

浅层地下水水化学特征与土体盐分相关性研究

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

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 2. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210049)

摘要: 为研究南通地区浅层地下水与土体盐分特征的相关性,采集了31件水样、220件土样,并收集了60组水质资料,分析了浅层地下水水化学特征和土体盐分特征。研究表明:浅层地下水自西向东,TDS逐渐增大,主要为咸水和盐水,水化学类型为Cl—Na型,TDS与各离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})的相关性高;土体盐分特征和地下水基本相似,自西向东逐渐增大,随着深度的加深也逐渐增大,盐渍土类型为氯盐渍土,以弱盐渍土为主,表明土体中的盐分主要来自于地下水;地下水的TDS和土体的总盐量、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的相关性都很高,为此建立多个关于TDS与土体盐分特征的线性预测模型,平均相关系数达0.839,平均预测准确率达到了88.93%,效果良好,从而可在不钻探成井的条件下,依靠采取的土样判断地下水的TDS,节省了钻探成井的费用。

关键词: 浅层地下水; 水化学特征; 土体盐分; 回归分析; 相关性; 南通地区

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0089-08

Correlation between shallow groundwater hydrochemical characteristics and soil salinity

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

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China; 2. Key Laboratory of Earth Fissures

Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210049, China)

Abstract: In order to study the correlation between the shallow groundwater and soil salinity in Nantong area, 31 water samples, 220 soil samples and 60 groups of water quality data were collected to analyse the characteristics of the shallow groundwater and soil salts. The results show that the total dissolved solids (TDS) in the shallow groundwater increases gradually from west to east which is highly correlated with the ions in the water (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}), and the groundwater is mainly constituted of Cl^- Na type salty water and saline water. The salt content of the soil is basically similar to that of the groundwater, which increases gradually from west to east and also increases gradually with the depth of the soil. The saline soil type is chloride saline soil, dominated by weak saline soil, indicating that the salts in the soil mainly come from the groundwater. The TDS of the groundwater is highly correlated with the total soil salts and the ions (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}). Based on these findings, several linear prediction models of TDS and soil salinity were established. With these models, the predicted average correlation coefficient can reach up to 0.839, and the average prediction accuracy reaches 88.93%, demonstrating the excellent performance of the models. This presents a new approach to finding out the TDS content in the groundwater from soil samples, which saves the cost of drilling wells.

Key words: shallow groundwater; hydrochemical characteristics; soil salinity; regression analysis; correlation; Nantong Area

1 研究背景

地下水与土体中的盐分紧密联系,地下水及土

体盐分主要与地质条件、地层时代、历次海侵、灌溉条件等因素影响有关^[1-2]。沿海地区浅层地下水和土体盐分由于受到大气降雨和农业灌溉的影响,盐

收稿日期:2019-11-14; 修回日期:2020-02-33

基金项目:连云港城市地质调查项目(苏国土资函[2018]374号);中国地质调查局项目(1212011220005);江苏省地勘基金项目(苏国土资函[2014]842)

作者简介:李进(1987-),男,安徽芜湖人,硕士,工程师,主要从事水文地质、环境地质等方面的研究工作。

分会逐渐降低,而当降雨不足、气候干旱时,地下水位下降,受毛细作用的影响,下部咸水中的盐分会返回地表^[3-4]。在我国沿海地区,当地下水位较浅时,地下水 TDS 越高,土体盐度也越高,两者具有正相关性,地下水中的主要离子含量和土体中的离子含量基本相同^[5]。由于受多次海侵的影响,南通地区浅层地下水多为咸水、盐水等,深层地下水主要以淡水为主,但随着人类大规模开采地下水,部分地区的深层地下水也发生了水质咸化的现象,主要是由于浅层地下水中的盐分越流补给到深层地下水中^[6]。

由于地下水与土体一直在发生各种离子的交换作用,两者中主要离子的含量基本相同,因而具有相关性分析的前提条件。相关性分析在水文地球化学的研究中被广泛应用^[7-10],通过分析各指标之间的相关性,若得出的相关性系数越高,表明指标之间的内在关系越密切^[11-15]。在得到多个指标之间的相关性系数后,需要表达某个指标与其他多个指标之间的关系时,可以采用多元线性回归分析,建立线性回归方程^[16-17]。

在以往的研究中,以分析浅层地下水水化学为主,而分析土体盐分的较少,涉及到土体盐分的研究范围也多在潜水位波动带之内,其深度大多为 3~4 m,而本次研究的钻孔深度达 20~30 m,最深的钻孔 HY41 可达 150 m,并且在研究范围上并非就某一场地或某个港口进行分析评价,而是对南通地区进行整体的分析评价。另外,在已有的研究成果中,单独分析地下水水化学的或者土体盐分的较多,而把这两个具有相关性的要素作为整体进行分析,并建立线性回归方程的较少,本文在详细分析 220 件土样和 91 件水样的基础上,对南通地区浅层地下水和土体盐分特征进行了系统分析,并建立了多个线性回归方程。

2 研究区概况

南通,江苏省地级市,位于江苏东南部,长江三角洲北翼,面积 8 544 km²。东临黄海,南倚长江,有“江之尾、海之头”的地理位置,素有“江海门户”之称。该区属中纬度北亚热带湿润气候区,海洋性季风气候特征明显,四季分明,光照充足,气温温和,雨水充沛,无霜期长,春季天气多变,夏季多台风,秋季天高气爽,冬季多西北风,年平均气温 15℃,年平均降水量 1 030 mm,台风、冰雹、龙卷风为常见的灾害性气候。

南通是长江三角洲水文地质区的一部分,浅层

地下水主要赋存在第四系松散岩类孔隙中,受沉积环境的影响在垂向具有显著的分层特征,地下水质变化主要受古海平面升降(海侵、海退)及人为因素的影响^[18]。本次研究的浅层地下水主要为全新统潜水含水岩组,为冰后期堆积地层,以河口-滨海相为主,伴有河流、湖泊相堆积。含水砂层主要沿分支古河道、当代河口和滨海岸分布,受全新世海进的作用,含水岩组中堆积了淤泥质黏土和亚黏土,使其分为上部潜水含水层和下部微承压含水层。

3 样品采集与测试

为研究南通地区浅层地下水与土体盐分的相关性,分别于 2015 年 9~10 月和 2017 年 5~6 月在南通滨海地带布置了 16 口水文井,每口水文井均采集水样和土样,土样自上而下每隔 2 m 取 1 个,共采集 16 件水样和 220 件土样,另在其他浅层水文井中采集 12 件水样,在黄海采集 3 件海水样品,并收集了 60 组地下水水质资料。研究区采样点分布位置和浅层地下水 TDS 等值线见图 1。

地下水的水温、pH 值、TDS、电导率等参数均在采样现场进行测定;Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Fe²⁺、Fe³⁺、Al³⁺、SO₄²⁻采用全谱等离子直读光谱仪 IRIS Intrepid 进行测试;NO₃⁻、NH₄⁺采用原子荧光光度计 AFS8120 进行测试;CO₃²⁻、HCO₃⁻采用酸碱指示剂滴定法测定;Cl⁻采用硝酸银滴定法测定;NO₃⁻、NH₄⁺采用原子荧光光度计 AFS8120 进行测试。土体中的 pH 值采用精密 pH 计 PHS-3C 进行测试,阳离子 Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺和阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻的测定方法同地下水的测定方法。在上述土体各项目测试中,先称取土样 100 g,在溶解过滤后再进行测试。

4 浅层地下水的水化学特征

由图 1 可看出,南通地区浅层地下水由于受到全新世海侵的影响,TDS 总体表现出西低东高的特征,并呈条带状分布。在西场-白蒲-兴仁-小海-海门一线以西的地区,TDS 多为小于 3 g/L 的淡水和微咸水,面积约占研究区的 1/3;往东到袁庄-岔河-四甲-悦来-南阳一带,TDS 在 3~10 g/L 之间,为咸水,面积也约占 1/3;再往东到洋口-丰利-三余-吕四-向阳-寅阳一带,TDS 在 10~15 g/L 之间,水质较差,为盐水;最东部的滨海地带水质最差,TDS 多大于 15 g/L,最高可达 26.64 g/L(南通通州湾)。由于南部浅层地下水受长江水的补

给,发生淡化现象,因而在长江沿岸地带的 TDS 显著偏低,等值线向北偏移。

对本次采集的地下水水样测试结果进行统计分析,地下水水样主要离子质量浓度统计见表1,地下水水样水化学组分特征值统计见表2。由表1和2可看出,地下水水样中,含量最大的阳离子为 Na^+ ,其浓度平均值为 4 572.57 mg/L,含量最大的阴离子为 Cl^- ,其浓度平均值为 8 691.78 mg/L,水化类型全部为 Cl^- — Na 型;TDS 在 3 748 ~ 26 646 mg/L 之间,平均值为 15 059 mg/L;水样 pH 值在 6.93 ~ 8.52 之间,平均值为 7.46,水质偏碱性。

28 个地下水水样的水质按 TDS 大小分类可分为 6 个咸水 (3 ~ 10 g/L) 和 22 个盐水 (10 ~ 50 g/L),其中盐水居多。

对地下水水化学组分进行相关性分析,结果见表3。由表3可见,TDS 与各离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}) 的相关性较高,相关性系数分别为 0.800、0.992、0.462、0.963、0.995、0.550,其中与 Cl^- 相关性最高,相关性系数达到 0.995,主要是由于 Cl^- 是水中的稳定离子,不易与其他离子发生反应^[5],其含量也最高,平均值为 8 691.78 mg/L。TDS 与 HCO_3^- 的相关性较差,相关性系数仅为 0.195。 K^+ 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 相关性较高,

相关性系数分别为 0.827、0.727、0.776、0.665, Na^+ 与 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 相关性较高,相关性系数分别为 0.963、0.985、0.538, Cl^- 与各离子的相关性也较高。

5 土体的盐分特征

5.1 土体含盐特征

对采集的 220 个土样盐分化学组分特征值进行统计,结果见表4。由表4可知,土体中含量最大的阳离子为 Na^+ ,其含量在 118 ~ 4 225 mg/kg 之间,平均值为 1 530.22 mg/kg;含量最大的阴离子为 Cl^- ,其含量在 108 ~ 6 515 mg/kg 之间,平均值为 2 310.55 mg/kg。总盐量在 616 ~ 12 313 mg/kg 之间,平均值为 4 493.63 mg/kg。pH 值在 7.38 ~ 9.84 之间,平均值为 8.24,呈碱性。

根据盐渍土的定义:对易溶盐含量大于 0.3%,且具有溶陷、盐胀、腐蚀等特性的土^[19-20],土样中有 154 个盐渍土,66 个非盐渍土。盐渍土按含盐化学成分分类, $c(\text{Cl}^-)/2c(\text{SO}_4^{2-})$ 比值在 3.71 ~ 44.80 之间,平均值为 12.31,全部为氯盐渍土;非盐渍土的 $c(\text{Cl}^-)/2c(\text{SO}_4^{2-})$ 比值在 0.47 ~ 28.52 之间,平均值为 11.18,表明非盐渍土中所含盐分也主要为氯盐。按含盐量分类,土样中有弱盐渍土 66 个,中盐渍土 10 个,以弱盐渍土为主。

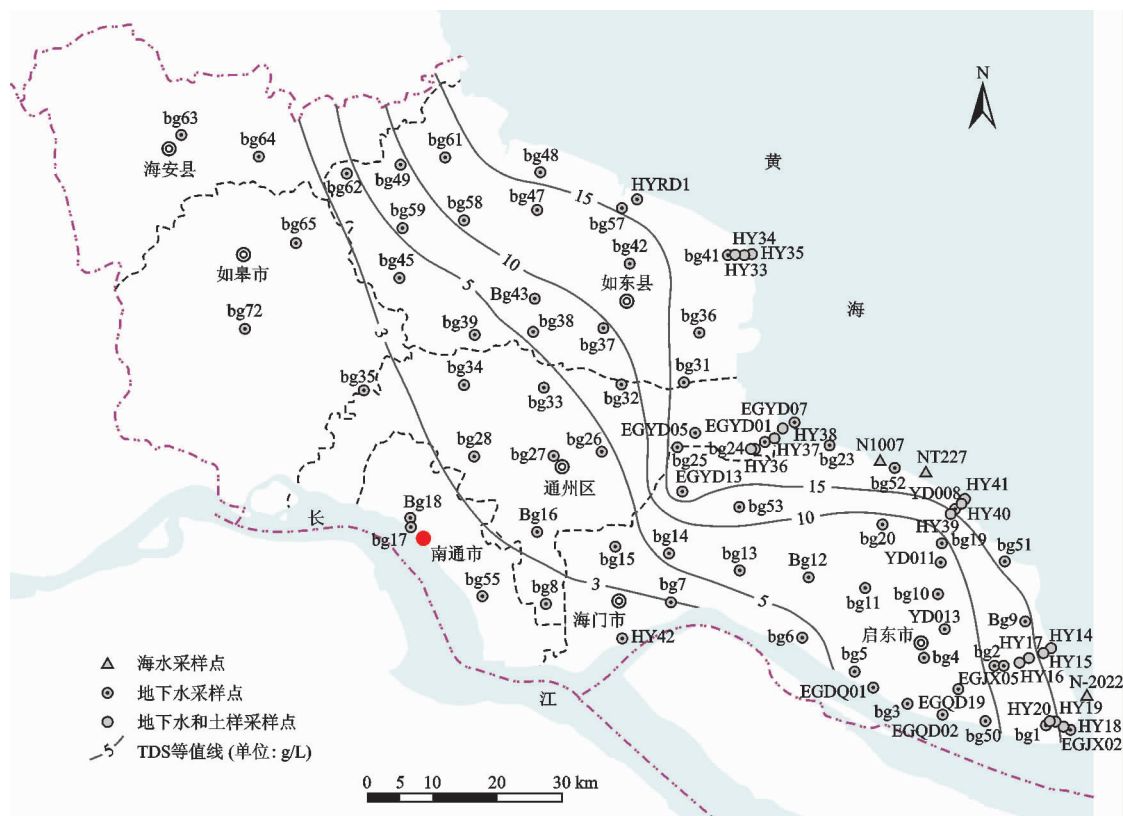


图1 研究区采样点分布位置及浅层地下水 TDS 等值线图

表 1 研究区地下水水样主要离子质量浓度统计表

采样点编号	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	TDS
EGYD01	122	6814	423	809	12212	273	984	<1	21204
EGYD05	142	5874	231	699	10759	234	984	<1	18486
EGYD07	226	8376	271	1000	14991	1379	597	<1	26646
EGYD13	111	5630	203	568	9117	1121	719	<1	17215
EGJX02	76.4	5434	784	637	10675	575	672	<1	18576
EGJX05	195	7030	187	784	12380	2	955	<1	21110
EGQD01	29.3	1633	216	219	3137	2	821	<1	5712
EGQD02	69.5	3938	632	474	7971	188	651	<1	13645
EGQD19	49.7	2852	228	398	5079	77.9	909	<1	9178
YD008	152	7392	636	877	13665	1012	580	<1	24060
YD011	57.3	5258	749	668	10892	234	609	<1	18197
YD013	29.0	2269	235	248	4278	5.13	698	<1	7437
HY14	112	4891	169	656	9552	222	723	<1	16009
HY15	98.2	3426	129	437	6086	558	1214	<1	11370
HY16	119	4475	193	636	8157	846	930	<1	14927
HY17	41.1	1404	89.4	211	2663	77.6	497	<1	4835
HY18	108	4785	126	622	9637	14.1	685	<1	15686
HY19	67.7	3214	108	418	6408	15.6	614	<1	10572
HY20	75.0	3415	138	447	6974	10.4	646	<1	11437
HY33	137	5727	370	735	11343	870	845	<1	19800
HY34	62.7	4725	1095	592	10452	320	800	<1	17760
HY35	103	5999	371	710	11667	27.4	1103	<1	19622
HY36	40.5	1114	108	85.8	1904	224	421	<1	3748
HY37	61.0	1724	89.8	149	3022	222	363	<1	5520
HY38	242	6497	437	563	12194	1616	310	<1	21781
HY39	99.8	4255	191	522	8426	105	778	<1	14175
HY40	104	5063	314	597	10330	55.9	740	<1	17059
HY41	128	4818	255	531	9399	135	766	<1	15884

表 2 研究区地下水水样水化学组分特征值统计表

特征值	质量浓度 $\rho / (mg \cdot L^{-1})$								pH
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	
最大值	242	8376	1095	1000	14991	1616	1214	<1	26646
最小值	29	1114	89.4	85.8	1904	14.10	310	<1	3748
平均值	102.07	4572.57	320.65	546.17	8691.78	372.21	736.21	<1	15059

对土体化学组分进行相关性分析,结果见表 5。由表 5 可见,总盐量与各离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}) 的相关性较高,相关性系数分别为 0.916、0.998、0.652、0.850、0.996、0.773,在 0.01 水平上显著相关,与 Na^+ 、 Cl^- 相关性最高,主要是由于 Na^+ 、 Cl^- 是土体中的稳定离子,不易与其他离

子发生反应。总盐量与 HCO_3^- 相关性较差,相关性系数为 -0.389。 K^+ 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 相关性较高,相关性系数分别为 0.905、0.764、0.906、0.808, Na^+ 与 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 相关性较高,相关性系数分别为 0.826、0.997、0.741, Cl^- 与其他各离子的相关性也较高。

5.2 土体盐分分布特征

由于研究区内地形地貌、地下水质、海侵范围等各不相同,土体盐分特征与地下水相似,也存在水平和垂直向的差异。为此布置了一条勘探线,自西向东依次为 HY42、HY20、HY19、HY18 采样点,位于西部海门镇附近的 HY42 土体的各离子含量和总盐量均

为最小, HY42 位于长江附近,除受海水的影响较小外,还受到长江水的补给、稀释作用,各盐分含量较小;位于东部启东寅阳镇附近的 HY20、HY19、HY18,由于受海水的影响,其土体中各离子含量和总盐量逐渐增大。该 4 个特征采样点土体盐分化学组分统计见表 6,各采样点土体总盐量随深度的变化见图 2。

表 3 研究区地下水水化学组分相关性分析结果

指标	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
TDS	1							
K ⁺	0.800	1						
Na ⁺	0.992	0.827	1					
Ca ²⁺	0.462	0.008	0.377	1				
Mg ²⁺	0.963	0.727	0.963	0.375	1			
Cl ⁻	0.995	0.776	0.985	0.470	0.964	1		
SO ₄ ²⁻	0.550	0.665	0.538	0.207	0.434	0.479	1	
HCO ₃ ⁻	0.195	0.023	0.214	-0.025	0.329	0.200	-0.238	1

表 4 研究区土体土样盐分化学组分特征值统计表

特征值	含量 $c/(mg \cdot kg^{-1})$									pH
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	总盐量	
最大值	176	4225	311	236	6515	1340	355	<5	12313	9.84
最小值	8.90	118	3.55	1.40	108	32.10	61	<5	616	7.38
平均值	73.11	1530.22	46.74	47.01	2310.55	292.61	186.86	<5	4493.63	8.24

表 5 研究区土体易溶盐化学组分相关性分析结果

指标	总盐量	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
总盐量	1							
K ⁺	0.916	1						
Na ⁺	0.998	0.905	1					
Ca ²⁺	0.652	0.453	0.633	1				
Mg ²⁺	0.850	0.764	0.826	0.837	1			
Cl ⁻	0.996	0.906	0.997	0.639	0.852	1		
SO ₄ ²⁻	0.773	0.808	0.741	0.656	0.744	0.725	1	
HCO ₃ ⁻	-0.389	-0.497	-0.364	-0.443	-0.591	-0.410	-0.435	1

表 6 4 个特征采样点土体盐分化学组分统计表

采样点 编号	含量 $c/(mg \cdot kg^{-1})$							
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	总盐量
HY18	51.67	1268.72	48.54	42.08	1874.44	237.60	202.61	3725.67
HY19	39.44	1150.63	42.39	31.03	1670.00	134.19	228.00	3299.64
HY20	42.15	1042.75	44.92	38.29	1562.31	170.81	197.56	3102.77
HY42	23.10	267.95	25.50	11.16	263.74	146.64	200.50	948.57

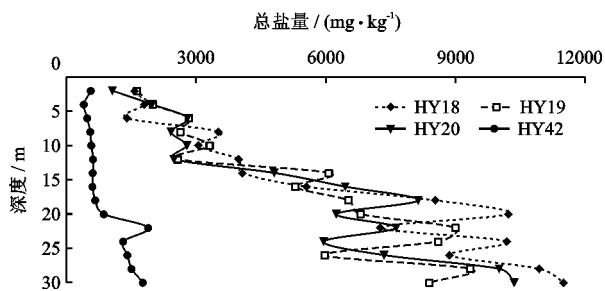


图2 4个特征采样点土体总盐量随深度的变化

选择 HY15 和 HY16 两个采样点的土样, 分析其主要化学组分含量随深度的变化规律, 结果见图

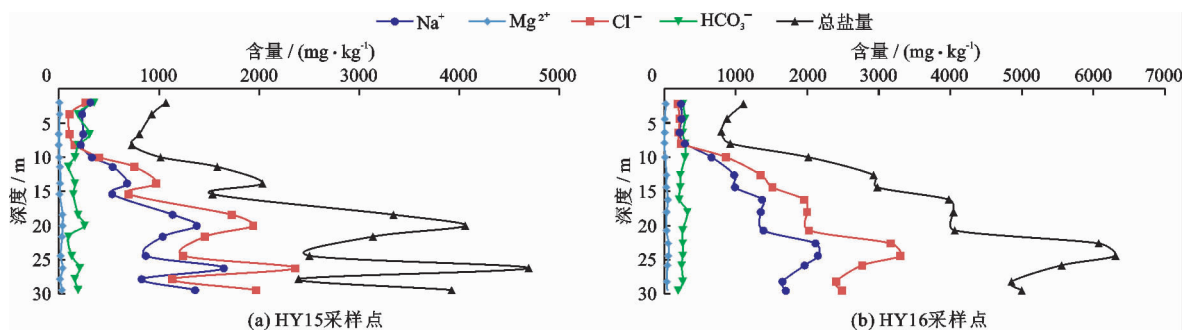


图3 HY15 和 HY16 采样点土体主要化学组分含量随深度的变化规律

6 线性预测模型的建立与应用

6.1 土体盐分与地下水化学组分相关性分析

表7为研究区土体与地下水主要化学组分含量平均值。通过分析表7可以发现, 土体中易溶盐主要为 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等离子, 平均含量分别占 48.89%、33.28%、6.67% 和 6.42%; 地下水中主要离子为 Cl^- 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 等, 平均含量分别为 56.47%、28.71%、5.75% 和 3.52%, 表明土体和地下水中主要离子基本一致, 且各离子平均含量百分比也基本相同。这主要是由于在地下水的形成过程中与土体发生了各种水岩作用, 包括阳离子交替吸附作用、岩盐溶解作用、硫酸盐还原作用、铝硅酸盐和碳酸盐矿物作用等, 使土体中的离子逐渐向地下水发生迁移^[8-9]。

表7 研究区土体与地下水主要化学组分含量平均值

项目	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
土体	1.77	33.28	1.08	1.03	48.89	6.67	6.42
地下水	0.71	28.71	2.28	3.52	56.47	2.56	5.75

以上分析表明, 土体与地下水中离子含量有显著的相关性, 通过计算相关系数进一步定量分析土

3。由图3可见, 随着深度的增加, 土体中 Na^+ 、 Cl^- 含量显著增加, Mg^{2+} 、 HCO_3^- 含量增加幅度不明显, 总盐量的增加趋势与 Na^+ 、 Cl^- 保持高度一致, 这也印证了表5中总盐量与 Na^+ 、 Cl^- 相关性高、相关性系数高达 0.998 和 0.996 的结论; Na^+ 、 Cl^- 含量在 8 m 以浅增加幅度不大, 表明浅层土体的含盐量不大, 这主要是由于大气降雨、地表水等淡水对浅层土体的冲洗、淋滤作用, 使土体盐分含量减少, 而 8 m 以下土体受海水的影响, 土体中 Na^+ 、 Cl^- 含量急剧增大, 在 25 m 左右深度处达到峰值, 这一现象在南通地区普遍存在。

体易溶盐与地下水化学组分各离子的相关性, 结果及表8。由表8可看出, 土体中的 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与地下水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 相关性系数分别为 0.782、0.720、0.712 和 0.693, 相关程度都很高。地下水的 TDS 与土体的总盐量、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的相关性也很高, 相关性系数分别为 0.735、0.812、0.714、0.714、0.741 和 0.835。与 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在 0.01 水平上显著相关, 与总盐量、 Na^+ 、 Mg^{2+} 在 0.05 水平上显著相关。

6.2 建立预测模型

通过相关性分析可知, 土体的盐分含量与地下水 TDS 存在线性相关性, 因此可以建立数学模型来预测土体的总盐量 SSC 和地下水 TDS 值。TDS 与总盐量 SSC、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 这 6 个指标的相关性高(表8), 可以建立 TDS 的多元线性回归预测模型。

利用 SPSS 软件的统计分析功能建立了 7 个 TDS 与土体参数的线性回归方程, 见表9。由表9可知, 这 7 个方程的回归模型预测效果良好, 相关系数平均值达 0.839, 最大值为 0.935, F 显著性统计量平均值为 0.0125, 小于 0.05, 最小值仅为 0.006; 利用 7 个回归预测方程, 对南通地区的地下水 TDS 进行预测, 预测准确率平均值达到了 88.93%, 准

确率最大值为公式(3),达 90.62%,表明 TDS 与土中的 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度关系最为密切,主要是由于土体中 K^+ 、 Cl^- 很稳定,不易被转化。

通过对回归预测方程分析可知,在水文地质钻

探中,可以通过测定岩芯中土体的盐分含量来推测对应含水层的 TDS,这样就能在成井之前了解各含水层的水质状况,以便寻找目的含水层,从而节省成井费用。

表 8 研究区土体易溶盐与地下水化学组分的相关系数

指标	地下水							
	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
总盐量	0.735	0.692	0.744	0.293	0.333	0.705	0.609	-0.079
K^+	0.812	0.782	0.826	0.256	0.437	0.774	0.690	-0.047
Na^+	0.714	0.676	0.720	0.293	0.309	0.684	0.594	-0.080
Ca^{2+}	0.215	0.336	0.251	-0.033	0.056	0.199	0.373	-0.319
Mg^{2+}	0.714	0.702	0.773	0.094	0.474	0.694	0.612	-0.097
Cl^-	0.741	0.685	0.749	0.303	0.351	0.712	0.607	-0.063
SO_4^{2-}	0.835	0.789	0.858	0.259	0.444	0.811	0.693	-0.106
HCO_3^-	-0.656	-0.476	-0.684	-0.098	-0.693	-0.647	-0.473	-0.122

表 9 TDS 与土体各参数预测模型一览表

回归预测方程	公式 编号	相关 系数	F 显著性 统计量	预测准 确率/%
$TDS = 21940 - 1.80 c^{(K^+)} - 84 c^{(Na^+)} - 315 c^{(Mg^{2+})} + 49 c^{(Cl^-)} + 85 c^{(SO_4^{2-})}$	(1)	0.935	0.026	90.26
$TDS = 18487 - 27 SSC + 61 c^{(K^+)} + 43 c^{(Cl^-)} + 63 c^{(SO_4^{2-})}$	(2)	0.930	0.009	88.03
$TDS = 8873.02 + 97.05 c^{(K^+)} - 3.63 c^{(Cl^-)} + 37.31 c^{(SO_4^{2-})}$	(3)	0.870	0.015	90.62
$TDS = 7256.47 + 52.42 c^{(K^+)} + 24.05 c^{(SO_4^{2-})}$	(4)	0.848	0.006	90.52
$TDS = 7691.55 + 134.94 c^{(K^+)} - 0.21 c^{(Cl^-)}$	(5)	0.812	0.013	88.93
$TDS = 6750.97 + 4.53 c^{(Cl^-)}$	(6)	0.741	0.009	87.11
$TDS = 6048.58 + 2.52 SSC$	(7)	0.735	0.010	87.04

注:TDS 为地下水总溶解性固体含量,mg/L; SSC 为土体总易溶盐含量,mg/kg; $c^{(K^+)}$ 为每 1 kg 土中 K^+ 的含量,mg/kg, $c^{(Na^+)}$ 、 $c^{(Mg^{2+})}$ 等含义与此相同。

7 结 论

(1)南通地区浅层地下水受全新世海侵影响,水质较差,自西向东 TDS 逐渐增大,多为咸水和盐水,水化学类型主要为 Cl^- — Na 型,TDS 与各离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})的相关性高。

(2)南通地区浅层土体含盐量较高,总盐量在 616~12 313 mg/kg 之间,主要为弱盐渍土,盐渍土类型全部为氯盐渍土,总盐量与各离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})的相关性高。

(3)土体盐分的分布特征与地下水的水质特征基本一致,在水平方向上,自西向东盐分逐渐增多,在垂直方向上,随着深度的增加,盐分也逐渐增多,这表明土体中的盐分主要来自于地下水。

(4)土体与地下水中离子含量存在很大的相关性,地下水 TDS 与土体中总盐量 SSC、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 这 6 个指标相关性高,建立了 7 个 TDS 与土体参数的多元线性回归预测方程,预测准确率平均值达到了 88.93%,预测效果良好,可以节省钻探成井的成本。

参考文献:

[1] 苟富刚,龚绪龙,李 进,等. 江苏滨海平原微承压水位水土体含盐特征及其相关性分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):72-76.

[2] 苟富刚,龚绪龙,杨 磊,等. 江苏沿海地区土体含盐特征及指示作用[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(6):1380-1387.

- [3] 张聪伟,朱 琴,刘春原,等. 滦河入海口三角洲地区地下水及土壤盐度分析[J]. 人民长江,2017,48(15):17-20.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 周慧芳,谭红兵,高 将,等. 南通地区地下水咸化机理分析及改良措施[J]. 水资源保护,2015,31(4):70-76.
- [7] 张 岩,刘 彦,毛 磊,等. 南通滨海新区地下水应急水源风险预测[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):100-106.
- [8] 周慧芳,谭红兵,张文杰. 南通地区地下水循环与水化学时空变化规律研究[J]. 人民长江,2014,45(23):103-108.
- [9] 张 岩,付昌昌,毛 磊,等. 江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(4):598-605.
- [10] 付昌昌,李向全,张 岩,等. 盐城滨海平原地下水质量现状及健康风险评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):54-60.
- [11] 彭 亮,郑淑文,何 英,等. 基于 MODIS 的积雪时空变化与 CMADS 气象因子相关性研究——以塔什库尔干河流域为例[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4):53-62.
- [12] 熊 峰,甘义群,段艳华. 江汉平原地下水中氮素与砷迁移富集的相关性研究[J]. 安全与环境工程,2015,22(2):39-43+48.
- [13] 孙 娟,杨淑英,沈浩松,等. 基于 SPSS 相关性分析的地下水污染因果关系判定[J]. 中国环境管理干部学院学报,2016,26(6):3-6+34.
- [14] 丁文荣,李玉辉. 岩溶区植被覆盖变化与气候波动的相关性——以云南石林为例[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):40-45+51.
- [15] 刘中业,徐建国,祁晓凡,等. 地下水电导率与矿化度相关关系分析——以鲁北平原为例[J]. 山东国土资源,2013,29(9):57-60+64.
- [16] 王 森,陆 阳,郑玉萍,等. 基于线性回归分析的地下水开采与地面沉降相关关系研究——以天津市为例[J]. 中国水运(下半月),2015,15(7):108-110.
- [17] 白高峰,张燕君,宣学丽,等. 线性回归法在地下水水质分析中的应用[J]. 地下水,2014,36(2):14-16.
- [18] 朱锦旗,于 军,龚绪龙,等. 江苏沿海地区地下水系统与地下水资源调查评价报告[R]. 江苏省地质调查研究院,2018.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土工程勘察规范(2009 年版):GB 50021-2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盐渍土地建筑技术规范:GB/T 50942-2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.

(上接第 88 页)

- [25] 钟科元,郑粉莉. 1960-2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 自然资源学报,2017,32(2):278-291.
- [26] 程金文,岳大鹏,达 兴,等. 陕南地区 1960-2014 年降雨侵蚀力变化研究[J]. 山地学报,2017,35(1):48-56.
- [27] 刘宇林,赵广举,穆兴民,等. 近 55 年渭河流域降雨侵蚀力变化及对输沙量的影响[J]. 中国水土保持科学,2019,17(3):15-22.
- [28] 曾 瑜,厉 莎,胡煜彬. 1961-2014 年鄱阳湖流域降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(1):106-114.
- [29] 郑 哲,邹 进,潘 锋,等. 1961-2010 年怒江流域降雨侵蚀力的时空变化特征[J]. 中国水土保持科学,2018,16(5):16-22.
- [30] 肖 蓓,崔步礼,姜宝福,等. 山东省不同地形区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 地球环境学报,2019,10(3):267-280.
- [31] PANAGOS P, BORRELLI P, MEUSBURGER K, et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records[J]. Scientific Reports, 2017, 7:4175.
- [32] 俱战省,张加兵,柏子昌. 山区坡谱信息熵与水土流失地形因子关系探讨[J]. 测绘科学,2019,44(3):86-90.