

江苏滨海平原微承压水层位水土体含盐特征及其相关性分析

苟富刚^{1,2}, 龚绪龙^{1,2}, 李进^{1,2}, 刘源^{1,2}

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018; 2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点试验室, 江苏南京 210049)

摘要: 通过采集测试土样和水样, 分析了研究区地下水水化学特征和土体含盐特征。研究表明: 江苏滨海平原地区微承压水为海相沉积水, 以盐水为主, 水化学类型主要为 Cl-Na。微承压水盐分主要来自海水。成井层位土体含盐量较高, 以弱盐渍土为主, 盐渍土类型为氯盐渍土。土中盐分主要来自海水浸渍, 且地下水中的 Na⁺ 与地层中的交换性钙离子、镁离子产生了阳离子交换。土中易溶盐主要指标和地下水主要指标对应呈线性正相关, 建立了矿化度和成井层位土体易溶盐各指标的线性回归模型, 并采用 HYRD1 号井进行了验证, 效果良好, 说明了土体盐度分析在地下水咸化中的指示作用。

关键词: TDS; 矿化度; 氯盐渍土; 回归分析; 微承压水层; 盐分特征; 地下水特征; 江苏滨海平原

中图分类号: TV138 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2017)03-0072-05

Salt characteristics and correlation analysis of soil and water body of micro confined water layer in Jiangsu coastal plain

GOU Fugang^{1,2}, GONG Xulong^{1,2}, LI Jin^{1,2}, LIU Yuan^{1,2}

(1. Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China; 2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210049, China)

Abstract: The authors took soil and water samples, and analyzed the groundwater chemical characteristics and soil salt characteristics in the study area. The results show that the micro-confined water in the coastal plain of Jiangsu is marine sedimentary water, mainly salt water, and the main chemical type is Cl-Na. The salt of micro-confined water mainly comes from sea water. Salt content of suppling period soil is higher, and the soil type is weak saline soil and chlorine saline soil. The salt content in the soil is mainly from seawater immersion, and the Na⁺ in the groundwater and the exchangeable calcium ions in the formation, magnesium ions produced cation exchange. Main indexes of soil and groundwater salinity show a corresponding linear positive correlation. The linear regression model of salinity with each index of suppling period soluble salt was established and verified by the HYRD1 well. Model effect is good, which illustrates the analysis of soil salinity has instructions in water salinization.

Key words: TDS; salinity; chlorine saline soil; regression analysis; confined aquifer; salt characteristics; groundwater characteristics; Jiangsu coastal plain

1 研究背景

江苏滨海平原地区土体盐度和地下水矿化度一般呈正相关^[1-3], 地下水矿化度越高, 土体盐度也越高, 土体易溶盐质量浓度特征与地下水各指标也基本相同, 显示以氯盐为主的成分, 土体和地下水之间

发生了多种离子的交换作用^[4-7]。受第四纪海侵的影响, 沿海地区浅层地下水矿化度普遍为大于 3 000 mg/L 的半咸水、咸水(2004 年); 深层水虽以淡水为主, 但目前也存在咸化趋势。据黄敬军等^[8]的研究, 深层水超量开采诱发水质咸化等环境地质问题, 盐城地区 1980-1995 年深层地下水平均矿化度由

720 mg/L 上升到 960 mg/L。盐城、射阳、大丰、滨海 4 个水位降落漏斗已相连,漏斗面积达 1 880 km²。根据徐玉琳等^[9]的研究,南通市水质动态总体呈咸化趋势,咸化速率由小于 4 mg/(L·a) 到大于 20 mg/(L·a) 不等。目前江苏沿海地区浅表层水土体含盐量普遍较高,深部土体含盐量伴随水体的咸化,相应层位土体含盐量也日益增高。

现行规范对于土体,仅研究潜水位波动范围内的土体含盐特征,对于深层土体评价没有做要求,所以这方面研究的比较少。目前江苏地区还没有有较为系统的研究浅表层土体及深部土体含盐特征,都是某个港口或地区的浅表层研究,且仅仅就土体做分析。本文在系统分析 82 件土样(成井层位)易溶盐的基础上,结合已有的 33 口井水质分析结果,进行水土体耦合分析,对江苏滨海平原地区水土体含盐特征做系统的研究。

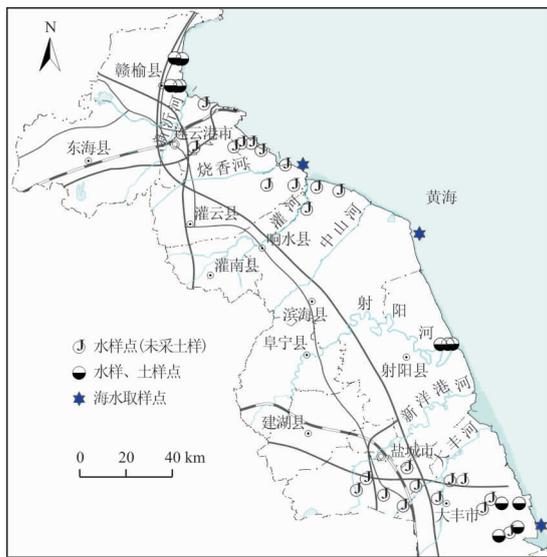


图1 研究区地理位置和取样分布图

2 地质背景

研究区采样点位置属于滨海平原区,区内地势低平。在连云港地区局部存在构造剥蚀低山丘陵。研究区水文地质单元划分属于沂沭泗下游水文地质区和淮河下游水文地质区。

研究区埋深在 5 ~ 10 m 以下的含水层,具微承压性质,为微承压水,属于孔隙水。成井层位于全新统及晚更新统上部,潜水与微承压水含水层组有薄层的粉质黏土相隔,地下水基本处于原始状态,参与潜水水循环量极少。微承压水含水层组底板从西向东呈逐级下降,向东逐渐变厚。浅井的顶板埋深

为 7 ~ 27 m,平均值 16 m;底板埋深为 18 ~ 36 m,平均值为 28 m。

工作区微承压水含水层组位于全新世泛滥沉积、海积或海陆交互相中相对粗粒的沉积层中,岩性以粉土、粉砂为主,并间夹粉质黏土薄层。

3 数据与方法

3.1 样品采集及测试

为了研究土体含盐特征和地下水水化学特征的相关性,在江苏滨海平原布置浅井 13 口,土样和水样都取,另有 20 口井仅取水样(图 1)。浅井附近海域采集海水样 3 件。土样每间隔 2m 取一个,全孔取样。水样每井采取 3 件,添加保护剂,做水质全分析。采样时间为 2015 年 7 月到 10 月。为了保证测试结果的准确性,样品分批及时配送到国土资源部南京矿产资源监督检测中心完成测试分析。

土样品经过烘干、研磨、过筛等前处理之后,分别称取 100g,以 1:5 的土水比例进行溶解、浸提、抽虑过后进行测试。土样易溶盐离子主要包括 8 大离子:阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻,阳离子主要为 Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺。SO₄²⁻、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺ 离子采用全谱等离子直读光谱仪 IRIS Intrepid 进行测试。Cl⁻ 采用硝酸银滴定法测定。CO₃²⁻、HCO₃⁻ 采用酸碱指示剂滴定法测定。pH 采用精密 pH 计 PHS-3C 进行测试。

地下水水温、pH 值、TDS、电导率等参数现场测定。地下水中的 NO₃⁻、NH₄⁺ 采用原子荧光光度计 AFS8120 进行测试。水中的 Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺ 测试方法同土样测试方法。

3.2 研究方法

各指标之间的相关性分析:相关性分析可以揭示地下水主要化学成分之间的相互联系,在水文地球化学研究中被广泛应用,并取得了较好的效果^[10]。各指标之间进行两两比较,相关系数值越大,相关性越高,说明两指标间存在线性关系。

多元线性回归分析:在解决工程问题时,因变量往往需要用两个或两个以上的影响因素作为自变量来解释因变量的变化,当自变量与因变量线性相关时,可以用线性回归模型描述和解决工程问题。多元线性回归模型可以描述为^[11-12]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

式中: β_0 为常数项; $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ 为参数; x_1, x_2, \cdots, x_n 为自变量; ε 为误差项。

4 水土体含盐特征分析

4.1 地下水水化学特征及补给排条件分析

4.1.1 地下水水化学特征 地下水矿化度范围值为 765 ~ 26 944 mg/L, 平均值为 16 710 mg/L(表 1)。水质

表 1 研究区地下水样水化学组分统计

特征值	矿化度	TDS	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	pH
最大值	25634	25552	7542.00	288	545.00	1009.00	14392.00	1974.00	689.00	1.00	8.02
最小值	765	678	160.00	3.08	42.20	23.90	296.00	33.20	164.00	1.00	7.12
平均值	16710	16483	4979.83	126.93	320.57	622.18	9091.58	1078.85	454.17	1.00	7.46

矿化度和 TDS 相关性最高,两者可以当等价指标;矿化度与其它指标相关性由高到低依次为 Cl⁻、Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Ca²⁺、K⁺、HCO₃⁻, 相关系数分别为 0.998、0.995、0.980、0.931、0.890、0.768、-0.142。可以看出矿化度与除了 HCO₃⁻ 的相关性差外,与其它 6 大离子相关性均较好。

水中 Cl⁻ 最不易被土体吸附,成井近海区域海水样品,Cl⁻ 占矿化度的 55%,Na⁺ 占矿化度的 31%,矿化度为 29 002;微承压水平均值 Cl⁻ 占矿化度的 55%,Na⁺ 占矿化度的 30%,矿化度为 19 488。对比发现,微承压水主要化学成分和海水基本一致,且矿化度小于水,说明微承压水形成时还有其它补给来源。成井近海区域海水样品 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 为 0.86,与标准海水的比例系数 0.85^[13] 相近,说明所测试数据真实可靠。

4.1.2 地下水补给排关系分析 微承压含水层虽然与潜水基本相连,但由于不开采,加上间夹粉质黏土薄层,地下水基本处于原始状态,参与潜 waters 水循环量极少。平面上平均水力坡度为 4/100000,基本上无侧向径流。 $\gamma(\text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 是描述地下水蒸发浓缩作用的参数值,比值越小,表示该层地下水蒸发浓缩作用越强烈^[14]。研究区 $\gamma(\text{HCO}_3^-)/\gamma(\text{Cl}^-)$

按矿化度分类:淡水井 1 口,微咸水井 1 口,盐水井 12 口。地下水水化学类型以 Cl-Na 为主,个别为 Cl-Na·Ca·Mg。通过分析知:微承压水矿化度高,以盐水为主,且分布范围广。地下水 pH 值范围值为 7.12 ~ 8.02,平均值为 7.49,呈碱性。

系数最大值 0.65,最小 0.01,平均值 0.15,说明研究区微承压水在地质历史中层受到强烈的蒸发浓缩作用,现阶段微承压水盐度高。

4.2 土体含盐特征及盐分来源分析

4.2.1 成井层位土体含盐特征 土体易溶盐含量大于 0.3% 可以定义为盐渍土。若 Cl⁻ 离子和 2 倍的 SO₄²⁻ 离子的摩尔浓度(每 100g 土中含有的离子毫摩数)比大于 2,且易溶盐含量大于 0.3%,可以定义为氯盐渍土^[15]。土体易溶盐含量小于 0.3% 可以定义为非盐渍土。成井层位盐渍土共计 53 件,盐渍土含盐量最高为 0.79%,为弱盐渍土(表 2);Cl⁻ 离子和 2 倍的 SO₄²⁻ 离子的摩尔浓度比范围为 5 ~ 39,平均值为 9,盐渍土类型为氯盐渍土。非盐渍土共计 29 件,占采样总数的 35%,Cl⁻ 离子和 2 倍的 SO₄²⁻ 离子的摩尔浓度比值范围为 2 ~ 21,平均值为 7,说明土体盐分主要为氯化盐类。土体提取液 pH 值范围为 7.45 ~ 10.22,平均值为 8.16,呈碱性。

易溶盐质量浓度和 Cl⁻、Na⁺ 质量浓度相关性最高;易溶盐质量浓度与其它指标相关性由高到低依次为 SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺, 相关系数分别为 0.787、0.700、0.613、0.535,在 0.01 水平上显著相关;易溶盐质量浓度与 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 不相关。

表 2 研究区土体易溶盐化学组分统计

特征值	易溶盐	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	pH
最大值	7922	2675.00	190.50	192.50	150.00	515.00	475.50	4260.00	765.00	10.22
最小值	252	57.00	3.55	2.50	0.35	64.50	5.00	21.20	16.00	7.45
平均值	3409	1114.12	48.85	47.49	42.12	179.78	18.18	1678.86	279.93	8.16

4.2.2 土体盐分来源分析 研究区全新世地层在沉积时,受多次海侵和海退影响,沉积环境被高矿化

度海水浸渍,微承压水中的 Na⁺ 与地层中的交换性钙离子、镁离子产生了阳离子交换,Na⁺ 被吸附到土

体固体颗粒表面,这时就形成了沉积土层中含有较高的易溶盐类。

微承压水为海相沉积水,特别是 Cl^- 是海水中最主要的稳定常量元素,是反映土体是否被海水浸染最为敏感的因素,成井层位的土中 Cl^- 占土体总易溶盐类 51% (平均值),成井附近海域海水中 Cl^- 占总盐类的 55%,说明海水浸渍是成井段土体高盐度的一个主要的原因。微承压水样 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 比例系数范平均值 0.84,与附近海水基本一致,但略小于附近海水的比例系数,说明地下水中的 Na^+ 与地层中的交换性钙离子、镁离子产生了阳离子交换。

$$SAR = \gamma(\text{Na}^+) / [(\gamma(\text{Ca}^{2+}) + \gamma(\text{Mg}^{2+}) / 2)]^{0.5} \quad (2)$$

式中: SAR 为微承压水中钠吸附比; $\gamma(\text{Na}^+)$ 为土中交换平衡时的钠离子浓度,其它离子物理意义相同;各指标单位均为 $\text{mmol}/100\text{g} \times$ 原子价。

$$ESR = K \cdot SAR \quad (3)$$

式中: ESR 为土体中交换性钠比,微承压水 SAR 值越高,土体中 ESR 值也越高,单位为 $\text{mmol}/100\text{g} \times$ 原子价。 K 为交换平衡常数。

SAR 值越大,土中固体表面解吸出来的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 就越多^[13]。微承压水 SAR 最大值 42.28,最小 34.87,平均值 39.48,据公式(3), ESR 为土体交换性钠比,交换方向取决于水中的 SAR 值。成井层位现阶段土中 ESR 值最大值 32.72,最小 25.36,平均

值 28.96。回归方程斜率为 1.352。据地下水补给排关系分析知:现阶段江苏滨海平原微承压水盐度变化不大,水土体中的离子交换处于一个平衡阶段,平衡系数为 1.352。说明研究区微承压水中的 Na^+ 与地层中的交换性钙离子和镁离子在地质历史中曾发生强烈的交换作用。

4.3 土体含盐特征与微承压水化学特征相关性分析

微承压水离子平均含量排前 5 位的为 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- ,分别约占矿化度的 54%、30%、6%、4%、3%,其他离子总计仅占 3%。土体易溶盐各离子平均含量排前 5 位为 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 K^+ ,分别约占易溶盐的 49%、33%、8%、5%、1%。对比发现,排名前 3 的 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 土和水相同,说明土体易溶盐化学成分和地下水水化学成分基本一致,这里选择含量高的地下水中的 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、矿化度与土中易溶盐、 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 进行相关性分析。

据表 3 知:地下水中的 Na^+ 和土中 Na^+ 含量相关系数为 0.931,说明两者在 0.01 水平上显著相关;地下水中的 Cl^- 和土中 Cl^- 含量相关系数为 0.934,说明两者在 0.01 水平上显著相关;地下水中的 SO_4^{2-} 和土中 SO_4^{2-} 含量相关系数为 0.710,说明两者在 0.01 水平上显著相关。说明土中易溶盐主要指标和地下水中盐分主要指标对应呈线性正相关(图 2)。

表 3 土体易溶盐与地下水化学特征相关性分析

指标	土体					地下水				
	含盐量	Na^+	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	矿化度	Na^+	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
含盐量	1									
Na^+	0.988**	1								
土体 Mg^{2+}	0.758**	0.707*	1							
Cl^-	0.993**	0.973**	0.762**	1						
SO_4^{2-}	0.954**	0.937**	0.744**	0.927**	1					
矿化度	0.918**	0.930**	0.559	0.926**	0.848**	1				
Na^+	0.917**	0.931**	0.549	0.921**	0.845**	0.999**	1			
地下水 Mg^{2+}	0.904**	0.905**	0.589*	0.919**	0.829**	0.987**	0.983**	1		
Cl^-	0.926**	0.936**	0.572	0.934**	0.862**	0.998**	0.995**	0.984**	1	
SO_4^{2-}	0.752**	0.794**	0.326	0.748**	0.710**	0.913**	0.915**	0.897**	0.895**	1

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

5 线性回归模型的建立及应用

地下水矿化度与土体中的易溶盐、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、

Na^+ 质量浓度显著相关,所以选择矿化度与土体中的易溶盐、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 质量浓度建立线性回归模型。公式(4)回归方程相关系数为 0.95, F 显著

性统计量的 P 值为 0.0011, 远小于显著性水平 0.05, 所以该回归方程回归效果显著。土体易溶盐、 Cl^- 质量浓度、 Na^+ 质量浓度、 SO_4^{2-} 质量浓度这 4 个自变量的 T 统计 P 值小于显著性水平 0.05, 因此该 4 项的自变量与地下水矿化度线性正相关。根据式 (4) 可以根据成井层位土体盐度预测深层地下水咸化情况。

$$DOM = -16 SSC + 27\rho^{(\text{Na}^+)} + 22\rho^{(\text{Cl}^-)} + 16\rho^{(\text{SO}_4^{2-})} + 3442 \quad (4)$$

式中: DOM 为矿化度, mg/L ; SSC 为土体易溶盐, mg/kg ; $\rho^{(\text{Na}^+)}$ 为每 1 kg 土中 Na^+ 的质量, mg/kg ; 其他离子的单位和物理意义和 Na^+ 一致。

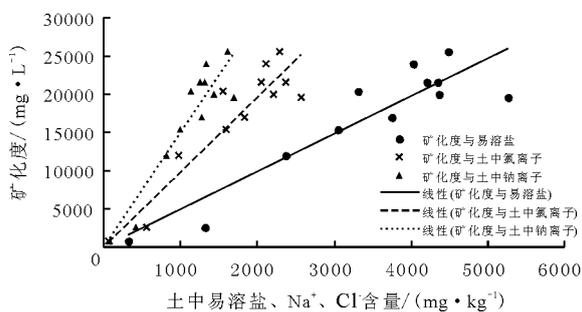


图2 矿化度与土体中易溶盐、 Na^+ 、 Cl^- 离子关系

回归模型在深层地下水咸化中的应用: 在江苏滨海平原地区目前的开采条件下, 水动力条件已发生改变, 地下水流向则由四周向开采较强烈的漏斗区汇流, 尤以古河道附近流速最快, 是地下水径流的主要通道。HYRD1 号井位于南通市如东县光荣乡, 三承压水(深层地下水)在近 50 年内 TDS 飙升 4.6 倍。成井层位土体易溶盐, Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 质量浓度分别为 522、163、131、32 mg/kg , 据模型预测三承压水 TDS 为 2 725 mg/L , 与实测结果 3 046 mg/L 相比, 准确率高达 90%。应用多元线性回归模型后, 节约了成本。就 HYRD1 号孔来说, 采用土样分析仅约为水样分析的 60%。

6 结论

(1) 苏滨海平原地区微承压水为海相沉积水, 以盐水为主, 水化学类型主要为 $\text{Cl}-\text{Na}$ 。微承压水盐分主要来自海水。

(2) 研究区成井层位土体含盐量较高, 以弱盐渍土为主, 盐渍土类型为氯盐渍土。土体盐分主要来自高矿化度带下水浸渍。土体中盐分主要来自海水浸渍, 且地下水中的 Na^+ 与地层中的交换性钙离子、镁离子产生了阳离子交换。

(3) 土中易溶盐主要指标和地下水中盐分主要指标对应呈线性正相关。建立了矿化度和成井层位土体易溶盐各指标的线性回归模型, 效果良好。应用多元线性回归模型后, 节约了成本。

参考文献:

- [1] 李攻科, 王卫星, 曹淑萍, 等. 天津滨海土壤盐分离子相关性及其采样密度研究[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 662-670.
- [2] 葛云, 顾佳, 王曼, 等. 连云港徐圩新区盐渍土类型、分布特征及其对工程建设影响[J]. 海岸工程, 2012, 31(1): 36-45.
- [3] Ghassemi F, Jakeman A J, Nix H A. Salinisation of land and water resources; Human causes, extent, management and case studies[J]. Canberra: UNSW Press, 1995: 1-3.
- [4] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 9-15.
- [5] 刘炳成, 李庆领. 土壤中水、热、盐耦合运移的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 14-16.
- [6] Guo Haipeng, Jiao Jiu Jimmy. Impact of coastal land reclamation on ground water level and the sea water interface[J]. Groundwater, 2007, 45(3): 362-367.
- [7] 杨吉龙, 裴艳东, 田立柱, 等. 天津滨海新区围海造陆对沿海低地浅层地下水环境的影响[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1653-1660.
- [8] 黄敬军, 陆华. 江苏沿海地区深层地下水开发利用现状及环境地质问题水文[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 64-68.
- [9] 徐玉琳. 江苏省南通市深层含水系统地下水水质咸化特征及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 45-49.
- [10] 彭文祥, 马斌. 平底水垫塘泄洪振动的相关性特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 174-177.
- [11] 陈金国, 袁康, 董育烦. 基于多元线性回归分析的土坡有限元失稳判据定量研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 709-713.
- [12] 常远勇, 谈建国, 彭杰, 等. 上海市日供水量与气象要素的相关性分析及预测模型的建立[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 32-36.
- [13] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 地质出版社, 1993.
- [14] 朱亮, 杨明楠, 张玉玺, 等. 东胜城区及周边地区浅层地下水硝酸盐分布及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 37-41.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50021-2001, 岩土工程勘察规范(2009年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 82-84.