

· 调查与评价 ·

北京城市副中心海绵城市建设对地下水环境影响评价

姜媛¹, 杨庆^{2*}, 李海军¹, 邓若晨³, 任永强¹

(1. 北京市地质矿产勘查院, 北京 100195; 2. 北京市地质环境监测所, 北京 100195;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:以城市副中心北运河西岸湿地(甘棠大桥段)作为典型面状海绵体,利用2018年5月—9月采集的300组地表水和地下水监测数据,分析典型海绵体地下水水化学特征及形成机制,探讨不同含水层之间水力联系,并以Cl⁻为指示因子,结合其他水化学指标研究分析典型面状海绵体建设背景下地下水与地表水之间的交互作用及影响程度。结果显示,在垂向上,10 m、20 m 含水层地下水之间联系密切,且受大气降水影响明显;在平面上,地表水对10 m、20 m 含水层组地下水的的影响距离为90 m~120 m,地表水对30 m 含水层组地下水的的影响距离为80 m~90 m。

关键词:地下水;水化学特征;海绵城市建设;环境影响评价;北京城市副中心

中图分类号:X523;X820.3 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2022)03-0030-05

Environmental Impact Assessment of Sponge City Construction on Groundwater in Beijing Municipal Administrative Center

JIANG Yuan¹, YANG Qing^{2*}, LI Hai-jun¹, DENG Ruo-chen³, REN Yong-qiang¹

(1. Beijing Geology and Mineral Prospecting Institute, Beijing 100195, China; 2. Beijing Geological Environment Monitoring Institute, Beijing 100195, China; 3. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the wetland on the west bank of North Canal(Gantang bridge section) in Beijing Municipal Administrative Center as a typical planar sponge body, using 300 groups of surface water and groundwater monitoring data collected from May to September 2018, this paper analyzed the hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the typical sponge body, discussed the hydraulic connection between different aquifers. Taking Cl⁻ as the indicator factor and combining with other hydrochemical indexes, it studied the interaction and influence degree between groundwater and surface water under the construction of typical planar sponge body. The results showed that in the vertical direction, groundwater was closely connected between 10 m and 20 m aquifers, and was obviously affected by atmospheric precipitation. In the plane, the influence distance of surface water on groundwater of 10 m and 20 m aquifer groups was between 90 m and 120 m, and the influence distance of surface water on groundwater of 30 m aquifer group was between 80 m and 90 m.

Key words: Groundwater; Hydrochemical characteristics; Sponge city construction; Environmental impact assessment; Beijing Municipal Administrative Center

海绵城市是城镇化建设及可持续发展的重要保障措施^[1]。近年来,研究人员围绕海绵城市建设中遇到的关键科学问题开展了大量的研究,包括不同海绵措施及效果评估、雨洪资源综合利用、海绵城市管理优化与监测系统等^[2-3]。程桂^[4]建立SWMM模型对江苏省宜兴市进行雨洪控制效果模拟,分析了不同海绵体对地表径流雨水的水文水质

效果的影响。杨程展智^[5]建立河段水动力-水质耦合模型,分析了河道水质对海绵措施的响应规

收稿日期:2021-05-27;修订日期:2022-03-23

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8181002)

作者简介:姜媛(1984—),女,山东青岛人,高级工程师,硕士,主要从事地下水监测调查及评价工作。

*通信作者:杨庆 E-mail: 4360833@qq.com

律。然而,目前的研究主要集中于不同海绵措施对地表水水量与水质的影响,而海绵城市的建设会增加雨水入渗及地下水补给,势必给地下水带来潜在的污染风险^[6-8]。因此,有必要开展海绵城市建设对地下水环境影响评价研究。

北京城市内涝问题日益凸显,威胁市民生命财产安全^[9-10],海绵城市的建设能够促进水资源的综合利用,缓解城市防洪排涝的压力,是系统解决城市水安全、水资源、水环境问题的有效措施^[11-13]。今以北京城市副中心最重要的面状海绵城市生态要素——北运河西岸湿地(甘棠大桥段)作为典型面状海绵体,利用地表水和地下水同步连续监测数据,研究海绵城市建设过程中地下水的水化学特征,进而分析典型面状海绵体建设背景下地下水与地表水之间的交互作用及影响程度,为海绵城市建设中地下水资源及环境的保护提供理论和技术支撑^[14]。

1 研究方法

1.1 研究区域水文概况

研究区位于北京市城市副中心东南部北运河西岸湿地,目前是北京城市副中心区域最重要的面状海绵城市生态要素之一。该区多年平均气温为11.7℃,多年平均降水量为584.6mm,降水量年内分配不均,全年降水量80%以上集中在6—9月。地下水径流方向为自西北向东南。

根据监测井钻孔资料绘制的地质剖面图显示,第四系岩性以粉质黏土、砂质黏土为主,并与中、细砂互层,其中可夹少量砾石。埋深0m~50m段的地层累计厚度可达18m左右,其中埋深0m~20m段地层以粉、细砂与黏性土互层为主,局部存在隔水层。在埋深20m左右存在稳定粉质黏土隔水层。

1.2 地下水监测井布设及样品采集

2017年在甘棠大桥段建设地下水监测网,垂直河流方向,180m以内布设3行5列监测井,行间距为25m,列间距从近河—远河处分别为15m、20m、20m和30m。监测井采用一孔多井技术,分别有10m、20m、30m分层井15组,50m单井1组,50m、80m分层井1组,共17组监测井。根据位置及井深将全部监测井分为A—E5个组(见图1)。其中,A、B、C组均包含10m、20m、30m分层井5组,D组包含50m监测井2个,E组为80m分层井1个。

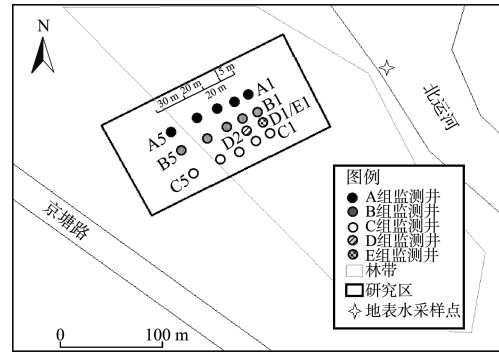


图1 甘棠面状海绵体监测井分组示意

Fig.1 Schematic diagram of monitoring well grouping of Gantang planar spongy body

为了对比降水前后的影响,按照《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2004)和《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002),于2018年5—9月每月1次分别对上述监测井及北运河河水进行采样监测,其中5月为枯水期水样,6—9月为丰水期水样,共计295组地下水样品和5组地表水样品。监测指标包括无机27项,卤代烃16项。

1.3 研究方法

利用2018年5—9月采集的300组地表水和地下水同步连续监测数据,通过分析各组监测井及其不同层位的典型离子浓度变化,绘制Piper三线图和Durov图,研究不同监测层位主要离子的浓度变化、水化学变化趋势及地表水—地下水垂向演化特征。利用Origin软件中的拟合回归模块功能,选用线性趋势线对 Cl^- 的浓度数据作拟合直线,分析研究区海绵城市建设背景下的地表水—地下水响应关系。

2 结果与讨论

2.1 甘棠地区地下水典型离子空间分布特征

根据动态监测资料,以钠(Na^+)、氯化物(Cl^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})和溶解性总固体(TDS)4个典型指标作为地下水空间变化特征研究的对象。图2为甘棠地区地下水中4项典型指标的质量浓度变化。

由图2可见,垂向上, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和TDS质量浓度随地层自上而下均呈现降低趋势。按照指标浓度变化趋势及特征,研究区地下水可分为两个部分:其一为10m和20m含水层组,各主要指标浓度变化趋势基本一致,表明含水层易受到降水的补

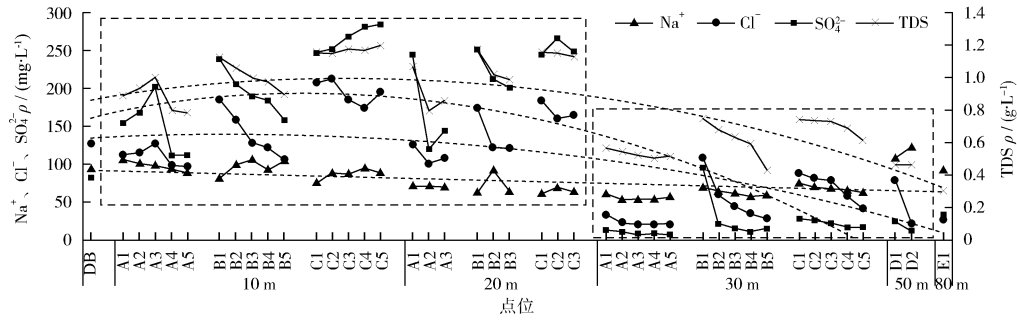


图 2 甘棠地区地下水中 4 项典型指标的质量浓度变化

Fig. 2 Mass concentration variation of four typical indexes in groundwater in Gantang area

给。此外,10 m 含水层组 Na^+ 的浓度略高于 20 m 含水层组。其二为 30 m、50 m 和 80 m 含水层组,各项指标浓度变化幅度较小,TDS 显示明显的自上而下浓度降低的趋势, Na^+ 显示随深度增加浓度增高的趋势。平面上,10 m、20 m 和 30 m 3 个含水层组基本呈现由近河端向远河端浓度降低的趋势。其中,10 m 和 20 m 含水层组变化较为显著,而 30 m 含水层组指标浓度变化幅度相对较小,说明 10 m 和 20 m 含水层组近河端更易接受到地表河水的补给。50 m 含水层组地下水的年内平均水位埋深为 4.73 m,受蒸发影响较小,TDS 低于上部含水层;80 m 含水层组地下水的年内平均水位埋深为 17.62 m,不受蒸发影响,主要接受上部含水层越流补给,且年内 TDS 浓度较为集中,变化不大。说明 50 m 和 80 m 含水层组受外界影响相对较小,地下水中各项指标较为稳定。

2.2 甘棠地区地下水化学特征分析

将研究区 5—9 月监测数据分别按照 10 m、20 m、30 m、50 m、80 m 地层进行主要化学组分数理统计(见表 1)。由表 1 可知, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、TDS 质量浓度随着地层由上至下呈现下降的趋势; Na^+ 在 10 m、20 m 和 30 m 含水层组中的平均质量浓度随

地层由上至下逐渐下降,由 93.8 mg/L 降至 63.4 mg/L,而在 50 m 与 80 m 含水层组中又上升至 94 mg/L 左右; Cl^- 和 SO_4^{2-} 平均质量浓度在 10 m、20 m 含水层组中接近,分别为 140 mg/L 和 182 mg/L 左右,而到 30 m、50 m、80 m 含水层组时突然降低至 40 mg/L 和 20 mg/L 左右。

相关性分析结果显示,该地区 10 m 含水层组中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与 TDS 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,相关系数均 > 0.7 ,说明其影响该层地下水的矿化度; Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 具有显著相关性,相关系数 > 0.85 ,说明该层地下水中可能存在石膏等硫酸盐岩的溶解; Ca^{2+} 与 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 的相关系数分别为 0.877、0.776,说明该层地下水中可能存在碳酸盐岩沉积物的溶解。此外, Cl^- 与 SO_4^{2-} 的相关性显著,说明该层地下水中可能存在污染排放、过度施肥或者灌溉用水等影响地下水水化学成分的情况。

通过 Piper 三线分析(见图 3)可以了解地下水水化学的主要离子组成及演化特征。由图 3 可见,研究区内的主要地表水水化学类型分布较集中,阳离子类型以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主,阴离子类型以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主。地表水以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$

表 1 研究区地表水及不同层位地下水中主要水化学成分监测值
Table 1 Monitoring values of main hydrochemical components of surface water and groundwater in different layers in the study area

类型	深度 h/m	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	TDS
地表水		13.9	93.1	65.0	25.9	259	126	85.4	578
地下水	10	2.98	93.8	165	57.7	566	141	182	925
	20	7.99	69.2	124	76.1	517	132	183	797
	30	2.02	63.4	72.5	45.5	529	48	20.3	551
	50	2.58	115.6	24.1	42.1	406	69.7	14.6	484
	80	0.59	94.3	5.93	11.1	116	34.9	28.0	305

型为主;10 m 和 20 m 含水层组地下水化学类型相对较为接近,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 为主;30 m 含水层以 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 为主;50 m 含水层以 $\text{HCO}_3 - \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 为主;80 m 含水层以 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 为主。含水层自上而下,10 m ~ 80 m, 阳离子由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 过渡为 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} , 最后转变为 Na^+ ; 阴离子由 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 过渡为 HCO_3^- 、 Cl^- , 最后转变为 HCO_3^- ; 水化学类型由 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 转变为 $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$, 最后转变为 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型。

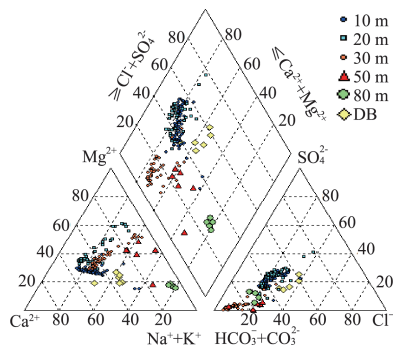


图 3 研究区地下水 Piper 三线分析

Fig. 3 Piper trilinear analysis of groundwater in study area

2.3 面状海绵体建设对地下水环境影响分析

2.3.1 影响深度分析

由甘棠面状海绵体的 Durov 分析(见图 4)可以看出,地表水及各层地下水在各项指标上均有不同程度的聚集,形成地表水及地下水 10 m 和 20 m、30 m、50 m 和 80 m 5 个相对集中区,整体上表现为:TDS 按照自上而下的地下水补给路径呈现明显的下降趋势,由 2 400 mg/L 降低至 440 mg/L 左右;pH 值分为地表水及地下水 30 m 以浅、50 m 和 80 m 3 个阶梯簇,并随深度表现为升高的趋势; SO_4^{2-} 按照含水层自上而下的地下水补给路径逐渐降低,而 HCO_3^- 沿地下水补给路径浓度逐渐升高, Na^+ 由 10 m、20 m、30 m 含水层组至 80 m 含水层组含量升高明显,同时 Ca^{2+} 呈现相反的趋势。综上,该面状海绵体地表水对 10 m、20 m 含水层的地下水有明显补给效果,对 30 m 含水层的地下水补给作用有限,地下水中 10 m、20 m 含水层组之间水力联系紧密,30 m 含水层与浅层地下水交流有限,50 m、80 m 含水层与上层无明显地下水联系,并且两个含水层之间水力联系较弱。

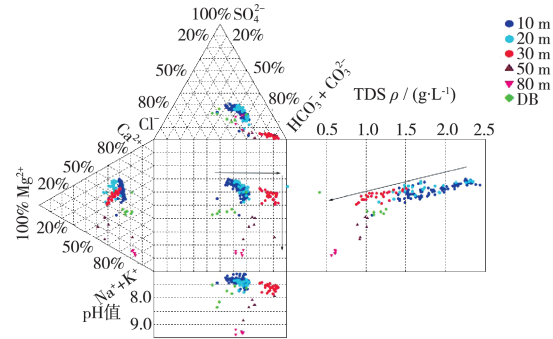


图 4 研究区地表水和地下水主要离子 Durov 分析

Fig. 4 Durov analysis of main ions in surface water and groundwater in the study area

2.3.2 影响范围分析

环境示踪剂是大气环境中自然存在的示踪剂,如 ^2H 、 ^{18}O 、 Cl^- 等作为示踪剂,已被广泛应用于地下水补给来源、循环演化和污染示踪等方面的研究。当前在地下水研究中运用较多是 Cl^- , 一方面 Cl^- 是一种保守的示踪剂,在自然界中 Cl^- 不易与其他组分结合,也不容易被土壤吸附、植物摄取,是一种稳定的水化学离子;另一方面,地下水中的 Cl^- 浓度比较稳定,在地球化学上 Cl^- 被认为是惰性的,其浓度和变化完全与来源相关^[15-21]。因此,影响距离的研究以 A、B、C 组监测井实测 Cl^- 浓度为主,兼顾其他指标,按照曲线的拐点位置,同时结合水化学特征的差异性来判断地表水对地下水的影响范围。

监测数据显示,离河较远的监测井其离子浓度与地表水相差较大,离河最近的监测井 Cl^- 及 SO_4^{2-} 浓度与地表水接近。由近河端的监测井至远河端的监测井方向来看, Cl^- 浓度变化趋势为接近河道的监测井离子浓度与地表水接近,至中间的监测井则离子浓度升高到峰值,接着远离河道的方向离子浓度开始下降。利用 Origin 软件中的拟合回归模块功能,以 Cl^- 浓度曲线图中变化趋势最大的点为分界线,拟合两侧各点的趋势线,把两条趋势线的交点定为河流对地下水的大致影响距离。将 5—9 月的地表水与地下水中的 Cl^- 浓度取平均值,并作 Cl^- 浓度沿离河距离变化曲线,把面状海绵体监测井分成 3 组来研究,分别见图 5(a)(b)(c)。

由图 5 可见,甘棠面状海绵体 A 组监测井整体呈现远离河道 Cl^- 浓度下降的趋势,从 A3 号监测井开始 Cl^- 浓度上升,故以此点位为分界,作近

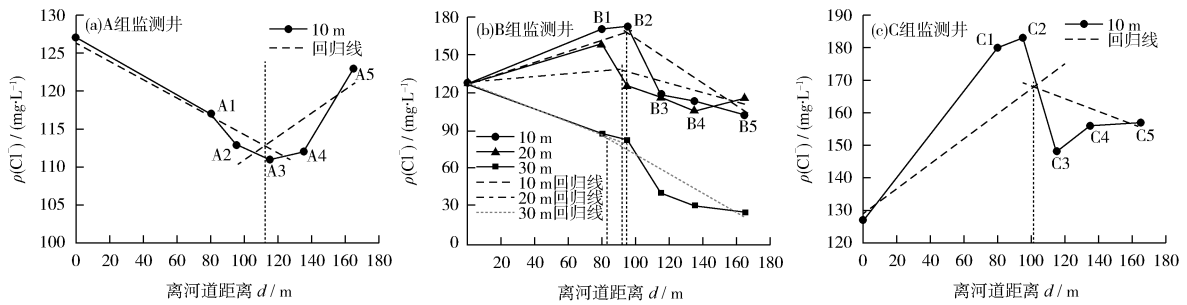


图 5 研究区 A、B、C 组监测井中 Cl⁻ 质量浓度变化

Fig. 5 Change of Cl⁻ mass concentration in monitoring wells of group A、B、C in the study area

河端与远河端的拟合趋势回归线,趋势线的 R^2 为 0.98 与 0.89,数值接近于 1,趋势线具有可靠性。可见,地表水影响 A 组监测井的大致距离为 110 m ~ 115 m。B 组监测井 10 m 与 20 m 含水层 Cl⁻ 浓度曲线趋势基本一致,故以 B2 井为分界,作两侧监测井 Cl⁻ 浓度拟合回归趋势线,10 m、20 m 地下水 Cl⁻ 趋势线的 R^2 分别为 0.98 与 0.73、0.61 与 0.65,10 m 地下水数值接近 1,趋势线具有可靠性,20 m 地下水趋势线可靠性较好,两者的交点都在离河道 90 m ~ 95 m;30 m 的含水层近河端的 2 个监测井与远河端的 3 个监测井浓度呈两种趋势,故拟合其回归趋势线,趋势线的 R^2 为 0.96 与 0.74,数值靠近 1,具有一定的可靠性,趋势线的交点为离河流 80 m ~ 90 m。面状海绵体 C 组监测井离子浓度变化趋势与 B 组 10 m 相似,影响距离为 100 m ~ 115 m。

利用上述方法分别计算 A、B、C 3 组监测井在 5—9 月的影响距离,见表 2。

结合 Na⁺、K⁺、TDS 等水化学动态特征,北运河水对面状海绵体 10 m、20 m 含水层地下水的影响在雨季较为显著,且呈现一致的规律。枯水期(5 月)影响距离为 90 m ~ 95 m,进入丰水期后,影响距离逐步增大,8 月后影响距离为 110 m ~ 120 m,30 m 含水层地下水受降水影响不显著,9 月影响距

离与 5 月基本一致,为 80 m ~ 90 m。

3 结论

(1) 研究区 10 m、20 m 含水层地下水之间联系密切,受大气降水影响明显;30 m 含水层地下水与上覆含水层虽有一定的水力联系,但受大气降水影响不显著,有一定的滞后性;50 m、80 m 含水层受外界影响相对较小。地表水对 10 m、20 m 含水层组地下水的影响距离为 90 m ~ 95 m,进入雨季后受降水影响明显,影响距离有所增加,为 110 m ~ 120 m;地表水对 30 m 含水层组的地下水影响距离为 80 m ~ 90 m,在雨季受降水影响较小。

(2) 研究区 10 m、20 m 含水层地下水受外界影响相对显著,受到地表水的补给作用,当存在地表污染或地表水有污染成分时,易对该层地下水造成影响,受污染风险较大,应加强源头治理,多建设地表入渗水体自然净化设施,做好监管,减少海绵城市建设对地下水可能造成的影响。上述研究结果表明,水文地质条件是海绵体对地下水环境影响范围和程度的关键因素,建议在海绵城市发展格局和空间形态上充分考虑资源环境承载能力和国土空间开发适宜性^[21],促进“人-城市-自然”的和谐共存。

表 2 甘棠地区不同月份河水对地下水的影响距离 m

Table 2 Influence distance of river water on groundwater in different months in Gantang area m

组类	井深 h/m	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
A 组	10	90 ~ 95	100 ~ 110	110 ~ 120	110 ~ 120	110 ~ 120
B 组	10	90 ~ 95	100 ~ 110	100 ~ 110	110 ~ 120	110 ~ 120
	20	90 ~ 95	100 ~ 110	100 ~ 110	110 ~ 120	110 ~ 120
	30	80 ~ 90	80 ~ 90	80 ~ 90	80 ~ 90	80 ~ 90
C 组	10	90 ~ 95	100 ~ 110	110 ~ 120	110 ~ 120	110 ~ 120

[参考文献]

[1] 俞孔坚,袁伟,李青,等.“海绵城市”实践:北京雁栖湖生态发展示范区控规及景观规划[J].北京规划建设,2015(1): 26-31.

[2] 陆浩.海绵城市雨水管理优化与监测系统设计[D].吉林:东北电力大学,2020.

[3] 孙波.基于海绵城市理念的南方沿海城市内涝防治策略研究[D].衡阳:南华大学,2020.

(下转第 39 页)