

再生水补充地下水水质指标及控制技术

何星海, 马世豪

(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037, E-mail: hexinghai2006@163.com)

摘要: 再生水补充地下水是扩大污水回用最有益的一种方式, 具有广阔发展前景。本文分析与总结了国内外再生水补充地下水研究与应用实例、水质标准, 结合我国再生水的水质特点及水文地质状况, 从保护地下水资源和人体健康的角度, 探讨了我国利用再生水补充地下水应控制的水质指标及控制技术。按地表回灌和井灌方式分别提出了水质基本控制项目 COD、BOD、氨氮、粪大肠菌群数等 22 项, 选择控制项目 Hg、三氯甲烷等重金属和微污染有机物 52 项及其建议指标值, 并提出了再生水处理控制技术。

关键词: 再生水; 补充地下水; 水质指标; 控制技术

中图分类号: X652 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)05-0061-04

Study on the Guideline for Groundwater Recharge with Reclaimed Water

HE Xing-hai, MA Shi-hao

(Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China E-mail: hexinghai2006@163.com)

Abstract: Groundwater recharge with reclaimed water is the most beneficial way to extend reuse applications, and has the vast development foreground. In this paper, the domestic and international applications and guidelines for groundwater recharge with reclaimed water were summarized. Based on the quality of reclaimed water and the conditions of hydrological geology, the reclaimed water quality criteria for groundwater recharge was suggested including 22 basic controlling items and 52 selective controlling items, and the control technology was presented.

Key words: reclaimed water; recharge of groundwater; water quality criteria; control technology

利用再生水回灌地下水可补充地下水水量之不足, 防止地面下沉和海水倒灌, 调蓄地下水量并有一定的水质净化作用, 是污水资源化利用的重要方面。我国水资源的人均占有量很低, 时空分布极不均衡。随着人口的增长和国民经济的发展, 水资源供需矛盾日益突出, 人口相对密集、经济相对发达的城市地区水资源短缺问题尤为严重。许多地区, 尤其是以地下水作为供水水源的北方城市和部分沿海城市缺水量大, 长期超采地下水, 使地下水位逐年持续下降, 形成大面积地下水降落漏斗, 并不断扩大, 水质日趋恶化, 引发地质环境问题。因此在缺水地区迫切需要利用再生水有效、合理地回补地下水, 增加水资源量。

国内外研究与实践经验表明: 由于地下水是人类极为宝贵的水资源, 与地表水体相比, 地下水一旦被污染, 存在着水质恢复费用昂贵, 技术难度大, 恢复周期漫长等突出问题, 世界各国在地下水保护方面都奉行“以防为主, 重在保护”的原则。再生水补充地下水作为人类自觉的、有意识的行为, 必须以不污染地下水和不起地下水区域性恶化, 有利于地下水质量的改善为前提。我国每年约产生 350 亿 m³ 城镇污水, 具有极大的再生利用空间, 但目前二级生

物处理率尚不足 30%, 在城市污水中还含有大量的工业废水, 造成我国城市污水水质成分相当复杂, 含有多种有毒有害成分。经城市污水处理厂二级处理后的出水 BOD、COD、SS 明显降低, 但仍含有有机微污染物、粪大肠菌群、致病菌和病毒等有毒有害物质, 不宜直接用于补给地下水。我国目前尚无地下水回灌的水质标准、技术规范, 更缺乏再生水地下水回灌的实践经验, 极大地影响了再生水回灌地下水这一重要资源化工程的开展。因此, 研究再生水回灌地下水的水质指标及控制技术, 防止地下水污染, 保护人体健康, 提供清洁水链, 是当前发展再生水回灌地下水的键问题之一。

1 国外再生水补给地下水及水质标准

再生水补给地下水在国外已有较长的历史, 美国早在 1970 年代就开始使用再生水补给地下水, 以防止海水入侵和地下水位的下降^[1]。随着全球性水资源短缺和水污染的加剧, 美、法、德、以色列等发达

收稿日期: 2003-10-18; 修订日期: 2003-12-16

基金项目: 国家“十五”科技攻关重大项目(2001BA610A-05F3); 北京市自然科学基金重点项目(8011001)。

作者简介: 何星海(1964~), 女, 副研究员, 主要从事环境标准与水污染控制研究。

国家都在推行再生水回灌技术^[2]。1991年美国加州有200多个污水回用厂,为850多个用户提供再生水,回用量每年约3.3亿m³,其中约14%被回灌至地下,到1995年,该比例已经增加到27%,而且将成为污水回用的主要方向。在法国,有30到50个污水处理厂采用土壤渗滤技术进行污水处理,出水或储存于含水层或抽走回用。在以色列再生水回灌地下占污水回用的30%左右。Dan Region工程是以色列最大的水回用项目,服务人口130万,处理城市污水 $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,负责Tel Aviv地区和临近地区城市污水的收集、处理、地下回灌和回用,回灌地下后,获得高质量的再生水,可不受限制地用于各种农作物灌溉等非饮用用途。

各国对再生水补充地下水的安全性都十分重视,制定了再生水补给地下水的水质要求或指南。在再生水补给地下水风险的控制与标准、准则的制定方面,美国加州的标准^[3,4]以其严格与科学性得到了世界各国广泛的认可,表1列举了美国加州提出的有关再生水补给地下水的推荐标准。

表1 美国加州再生水地下回灌水质标准

Table 1 Proposed California groundwater criteria

处理与回灌场地要求	项目分类 ¹⁾		
	I	II	III
二级处理	要求	要求	要求
过滤	要求	要求	要求
消毒	要求	要求	要求
有机物去除	要求		要求
水质要求	抽水点: TN < 10 mg/L, TOC < 1 mg/L, 并且要符合饮用水水质标准		
再生水回灌量占抽水量的比例最大允许值/ %	50	20	50
回灌点地下水埋深			
渗透系数: < 0.5 cm/min	3	3	
< 0.8 cm/min	6	6	
在地下停留时间/月	6	6	12
回灌点离最近的饮用水水井距离/ m	150	150	600

1) I、II为地面入渗, III为地下灌注。

2 国内再生水补给地下水研究简况^[5~9]

我国再生水回灌利用仍处于试验研究阶段,目前尚无利用再生水进行地下水回灌的应用实例。但是,我国对污灌对地下水的影响,污染物在地下水中的转移净化规律,地下水硬度和硝酸盐升高等问题的研究积累了丰富的资料,为开展再生水补充地下水的研究提供了依据。为探讨可以回灌地下水的各类水源,北京市水文监测总站选择污染程度不同的龙潭泵站河水、凉水河水、京密引渠水,分别淋滤表

层2m厚不同岩性的土层,进行模拟河、渠、沟、池连续渗漏的试验研究,结果表明:

(1) 各类不同的水体,通过不同岩性的地层后,其淋出液中各种污染物含量决定于加入液的水质和地层岩性。以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 COD_{Mn} 的降解率为最大,以砂质粘土和粘质砂土的净化能力为最强。

(2) COD_{Mn} 的降解率除砂层为12.8%~44.2%外,其它岩性的地层净化率均大于85.0%。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的降解率砂层为83.9%~87.3%,其它岩性的地层净化率均大于95.0%,最大可达99.9%。

(3) 各类不同岩性的地层对硬度和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化率决定于加入液的硬度和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量及地层中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量。硬度除龙潭泵站河水通过粘质砂土和砂质粘土有所降低外,其它条件下均增高了。凉水河淋出液以粉土质砂土升高幅度为最大,升高率高达70.6%,砂层和粉土升高率较小,分别为5.3%和25.9%。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量降低了5.1%~87.5%,而龙潭泵站河水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量高达59.37 mg/L,严重超过地层的自然净化能力,其淋出液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 升高了20~110倍。

(4) 各类地层对高浓度的TDS具有一定的净化能力,而TDS含量低的加入液,溶解地层中的无机盐类,使其淋出液中TDS升高,一般升高6.3%~20.3%,最高达24.9%。

(5) 淋出液中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量变化不明显,总的趋势 Cl^- 降低, SO_4^{2-} 升高。

由此可见,污水通过各类不同岩性的地层后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 COD_{Mn} 基本上得到降解, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和硬度升高,部分地层使其TDS和 SO_4^{2-} 升高。污染物含量较低的河水,通过各类地层后,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 COD_{Mn} 净化能力较强,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 Cl^- 具有一定的净化作用,而对地层中的无机盐类有一定的溶解作用,使其淋出液中TDS升高,但升高幅度较小。

3 再生水补充地下水水质控制项目及建议指标值

3.1 影响补充水渗入量的指标

主要是引起回灌设施的物理淤塞、化学淤塞、气相淤塞、生物淤塞的物质,包括:

(1) 悬浮物 其含量过高会造成回灌区或回灌井透水层的堵塞,使回灌能力不断减小直至无法回灌。因此,一般对回灌水的悬浮物要求非常严格。

(2) 营养盐 主要指氮、磷等。一般以总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷等作为控制指标,以控制微生物

的生长。

(3) 有机物 以 BOD、COD 或 TOC 等作为控制指标,以控制微生物的生长和保证水质。

(4) 微生物 以细菌总数、大肠菌群数、粪大肠菌群数等作为控制指标,防止生物堵塞和保护人体健康。

3.2 影响地下水水质的指标

(1) 影响地下水水化学类型及离子变化的指标,主要包括:pH、含盐量、氯离子、硫酸根、总硬度等。

(2) 再生水中可能含有的对环境对人体健康有危害的污染物,根据我国再生水的水质特性,主要包括:常规污染物、重金属、有毒有害化学物质、持久性有机物、消毒副产物等。

(3) 卫生学指标,控制病原微生物,主要包括:细菌、病毒和原生动物。国内外的研究表明,病毒、贾弟鞭毛虫和隐性孢子虫在某些条件下具有比大肠杆菌更强的耐消毒能力,因而受到世界各国广泛的关注,使长期以来以大肠杆菌作为水生物性污染指标的观点受到挑战,但由于水中病毒和原生动物的检测程序非常复杂,目前也只有亚利桑那州的再生水回用标准规定了病毒和原生动物控制指标,现有的世界各国再生水回用水质标准仍以总大肠菌群数或粪大肠杆菌数作为卫生学控制指标。因此,选择粪大肠杆菌数作为再生水补充地下水卫生学控制指标。

同时借鉴国外的经验,病原微生物在地下水人工回灌过程中,会因过滤、吸附、死亡等原因随着在地下滞留时间的增长而逐渐减少,为保证卫生安全,将再生水回灌后在地下的停留时间也作为卫生学的控制指标。根据以上原则共筛选出水质控制指标基本控制项目 23 项,选择控制项目 52 项,其各项指标推荐值列于表 2 和表 3。

4 再生水补给地下水处理技术及工艺选择

再生水是以城镇污水处理厂出水作为水源的,因城镇污水处理厂所采用的工艺和排放标准要求^[10]的不同,其出水的水质也不同。污水处理厂主要处理工艺和出水水质如表 4 所列。

从表 5 可以看出,城镇污水处理厂出水仅达到排放要求,一般说来仍不能达到本研究提出的回灌水质建议值的要求,需进一步去除水中的悬浮物、有机物、重金属、有毒物质、病原微生物、溶解盐等。再生水处理的主要工艺有物化法、生物法和膜法。

工艺 1 物化法处理:

二级出水 → 调节池 → 混凝沉淀 → 过滤 → 消毒 → 再生

水利用

表 2 再生水地下水回灌基本控制项目及限值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Suggested reclaimed water quality criteria of basic controlling items for groundwater recharge/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

序号	基本控制项目	地表回灌		井灌
		表层粘性土	表层粘性土	
		厚度 < 1.0 m	厚度 ≥ 1.0 m	
1	色度/倍	≤15	≤30	≤15
2	浊度	≤5	≤10	≤5
3	pH	6.5 ~ 8.5	6.5 ~ 8.5	6.5 ~ 8.5
4	总硬度(以 CaCO_3 计)	≤450	≤450	≤450
5	溶解性总固体	≤1000	≤1000	≤1000
6	硫酸盐	≤250	≤250	≤250
7	氯化物	≤250	≤250	≤250
8	挥发酚类(以苯酚计)	≤0.002	≤0.5	≤0.002
9	阴离子表面活性剂	≤0.3	≤0.3	≤0.3
10	高锰酸盐指数	≤6.0	≤15	≤6.0
11	COD	≤20	≤40	≤20
12	BOD_5	≤4	≤10	≤4
13	硝酸盐(以 N 计)	≤15	≤15	≤15
14	亚硝酸盐(以 N 计)	≤0.02	≤0.02	≤0.02
15	氨氮(以 N 计)	≤0.2	≤1.0	≤0.2
16	总磷	≤1.0	≤1.0	≤1.0
17	动植物油	≤0.05	≤0.5	≤0.05
18	石油类	≤0.05	≤0.5	≤0.05
19	氰化物	≤0.05	≤0.05	≤0.05
20	硫化物	≤0.2	≤0.2	≤0.2
21	氟化物	≤1.0	≤1.0	≤1.0
22	粪大肠菌群数/ L^{-1}	≤3	≤1000	≤3
23	抽取利用前在地下停留时间/月	≥12	≥6	≥12

表 3 再生水地下水回灌选择控制项目及限值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Suggested reclaimed water quality criteria of selective controlling items for groundwater recharge/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

序号	选择控制项目	标准值	序号	选择控制项目	标准值
1	总汞	0.001	27	三氯乙烯	0.07
2	烷基汞	不得检出	28	四氯乙烯	0.04
3	总镉	0.01	29	苯	0.01
4	六价铬	0.05	30	甲苯	0.7
5	总砷	0.05	31	二甲苯	0.5
6	总铅	0.05	32	乙苯	0.3
7	总镍	0.05	33	氯苯	0.3
8	总铍	0.002	34	1,4-二氯苯	0.3
9	总银	0.05	35	1,2-二氯苯	1.0
10	总铜	1.0	36	硝基氯苯	0.05
11	总锌	1.0	37	2,4-二硝基氯苯	0.5
12	总锰	0.1	38	2,4-二氯苯酚	0.093
13	总硒	0.01	39	2,4,6-三氯苯酚	0.2
14	总铁	0.3	40	邻苯二甲酸二丁酯	0.003
15	总钡	1.0	41	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	0.008
16	苯并(a)芘	0.00001	42	丙烯腈	0.1
17	甲醛	0.9	43	滴滴涕	0.001
18	苯胺类	0.1	44	六六六	0.005
19	硝基苯	0.017	45	六氯苯	0.05
20	马拉硫磷	0.05	46	七氯	0.0004
21	乐果	0.08	47	林丹	0.002
22	对硫磷	0.003	48	总 α 放射性 (Bq/L)	0.1
23	甲基对硫磷	0.002	49	总 β 放射性 (Bq/L)	1
24	五氯酚	0.009	50	三氯乙醛	0.01
25	三氯甲烷	0.06	51	丙烯醛	0.1
26	四氯化碳	0.002	52	砷	0.5

工艺 2 物化法处理与生物处理结合：
二级出水 → 调节池 → 微絮凝过滤 → 生物活性炭 → 消毒 → 再生水利用

工艺 3 曝气生物滤池处理：

二级出水 → 调节池 → 曝气生物滤池 → 消毒 → 再生水利用

工艺 4 膜生物反应器：

工艺 4-1 分体式膜生物反应器：

表 4 城镇污水处理厂的出水水质

Table 4 Effluent water quality of municipal wastewater treatment plant

序号	项目	常规二级处理	强化二级处理	深度处理	回灌水质的建议值	
					地表回灌	井灌
1	pH	6~9	6~9	6~9	6.8~8.5	6.5~8.5
2	SS/ mg·L ⁻¹	≤30	≤20	≤10	10	5
3	BOD/ mg·L ⁻¹	≤30	≤20	≤10	10	4
4	COD/ mg·L ⁻¹	≤100	≤60	≤50	40	20
5	NH ₃ ⁻ N/ mg·L ⁻¹	≤25	≤8	≤5	1	0.2
6	TP/ mg·L ⁻¹	≤3.0	≤1.5	≤1.0	1.0	1.0
7	粪大肠菌群数/ L ⁻¹	≤10000	≤10000	≤1000	1000	3

城镇污水 → 曝气池 → 超(微)滤 → 消毒 → 再生水利用

工艺 4-2 一体式膜生物反应器(与二级生物处理的活性污泥池合建,省去污水厂的二沉池)：

城镇污水 → 一体式膜生物反应器(SMBR) → 消毒 → 再生水利用

工艺 5 膜法脱盐(双膜法)：

二级出水 → 调节池 → 超(微)滤 → RO 脱盐 → 消毒 → 再生水利用

以上各再生水处理工艺的主要出水指标及应用条件比较见表 5。

表 5 再生水各处理工艺比较

Table 5 Comparison different treatment processes of reclaimed water

处理工艺	出水水质/ mg·L ⁻¹					投资费用	运行费用	占地	适用条件
	COD	BOD	浊度	NH ₃ ⁻ N	总磷				
工艺 1	≤40	≤10	≤10	≤1	≤0.5	较低	较低	中	地表回灌
工艺 2	≤20	≤4	≤5	≤0.5	≤0.5	较高	高	较大	井灌,地表回灌
工艺 3	≤40	≤10	≤10	≤1	≤1	低	低	较省	地表回灌
工艺 4-1	≤20	≤4	≤5	≤0.5	≤0.5	较高	较高	较省	井灌,地表回灌
工艺 4-2	≤20	≤4	≤5	≤0.5	≤0.5	低	低	省	井灌,地表回灌
工艺 5	≤10	≤2	0	0	≤0.1	高	高	中	井灌,地表回灌

5 小结

(1) 利用再生水补充地下水必须根据地下水的理化性质、水文地质条件及地下水的用途严格控制再生水的水质,水质指标的选择和制订应考虑回灌方式、回灌工艺对水质的要求,以及再生水中污染物的性质等,防止地下水污染和水质恶化。

(2) 再生水处理工艺有:化学混凝沉淀(气浮)、过滤、吸附、化学氧化、生物脱氮除磷、膜处理、脱盐、消毒等。

(3) 再生水处理工艺选择必须根据二级污水处理厂的出水水质、回灌水的水质要求和技术经济条件进行,做到技术合理,经济可行。

参考文献：

[1] 张自杰. 环境工程手册——水污染防治卷[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996. 1404~1410.

[2] 成徐州,等. 土壤渗滤处理技术研究现状与进展[J]. 环境科学研究, 1999, 12(4): 33~66.

[3] U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse. EPA/625/R-92/004, Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, 1992.

[4] State of California. Draft Proposed Groundwater Recharge Regulation[R]. Sacramento, California: California Department of Health Service, Division of Drinking Water, 1999.

[5] 北京市环境科学研究院,北京市水文总站,北京市勘察设计院. 北京市平原地区地下饮用水源保护及防治技术指南[R]. 2000.

[6] 北京市地矿局水文地质工程地质公司. 北京西郊地下水库试验研究报告[R]. 1985.

[7] 田园,张原秀,孙雪峰. 黄淮海平原地下水人工补给[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[8] 丁昆仑. 人工回灌地下水的有效途径和方法探讨[J]. 中国农村水利水电, 1996, (1,2): 14~17.

[9] 孙颖,苗礼文. 北京市深井人工回灌现状调查与前景分析[J]. 水文地质工程地质, 2001, (1): 21~23.

[10] 马世豪,何星海. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》浅释[J]. 给水排水, 2003, 29(9): 89~94.