洞

水处理工艺

出厂水

输配系统二次污染

外源污染物入侵

管网内微生物生长

管网运行条件

水源水质差异及处理
工艺导致的出厂水水质
变化

腐蚀产物释放

输配系统

干管, 支管, 储水箱, 户内管...



用户端水质

色度、浊度升高, 微生物超标 (致病菌风险
重金属...)



管网水质。。

供水管网中的水质转化过程与控制技术：直接影响饮用水安全



管道腐蚀严重：
腐蚀产物释放进入水中



管壁生物膜大量附着：
微生物脱落进入水中



管网水质事件多发：
影响供水安全

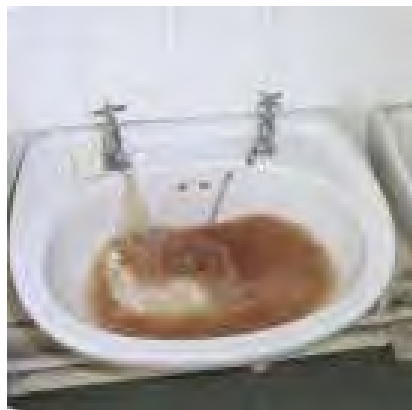
管网腐蚀引发的问题

□ 爆管率升高、漏损率增加、输水能力下降



□ 色度、浊度和异嗅味

□ 重金属 (Cu, Pb, As) 致病菌

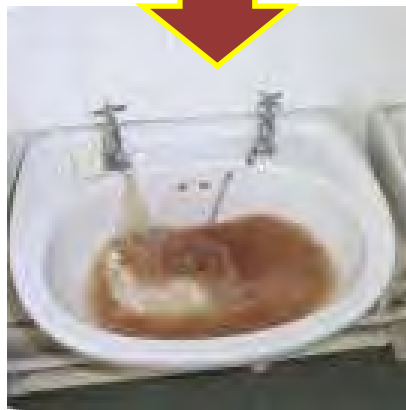


水源变化导致的管网水质问题

水质化学成分不同



平衡打破



龙头水质恶化

水源切换引发管网“黄水”的案例

Tucson USA, 1992

imported Colorado River water as a replacement for heavily used groundwater resources

Tampa, USA. 2000

High TDS water(sulfate, chloride);AWWA-Research Foundation Project:Surface water, desalination water to replace groundwater

Beijing China, 2008

imported reservoir water from neighboring Hebei province to partly replace local surface water and groundwater.

Taiyuan, Datong, Tianjin, Shaoxing, China;

Israel;

... ..

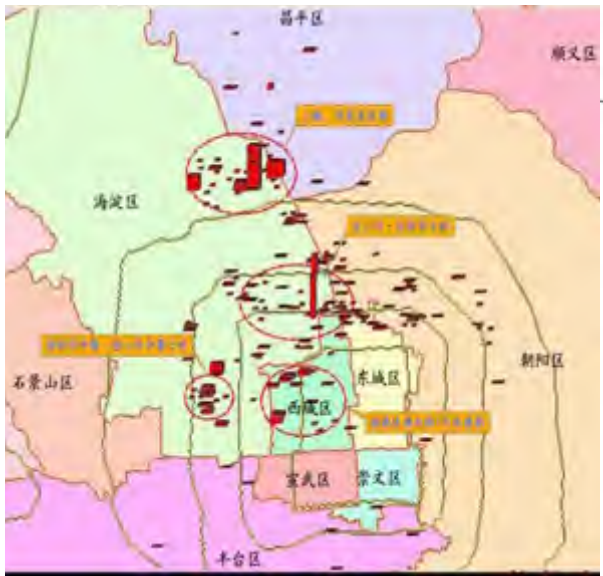
研究目标

- 水源切换下的管网黄水发生机制
- 评估南水北调水源对受水区管网水质的影响
- 预防和控制水源切换后的管网水质恶化的方案

管网黄水的主要方面: 水质化学特征和管垢特征

水质: 拉森指数

$$LR = \frac{[Cl^-] + 2[SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-]}$$



黄水的分布



管龄分布

Heavy red water occurred in groundwater service area;

Old cast iron pipes and galvanized pipes;



敏感区域

供水管网铁腐蚀产物结构特征研究

试验管道挖取、管壁腐蚀产物采集及其分析方法

实验管挖掘切割



腐蚀产物清理采集



❖ 管垢分析方法：

- X射线衍射 (XRD)
- 比表面、孔容孔径分析
- X 荧光光谱分析 (XRF)
- 扫描电镜-X射线能谱分析 (SEM- EDX)
- 无定形铁-DCB 提取法
- 总铁-微波消解
- 固体总有机碳

Cast iron pipe samples collection from Beijing DWDS



央视新址



翠微中里



翠微中里

花园小区
花楼区



马甸镀锌



马甸铸铁



马甸
铸铁

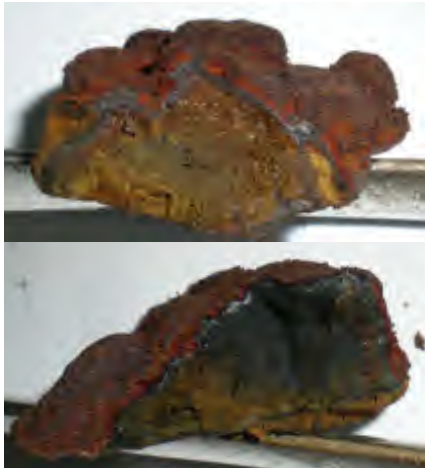


腐蚀产物宏观形貌

类型1:

瘤状垢或瘤状垢连生形成整体连续厚腐蚀层, 平均厚度 10-20 mm

多见于通地表水管网



类型2:

表面薄腐蚀垢层几毫米或者不足1毫米

多见于通地下水管网



类型3:

中空壳垢(直径: $\leq 2.5\text{cm}$)

仅见于通地下水管段

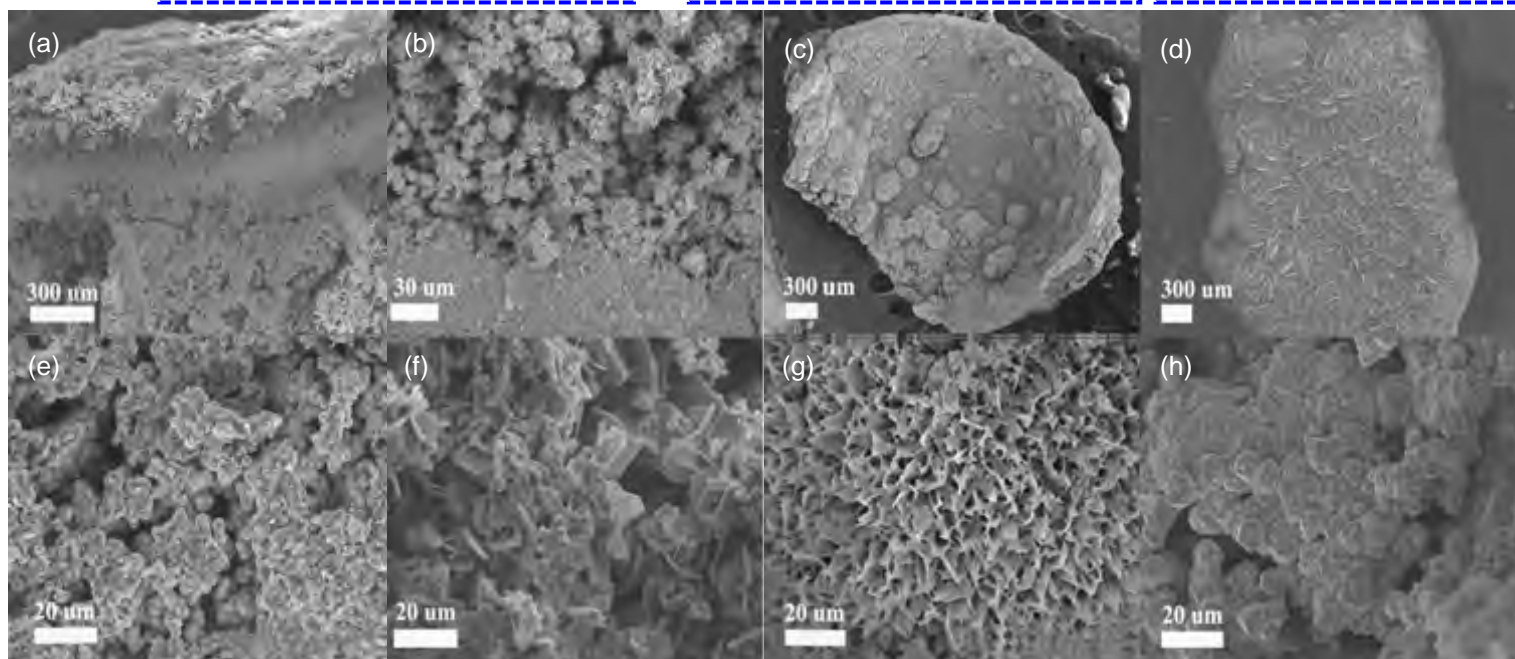


具不同通水历史管段腐蚀产物SEM/EDX图

a, b: 类型1典型分层结构

c: 类型2中空壳垢内视图

d: 类型3表面薄层内视图

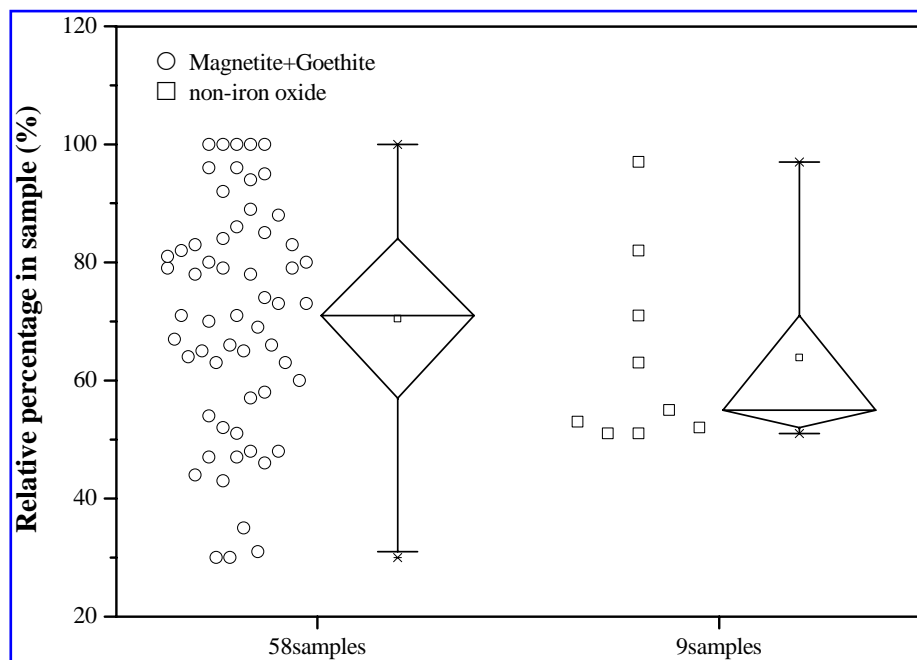


e、f: 分别为a、b多孔疏松层放大图

g、h: 分别为c、d局部放大图

结合样品XRD定量分析结果，EDX分析和铁矿物晶体形态确定成分

管段腐蚀产物晶态物质组成

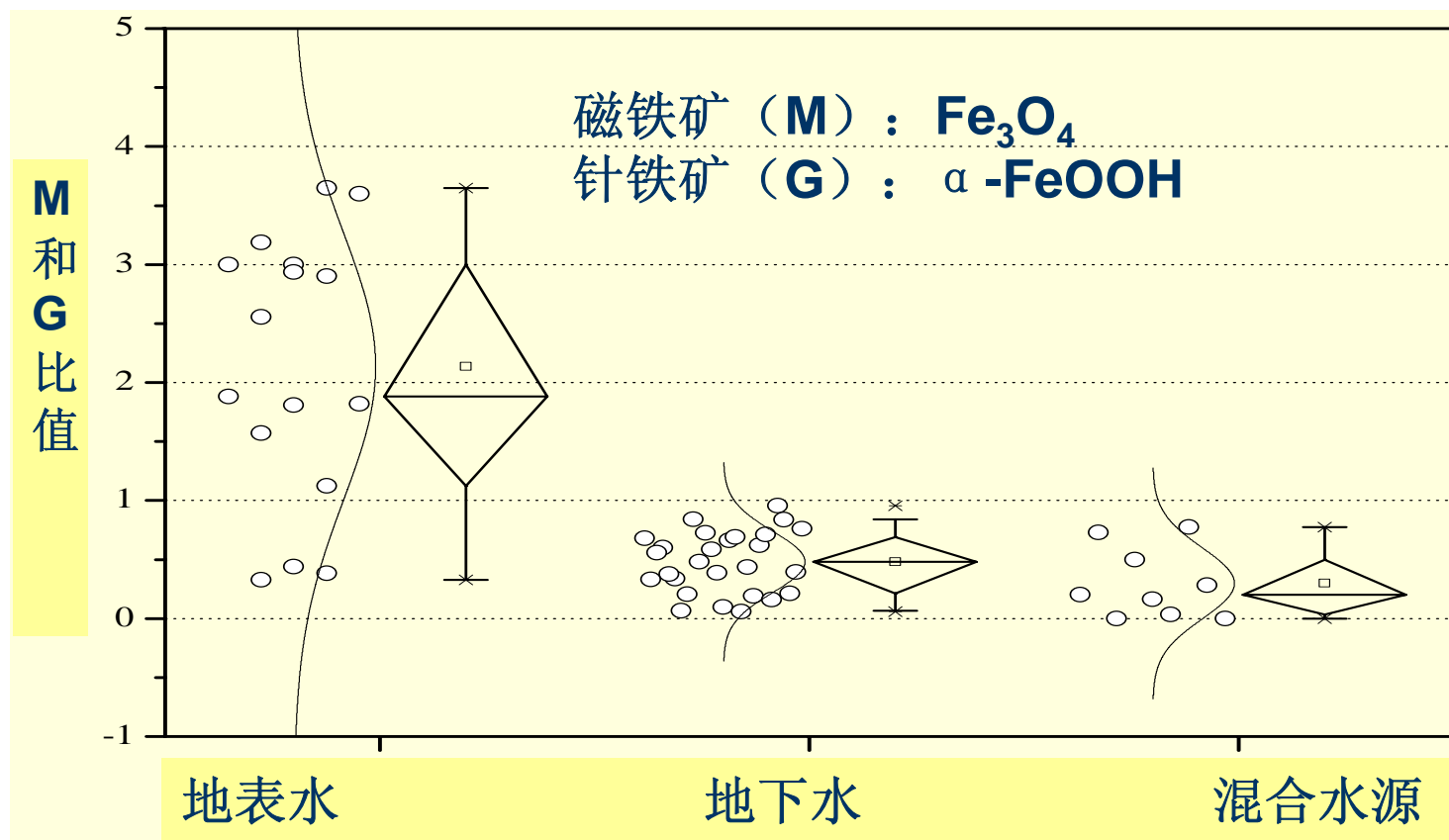


磁铁矿 (Fe_3O_4)，针铁矿 ($\alpha\text{-FeOOH}$)
主要晶体铁氧化物

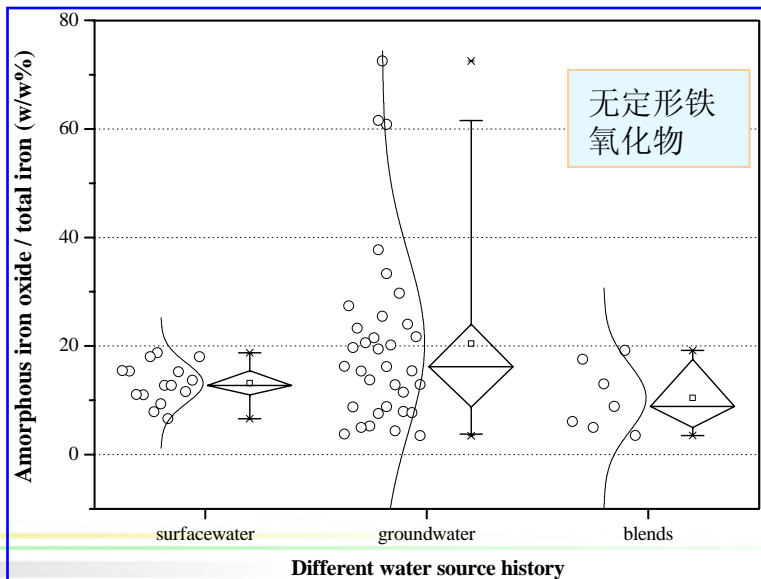
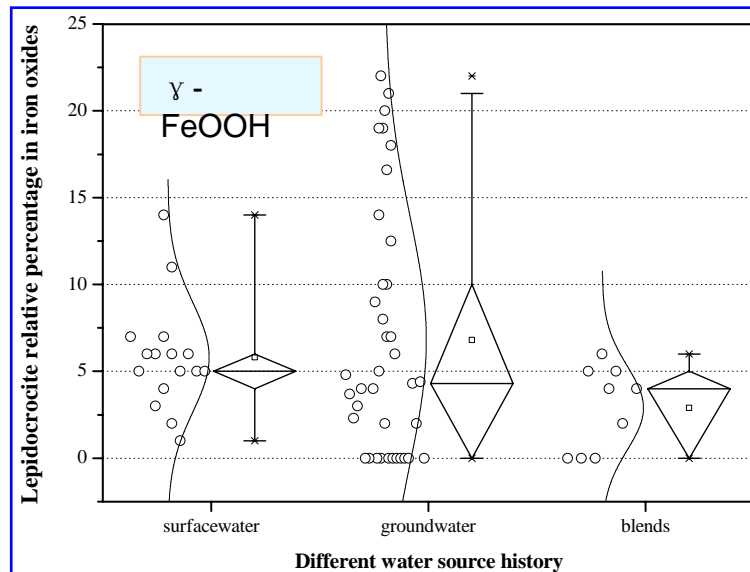
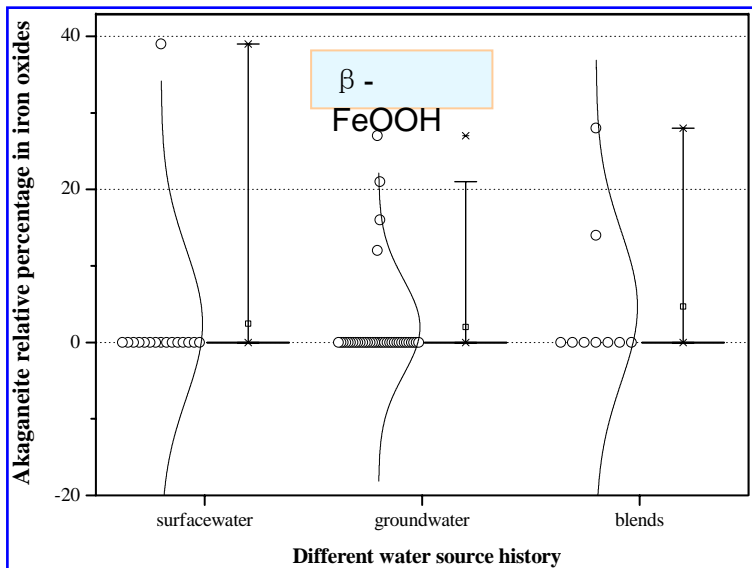
纤铁矿 ($\gamma\text{-FeOOH}$)
菱铁矿 (FeCO_3)
绿锈 ($\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$)
赤铁矿 (Fe_2O_3)
四方纤铁矿 ($\beta\text{-FeOOH}$)
羧基碳酸亚铁 ($\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
铁镍矾 ($\text{Ni}_6\text{Fe}_2^{+3}(\text{SO}_4)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
等含量随着其通水水质不同变化不一。

石英 (SiO_2)
方解石 (CaCO_3)
钠长石 ($(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$)
微斜长石 ($\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$)
石膏 ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 等

管垢组成的XRD统计分析



- ❖ 磁铁矿/针铁矿(M/G)大于1的管垢样品大多分布在历史水源为地表水的管段，小于1的管垢样品大多分布在历史水源为地下水、混合水源的管段。M/G是腐蚀程度和管垢生长程度的标志。地表水的管段腐蚀层很厚，腐蚀程度高。



地下水管段腐蚀程度低。
 γ -FeOOH, β -FeOOH和无定形铁氧化物
 含量高样品多存在于历史水源为地下水管
 段。

管壁生物膜对腐蚀管垢形成的影响

管壁生物膜群落结构特征调查

❖ 对北京不同通水水源的供水管网中的管壁微生物进行了分析。

➤ A: 通地表水源

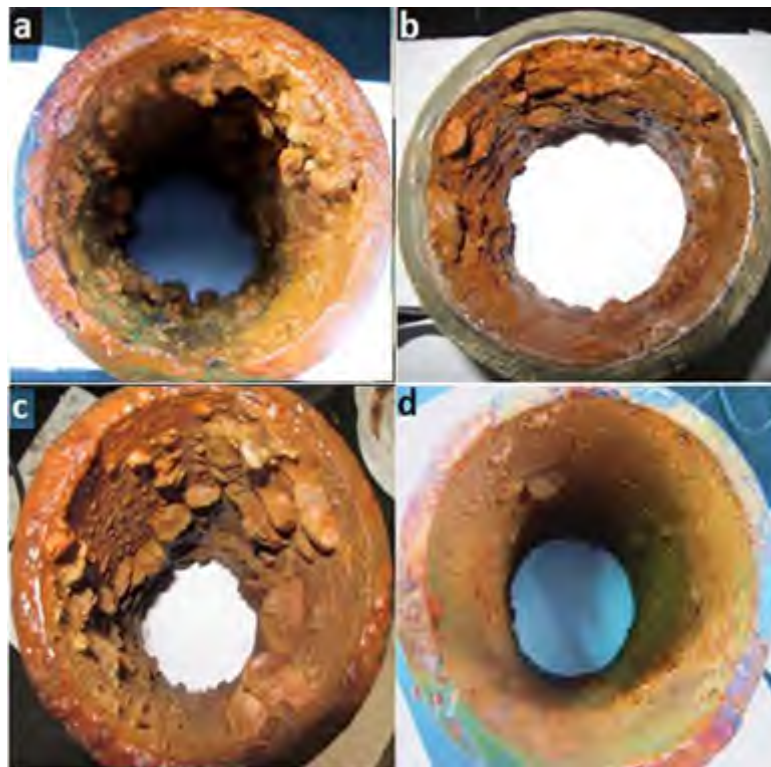
管垢: category 1

➤ B, C: 通混合水源

管垢: category 1

➤ D: 通地下水源

管垢: category 2

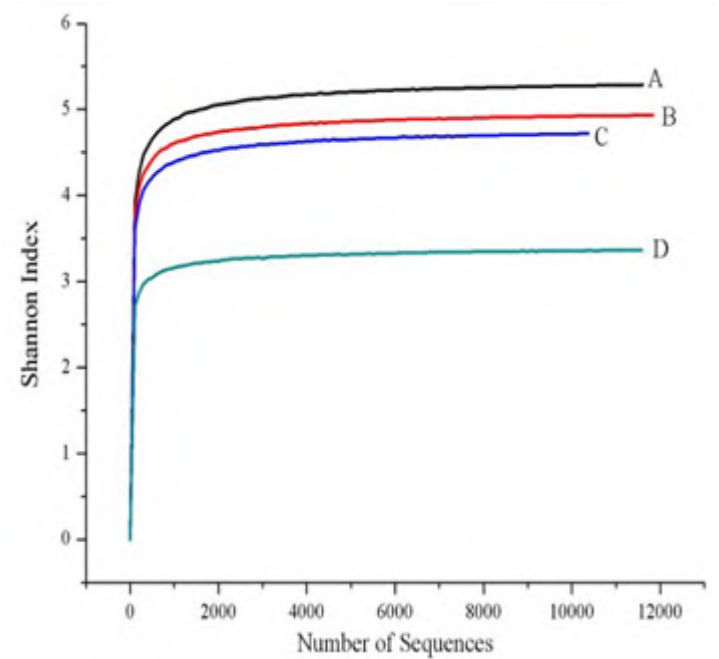
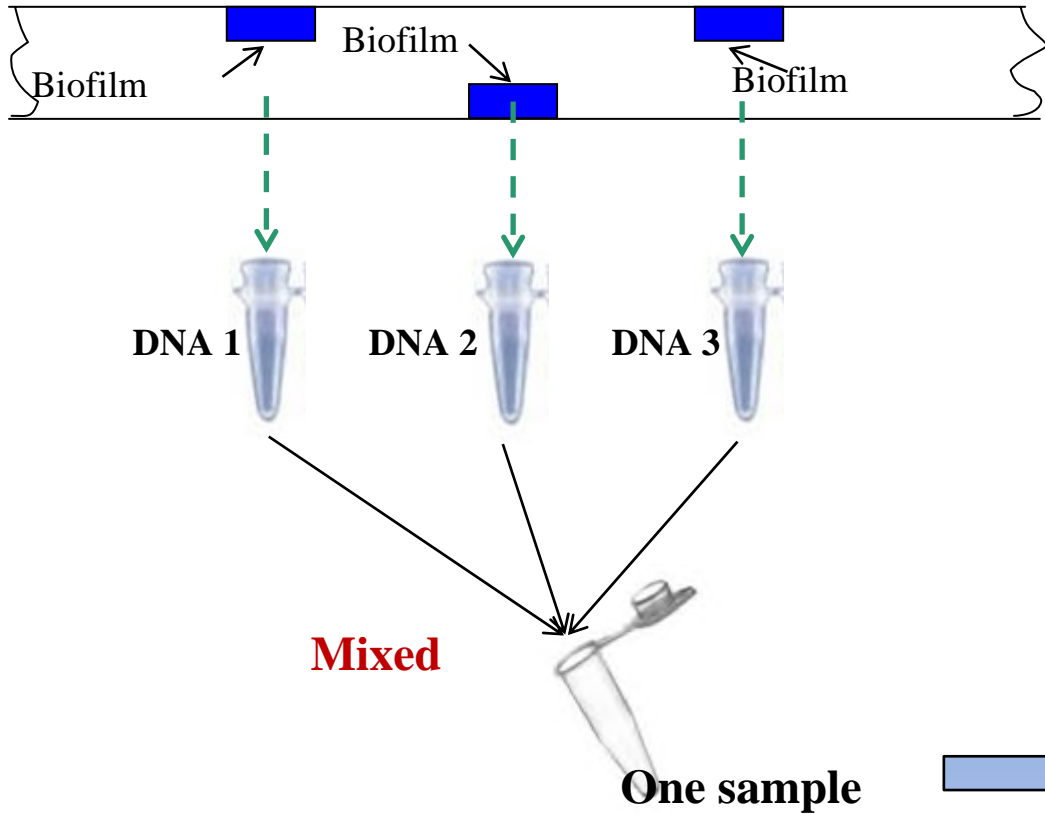


管壁腐蚀产物形貌



管壁生物膜群落结构特征调查

❖ 样品采集、测序



454

pyrosequencing



❖ 生物多样性指数分析

Sample	Reads	0.03(defined at 97% gene similarity)					
		OTU	Ace	Chao 1	Coverage	Shannon	Simpson
A	11601	1175	2091	1849	0.958452	5.29	0.0184
B	11843	1001	1879	1607	0.963580	4.93	0.0234
C	10369	1004	2532	1828	0.951201	4.72	0.0333
D	11582	642	1636	1166	0.972285	3.36	0.0975

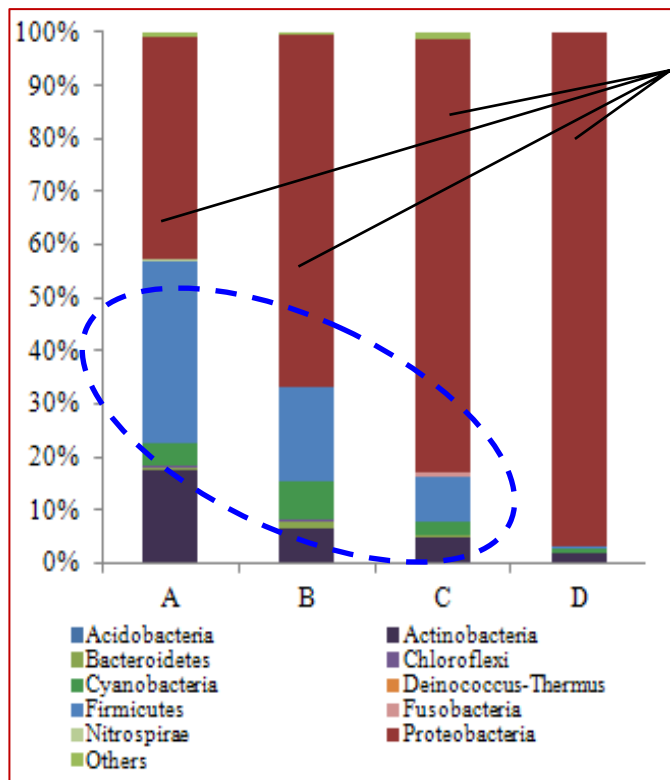
Ace, Chao 1, Shannon: A, B, C > D; Simpson: A, B, C < D

结果表明：Sample D的生物多样性最低，说明与地表水源、混合水源相比，地下水水源具有较好的生物稳定性。

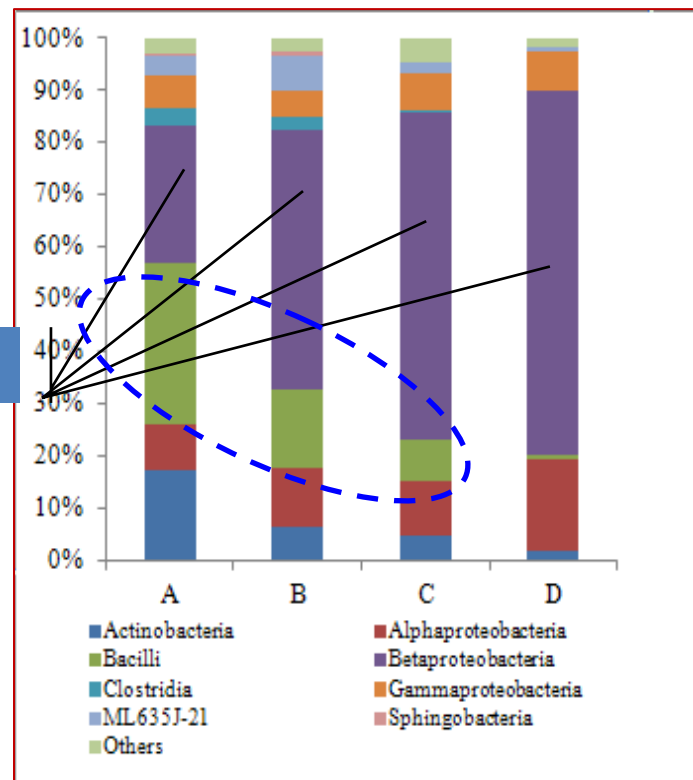


管壁生物膜群落结构特征调查

❖ 生物群落结构分析



In phylum level



In Class level

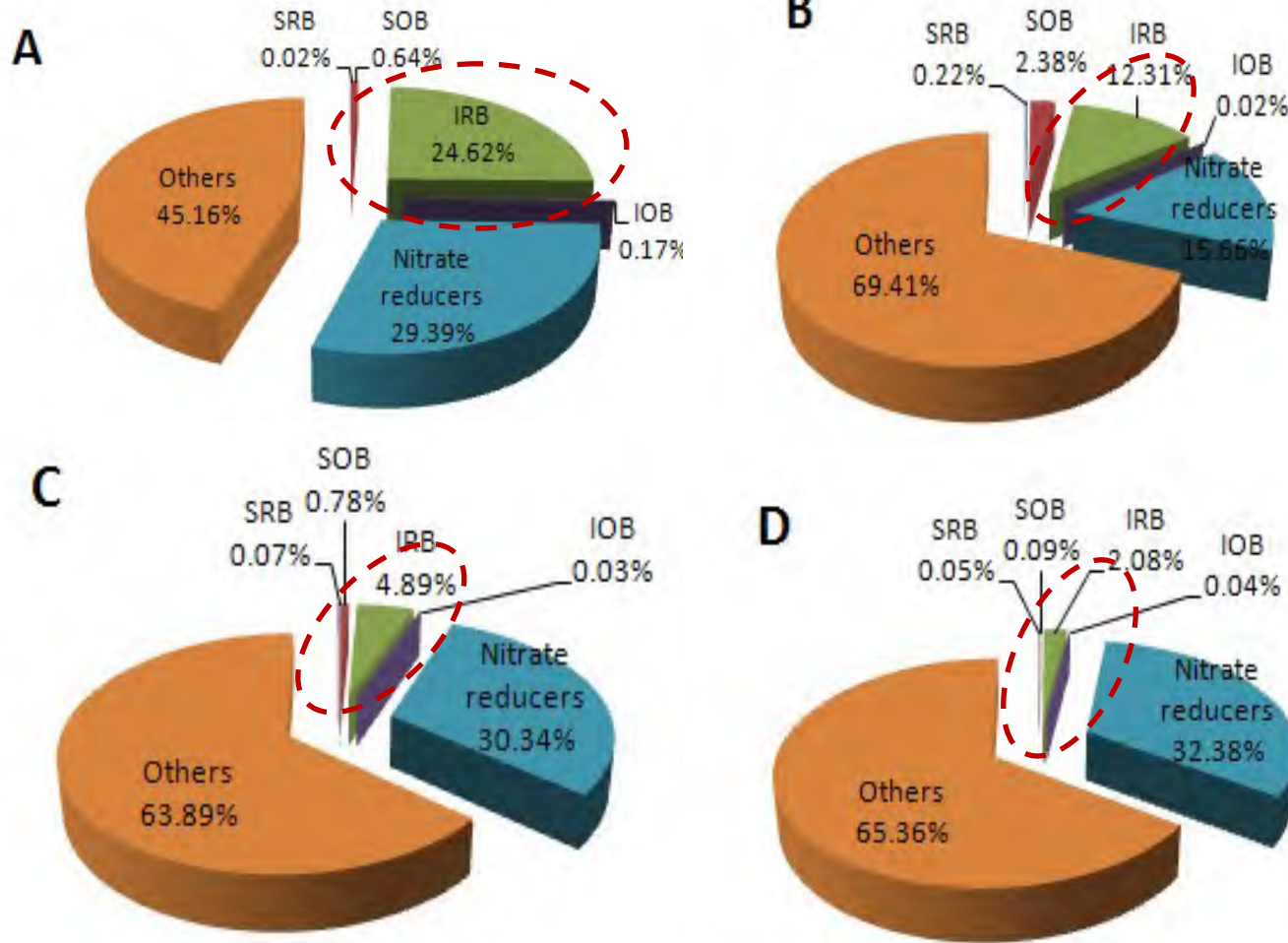
Proteobacteria 是所以生物样品中最重要的生物种群, 主要包括*Betaproteobacteria*; 此外, *Alphaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria* 也在所以样品中均检测到。

Firmicutes (Bacilli) : A, B, C > D



管壁生物膜群落结构特征调查

❖ 腐蚀菌的含量组成分析



IRB:
A: 24.62%
B: 12.31%
C: 4.89%
D: 2.08%



❖ IRB

主要包括 *Bacillus* (and *Pseudomonas* sp. , *Clostridium* sp. *Escherichia coli*.)

Bacillus: (belonged to *Firmicutes* and *Bacilli*)

能够将Fe(III)还原为Fe(II);

是能够产生粘液的腐生菌，并且能够产生大量的EPS;

能够抑制二价铁从腐蚀产物中释放出来。

地表水源

19.45%



混合水源

9.03% 2.32%



地下水源

0.1%



Category I Four-layered thick corrosion scale or tubercle

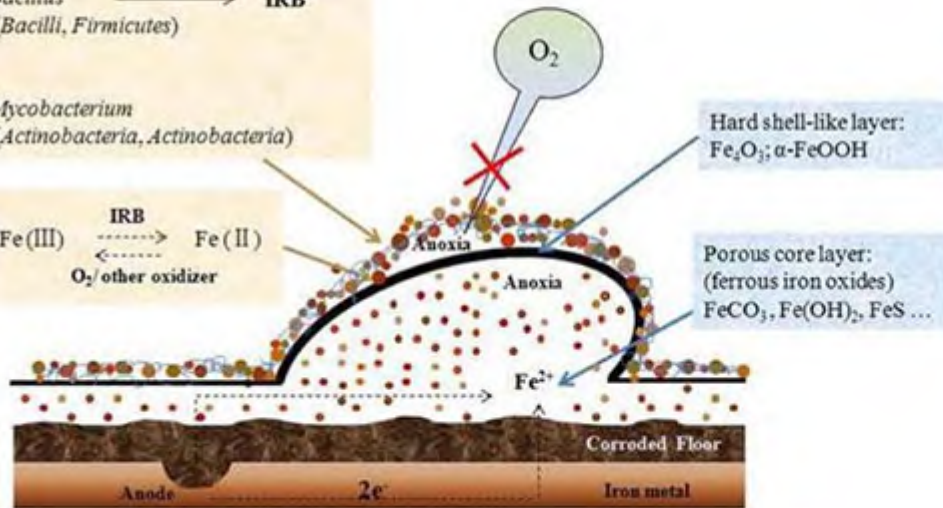
Biofilm (main groups):

Burkholderia
Delftia
Ralstonia } *Betaproteobacteria*
(*Proteobacteria*)

Bacillus → IRB
(*Bacilli*, *Firmicutes*)

Mycobacterium
(*Actinobacteria*, *Actinobacteria*)

Fe(III) $\xrightleftharpoons{\text{IRB}}$ Fe(II)
 $\xleftarrow{\text{O}_2/\text{other oxidizer}}$



Surface water sources

- Lower alkalinity
- Higher oxidation potential
- Higher chloride/sulfate
- Higher microbial nutrients
- Higher bacterial diversity

Category II Thin scale & no hard-shell layer

Biofilm (main groups):

Burkholderia
Delftia
Ochrobacterum } *Betaproteobacteria*
(*Proteobacteria*)

Thin corrosion scale:
 γ -FeOOH;
 β -FeOOH;
amorphous iron oxides...



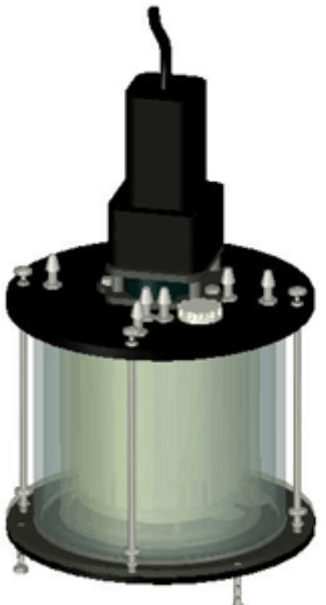
Groundwater sources

- Higher alkalinity
- Lower oxidation potential
- Lower chloride/sulfate
- Lower microbial nutrients
- Lower bacterial diversity



水源变化条件下的管垢稳定性

Annular Reactor



Pipe loop set-up



Pipe section reactor



Pilot DWDS facility

硫酸根对铁释放的影响

Pipe loop set-up



- ❖ simulate actual flow mode and household use
- ❖ hydraulic retention time in cast-iron pipes: 16 h
Then 8 h stagnation
- ❖ flow velocity: 0.1 m s^{-1}
- ❖ $21 \pm 1^\circ \text{ C}$ (cooling device)

Pipe loop 1 :thick corrosion scales,
with compact layer

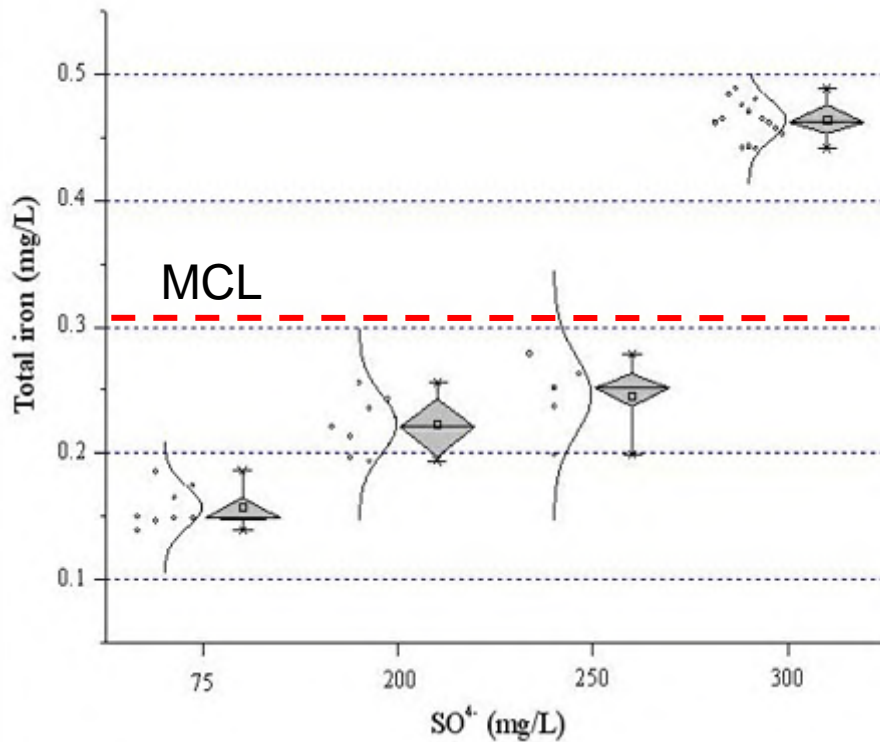
Pipe loop 2 :thin corrosion scales,
without compact layer



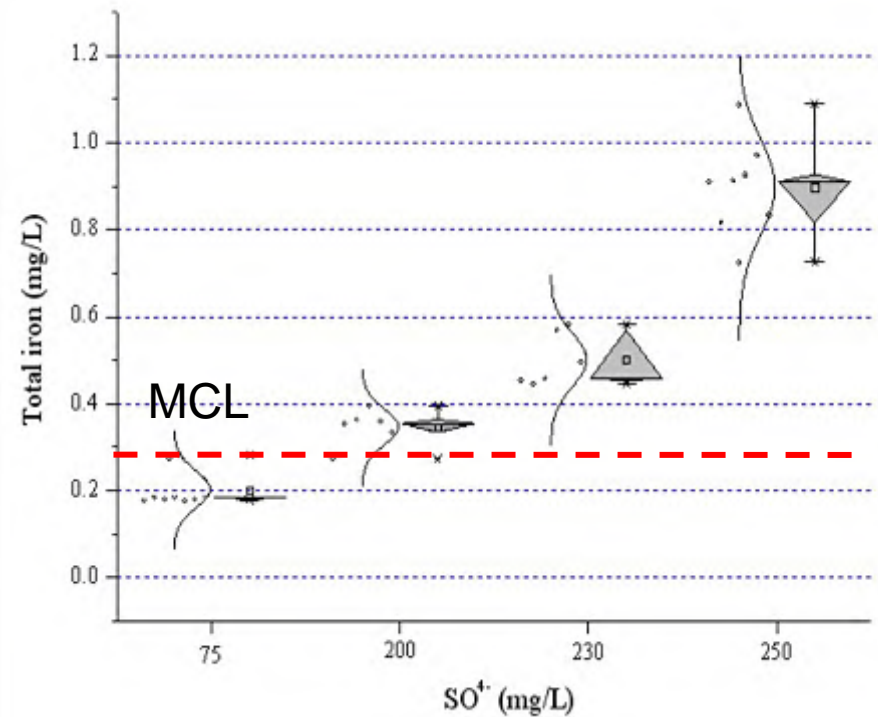
Pipe loop 1



Pipe loop 2



Pipe loop 1: with compact layer



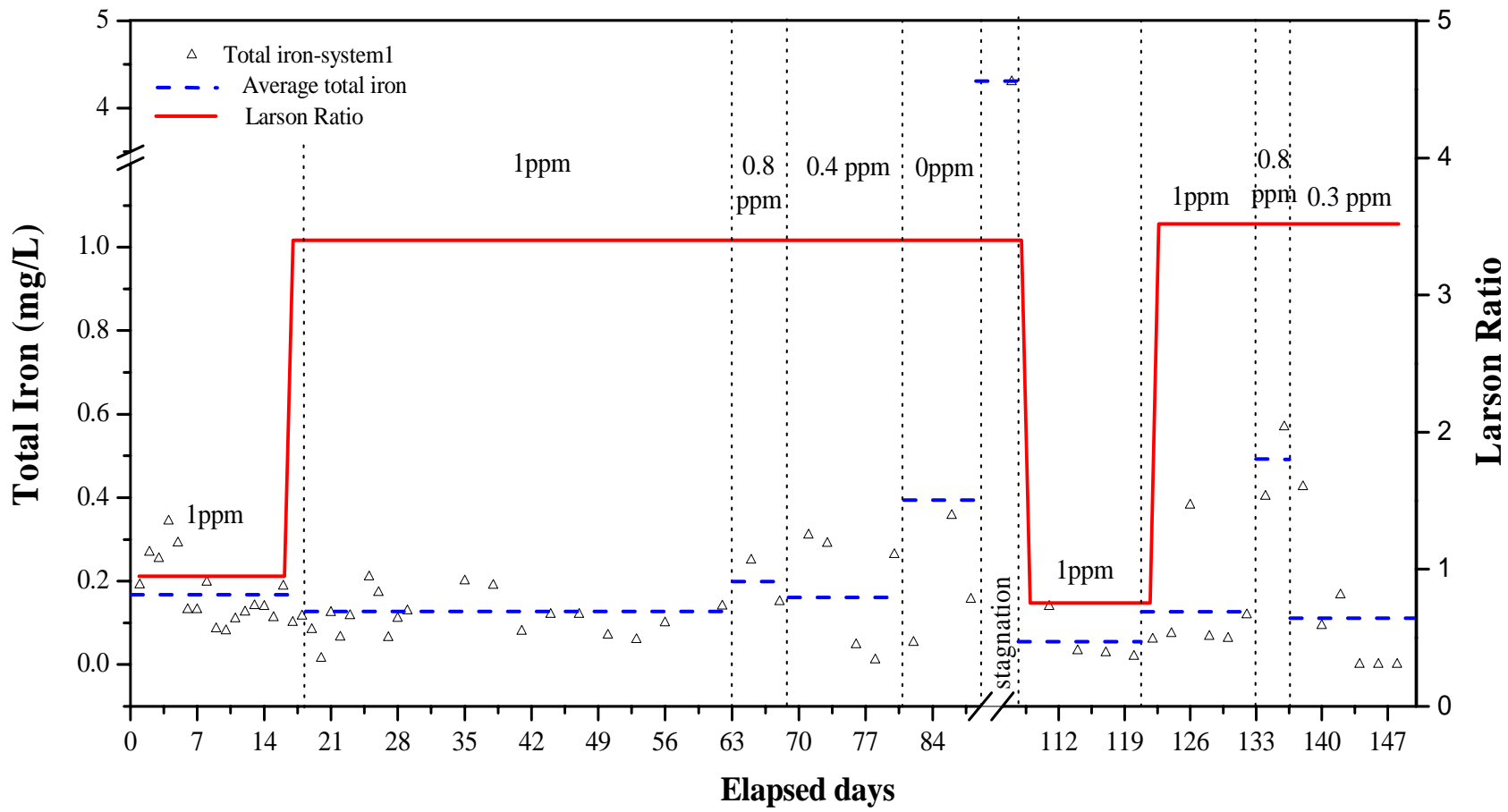
Pipe loop 2: without compact layer

Increasing the sulfate concentration could increase the iron release.

Pipes with compact layer : iron release was not increased evidently until $\text{SO}_4^{2-} \geq 300\text{mg/L}$;

Pipes without compact layer: iron release showed significant positive correlation with sulfate.

拉森指数对具有致密管垢层的管道铁释放的影响



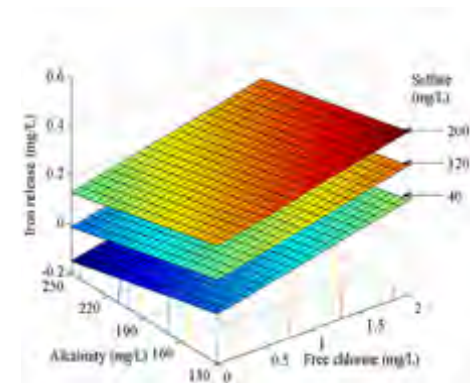
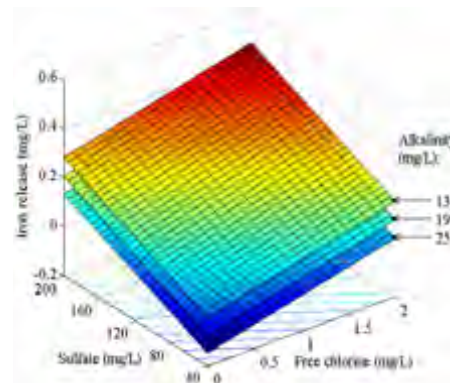
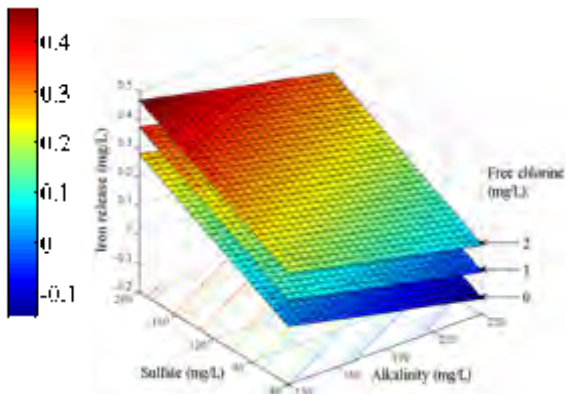
Iron release had no significant correlation with sulfate (Larson Ratio)

碱度、余氯浓度对铁释放的影响

Pipe section reactor



Alkalinity: Increase of alkalinity could reduce iron release;
Chlorine residual: Increase of chlorine residual could promote the stabilization of corrosion.



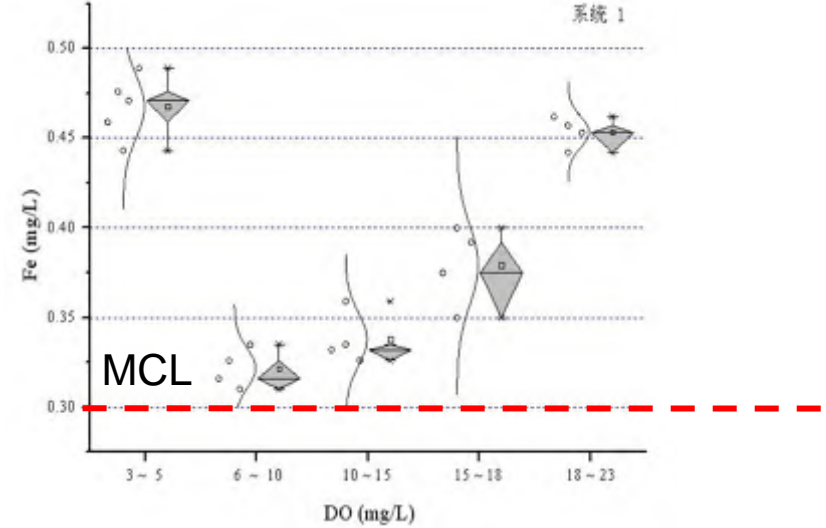
溶解氧对铁释放的影响

Pipe loop set-up

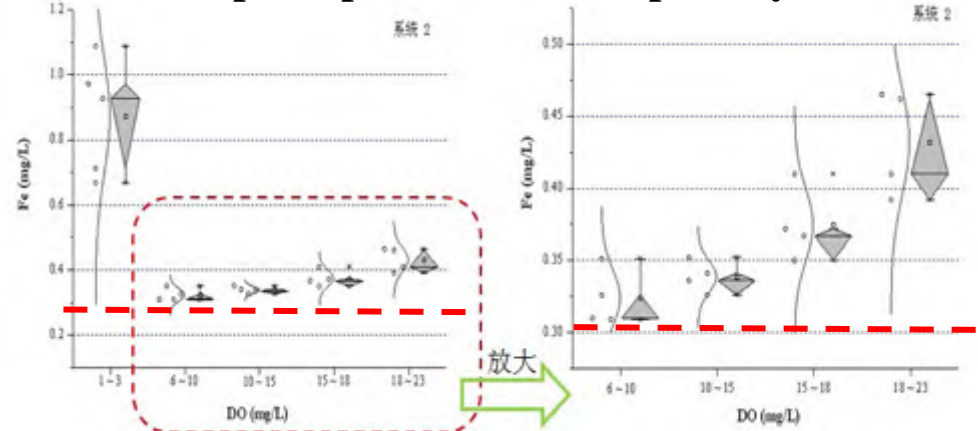


DO: Increased DO level could substantially reduce iron release; however, extreme DO could trigger elevated iron release.

Pipe loop 1: with compact layer



Pipe loop 2: without compact layer

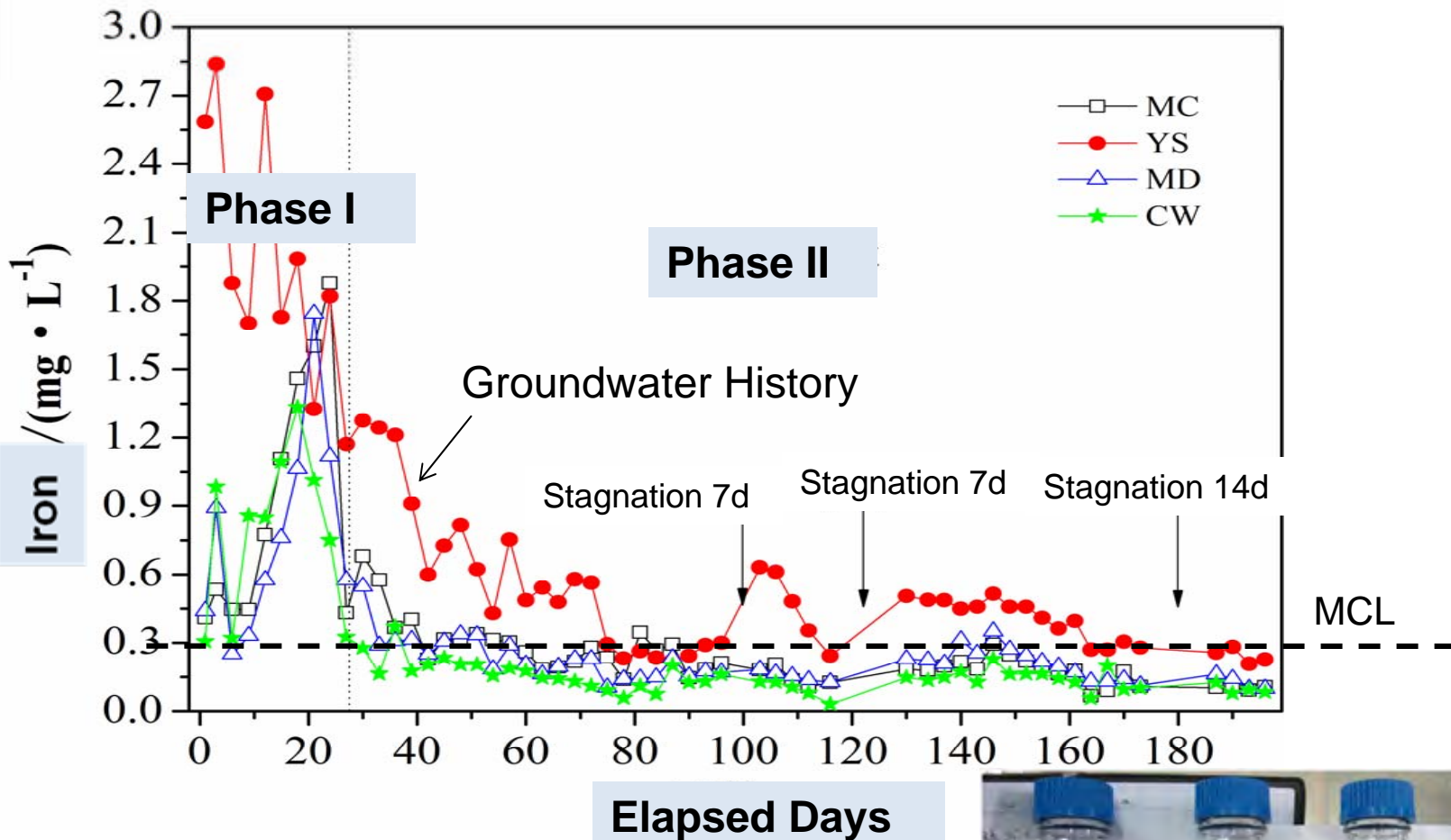


丹江口中试基地管网运行

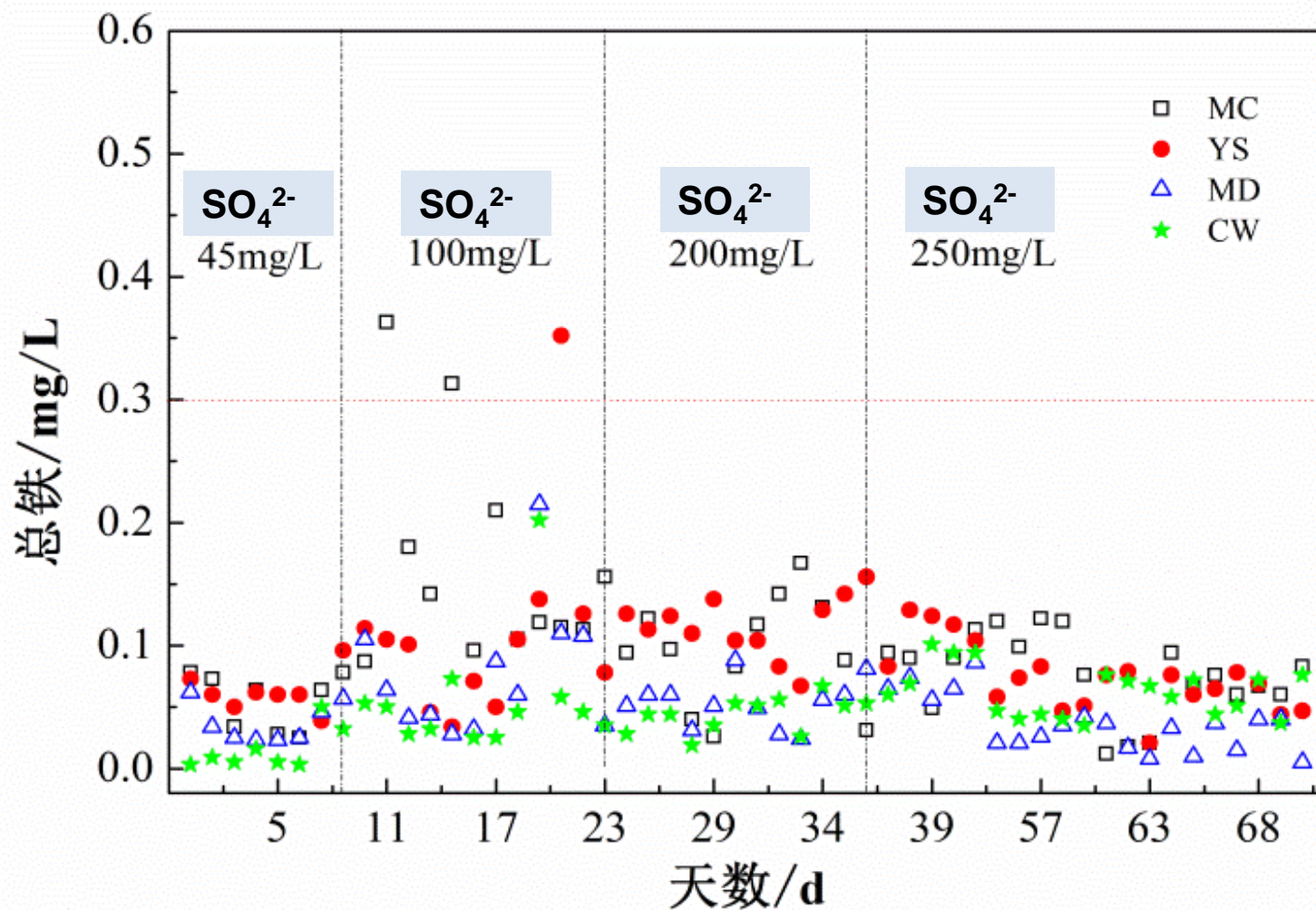


管道取自北京在役管网；管道取自不同供水区域；可同时运行四套系统，每套30m长；可模拟实际管网水力条件；实现了北京管道与丹江口水源的对接实验

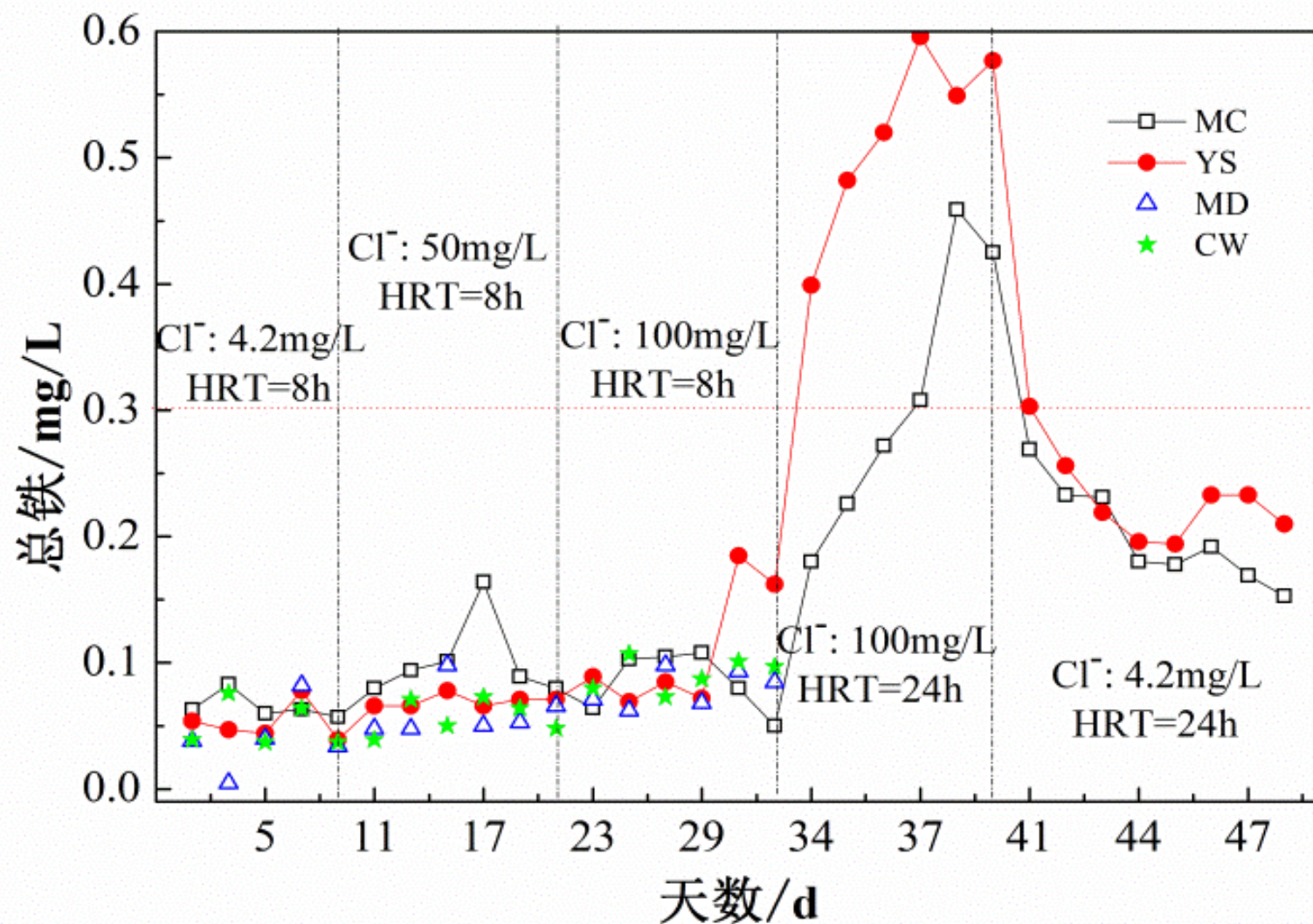
不同供水历史管道对水源切换的响应



硫酸根变化影响



氯离子浓度变化的影响



河北水源与北京水源比较:

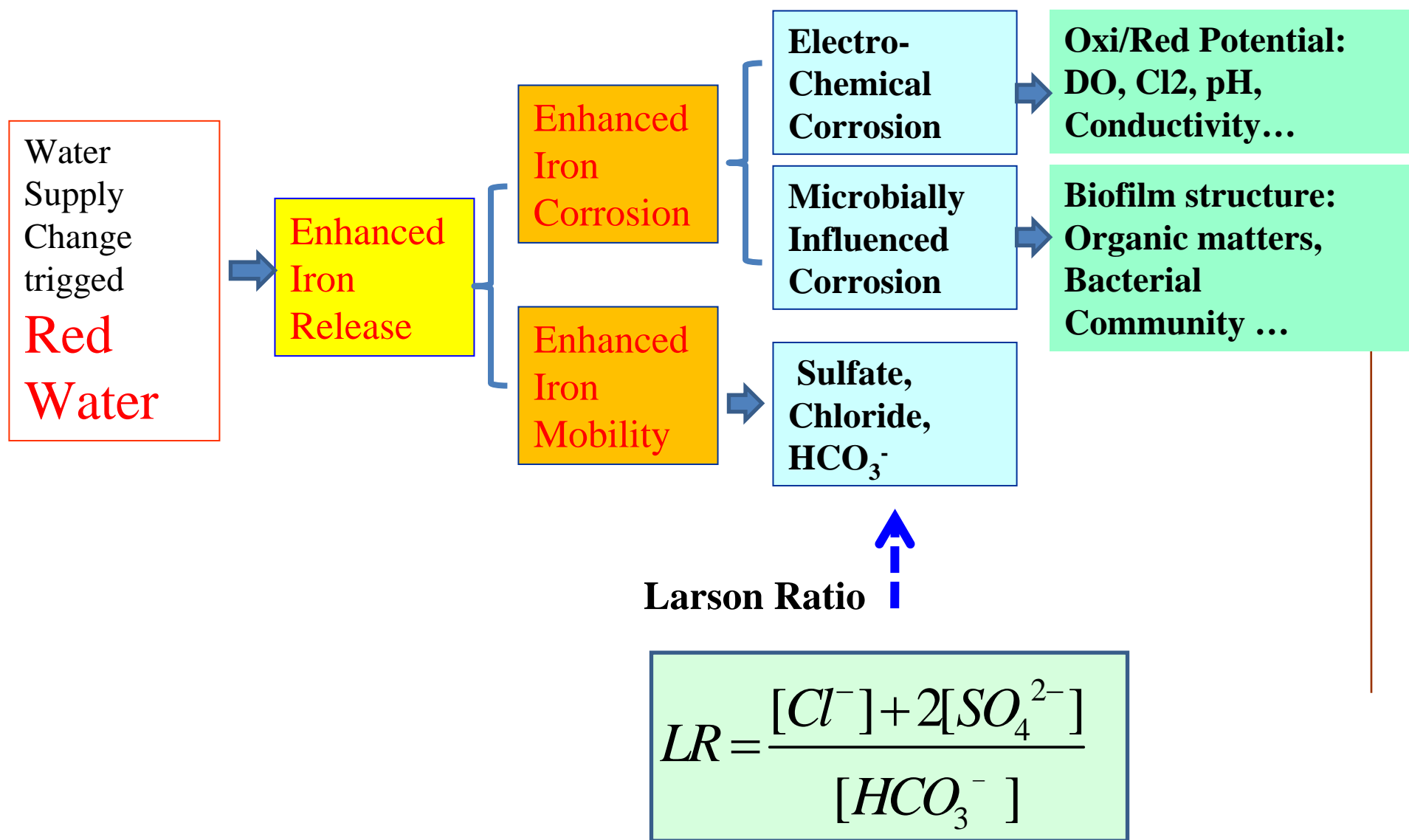
	北京地下水	河北黄壁庄水库
<i>pH</i>	7.6	7.7
<i>Alkalinity (mg/L CaCO₃)</i>	185	110
<i>Ca²⁺ (mg/L)</i>	137	60
<i>Mg²⁺ (mg/L)</i>	71	24
<i>Cl⁻ (mg/L)</i>	19	48
<i>SO₄²⁻ (mg/L)</i>	26	186
<i>TDS (mg/L)</i>	330	450
<i>Langerlier Index</i>	0.6	0.0
<i>Larson Index</i>	0.29	2.38

丹江口水源与北京水源比较:

	北京地表水 (田村)	北京地下水 (八厂)	丹江口水库
<i>pH</i>	7.79	7.18	8.06
<i>Alkalinity (mg/L CaCO₃)</i>	160	193.9	108.3
<i>Ca²⁺ (mg/L)</i>	46.4	59.0	42.6
<i>Mg²⁺ (mg/L)</i>	19.9	23.6	8.1
<i>Cl (mg/L)</i>	17.2	19.8	7.5
<i>SO₄²⁻ (mg/L)</i>	51.2	21.5	46
<i>TDS (mg/L)</i>			
<i>Langerlier Index</i>			
<i>Larson Index</i>	0.48	0.26	0.54

从水源水质特征分析: 丹江口水库水源入京后, 地下水供水区域有发生黄水风险

水源切换引发管网黄水的基本原理分析



针对北京市2009年以来的多水源供水中遇到的问题制定了预防管网黄水发生的水源合理调配方案。

成果应用有力保障了首都供水安全，避免了水源频发切换造成黄水现象的再次发生。同时，有效缓解了北京市水资源紧缺的矛盾，研究与工程应用结合紧密，取得重要的社会效益和经济效益。

谢谢!