

基于 BP 神经网络的北京昌平山前平原地下水水质评价

孔 刚^{1,2}, 王全九¹, 黄 强¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 北京市水影响评价中心, 北京 100161)

摘 要: 该文采用单因子评价方法对昌平区浅层地下水的超标因子进行筛选, 结合水文地球化学理论探讨各因子超标原因, 分析浅层地下水水质的空间分布特征, 并采用 BP 神经网络法对水质进行综合评级。从综合评级结果来看, 12 眼监测井中 1 眼为 V 类水质, 5 眼为 IV 类水质, 6 眼为 III 类水质。单因子筛选结果表明, 总硬度、总溶解性固体、氮素、氟化物等为该区最主要的超标因子。经分析可知, 山前平原地带浅层地下水中氟化物为原生污染, 氮素污染物主要来源于地表污染物下渗, 总硬度和总溶解性固体的升高主要受地表污染物下渗、氮素的迁移转化等因素的影响。研究可为研究区地下水管理工作提供可靠数据。

关键词: 地下水; 水质; 神经网络; 评价; 总硬度; 北京

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.023

中图分类号: P641.8 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-Supp.1-0150-07

孔 刚, 王全九, 黄 强. 基于 BP 神经网络的北京昌平山前平原地下水水质评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 150-156. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.023 http://www.tcsae.org

Kong Gang, Wang Quanjiu, Huang Qiang. Evaluation of groundwater quality in Changping piedmont plain of Beijing based on BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 150-156. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.023 http://www.tcsae.org

0 引 言

自 1999 年以来, 北京遭遇了连年干旱, 地表水资源严重不足, 伴随社会经济的快速发展, 工农业及生活用水量不断增加, 水资源供需矛盾十分尖锐。地下水因供水稳定、水质良好, 其开发利用程度不断加大, 2011 年北京市地下水开采量为 20.9 亿 m³, 占总供水量的 59%。北京市中心城区的总硬度和硝酸盐氮在 20 世纪 70、80 年代就已出现升高的现象^[1-2]。刘宏斌等^[3-4]研究发现北京平原区浅层地下水硝酸盐氮污染十分严重, 深层地下水污染亦不容乐观。昌平平原区位于北京北部山前地带, 是北京平原区重要的地下水补给区, 地下水中的硝酸盐氮及总硬度已出现了一定程度的超标, 因此开展昌平区地下水水质评价工作对首都水资源安全及经济社会发展具有重要意义。

地下水水质评价是一个随机、非线性、复杂的系统。传统方法通过人为构造线性隶属函数和给定权值来评价水质, 人为影响较大, 且不能解决水质的非线性问题, 评价结果与客观实际存在一定误差。BP 人工神经网络法、模糊综合评价法、灰色聚类法、灰色系统法多元线性回归法等为常用的非线性评价方法。模糊综合评价法能够比较全面地反映地下水的水质情况, 它对地下水污染的分界进行过渡性模糊描述, 以隶属度表示地下水的隶属关系, 避免了指数评价方法在分类指数上的人为影响,

但计算比较繁琐, 存在水质类别判断不准确或结果不可比的问题^[5-7]。灰色聚类法通过灰色参数表示水质等级的分级指标, 具有精度高的特点^[8-10]。灰色关联度法采用关联度来量化研究系统内各因素的相互关系、相互影响, 在地下水系统中多用于确定某一参考序列与多个比较序列之间的关系^[11-13]。灰色评价法在一定程度上能够避免水质参数异常值的干扰性, 但只有满足曲线相似的情况下评价精度才较高。多元线性回归法通过确定多个因素之间的定量关系来建立数学模型, 对地下水水质进行评价, 但受统计数据的影响很大, 而且要求样本具有较好的分布^[14-16]。

BP 神经网络是一种基于人工智能的非线性动力学系统^[17-20], 能够较好地拟合水质指标与水质等级之间的关系。此外, 该方法具有较强的自学习和自适应能力, 能够通过已有数据信息自动调整网络的阈值和权值, 从而减小人为因素的影响, 使得评价结果更加符合客观实际。因此, 本文拟采用 BP 神经网络法对昌平区地下水水质进行评价, 以期客观、准确地了解昌平山前平原地区的地下水水质现状, 为今后的地下水管理工作提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

昌平区位于北京城西北, 北部与西部均为山区, 南部及东南部为冲洪积平原, 区内第四系沉积物厚度大、颗粒粗, 是天然的地下水储蓄场所。研究区自西北山区向东南平原区过渡特征明显, 可分为山前地带、溢出带和冲洪积平原 3 个典型地带(平面图见图 1, 剖面图见图 2)。山前地带、溢出带属低山丘陵, 高程为 100~300 m, 南部与东南部的冲洪积扇平原, 高程为 30~100 m。山前

收稿日期: 2016-06-03 修订日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51409210); 水利公益性行业科研专项经费项目(201501058)

作者简介: 孔 刚, 男, 陕西咸阳人, 高级工程师, 博士生, 主要从事水资源系统工程研究。北京 北京市水影响评价中心, 100161。

Email: konggang1979@126.com.

地带含水层主要由残坡积、坡洪积以及冲洪积形成的黏性土和含碎石及卵砾石的透镜体等组成，地下水埋藏深，变幅大。溢出带呈弧形分布于化庄一带，含水层自该带以下逐渐变为多层，渗透性变差，地下水位埋藏变浅。冲洪积平原区包括中部及东南部的广大地区，含水层由浅部的潜水含水层及深部的多层承压含水层组成。浅部的潜水含水层包括砂卵砾石层为主的古河道带含水层及黏性土层或黏土与卵石混合层为主的非古河道带含水层。

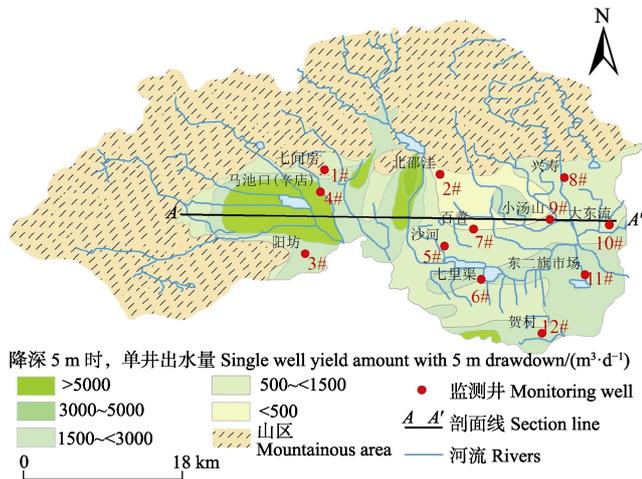


图 1 昌平平原区地下水监测井分布图

Fig.1 Map of groundwater monitoring wells distribution in Changping plain area

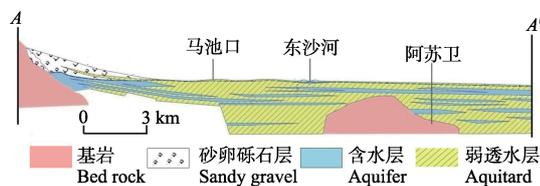


图 2 昌平平原区水文地质剖面图

Fig.2 Hydrogeologic profile of Changping plain area

区内河流大多属北运河水系的温榆河流域，流域面积约占全区面积的 92%。区内现有山区河道 16 条、平原河道 28 条，平原区河道总长 228 km，其中常年无水河道 146 km、有水河道 82 km。昌平区属暖温带大陆性季风气候，多年平均气温 11~12℃，多年平均日照 2 669 h/a，多年平均降水量为 574 mm，多年平均水面蒸发量 1 245 mm。受大陆性季风气候影响，降水年际较大，年内分配不均、丰枯水年交替发生，导致水资源量时空分配不均。

由于人类活动最主要影响的是浅层，故本研究重点针对浅层地下水进行评价。研究区共布置 12 眼浅层监测井，各监测井井深均 <150 m，其中 1#、2#、11# 井深度在 130 m 左右，3#、4#、7# 深度在 125 m 左右，5#、6#、8#、9#、10#、12# 井深度在 120 m 左右（图 1）。

1.2 水质监测及评价方法

1.2.1 水质监测

水质监测项目包括 pH 值、氯化物、硫酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、铜、锰、锌、六价铬、镉、铁、铅、砷、汞、氰化物、氟化物、挥发酚、阴离子表面活性剂、总溶解性固体（total dissolved solids, TDS）、总硬度、色

度、高锰酸钾指数、水温、肉眼可见颗粒物、嗅、味共 27 项指标，取样时间为 2015 年 4 月 16 日，样品测试工作由北京市水环境检测中心完成，检测方法参照生活饮用水标准（GB5750-2006）^[21]。

1.2.2 水质单因子评价评价

单因子评价法中，取某一水质评价因子的多次监测极值或平均值，与该因子的标准值^[21]相比较。

1.2.3 水质 BP 神经网络综合评价

BP 神经网络计算方法分类综合考虑各水质指标的超标情况，能弥补地下水质量标准（GB/T14848-93）^[22]中传统内梅罗指数法的部分缺点。BP 神经网络法是指一种有监督式的学习算法，其主要思想是：输入学习样本，使用反向传播算法对网络的权值和偏差进行反复的调整训练，使输出的向量与期望向量尽可能地接近，当网络输出层的误差平方和小于指定的误差时训练完成，保存网络的权值和偏差^[17]。

BP 神经网络水质评价步骤如下：

1) 评价因子选择。从 12 个监测井水质测试结果来看，挥发酚、色度、肉眼可见颗粒、嗅、味等指标在各监测井中均达到 I 类水质标准，评价中加入这些指标对最终水质评定等级几乎不产生影响。此外，在地下水质量标准（GB/T14848-93）^[22]中，pH 值等指标的分类限值为区间限值，引入这些区间限值指标会增加网络的复杂程度，不利于网络效率的提高，故在因子选择中剔除了这类区间限值指标。最终选择 17 项指标进行综合评级，包括浑浊度、铁、氯化物、硫酸盐、总溶解性固体、总硬度、锰、锌、高锰酸盐指数、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、氟化物、氰化物、砷、六价铬、阴离子表面活性剂；

2) 指标归一化处理。由于各监测指标具有多个量纲，难以进行直接比较。本研究参考文献[18]进行归一化处理，并采用地下水质量标准（GB/T14848-93）^[22]各指标限值的归一化分级结果作为训练数据使用；

3) 输入和输出指标。在 MATLAB 中所有的输入与输出均是以向量形式表示，评价中选择的 17 个评价因子，相当于每个监测井用 1 个 17 维的向量表示，所以输入层的节点数（神经元）确定为 17 个。隐含层采用的是正切 S 型神经元，输出层采用的是线性神经元。通过反复训练的结果，最终将隐含层节点数确定为 5 个。由于输出层期望输出的是水质评价等级，故输出层节点定为 1，最终所需神经网络通过指令 `net=init(net)` 初始化网络中各层的权值和阈值。各神经元的权值和阈值初始被赋以 (-1,1) 的随机值，在网络训练过程中不断调整修正。

4) BP 神经网络进行水质评价。采用 `newff` 建立网络，采用指令 `[net,tr]` 对网络进行训练。训练标准采用的是由 17 个评价指标的国标值经数据标准化后组成的向量。待误差 <10⁻⁴ 时，学习结束。将待测样本（12 个监测点水质数据）输入网络模型中，得到待测样本的输出值（水质综合指标），并对 12 个监测点的水质进行分级，分级标准如表 1 所示。将待测样实际输出值与学习样的期望输出值进行对比，判断其对应等级，与待测样相差最小的数值所代表的等级即待测样本的评价结果^[19]。

表 1 水质分类标准
Table 1 Water quality classification standard

水质等级 Water quality grade	水质综合指标的期望值 Expected value of comprehensive index for water quality
I	0.1
II	0.3
III	0.5
IV	0.7
V	0.9

表 2 1#~12#监测井水质监测结果
Table 2 Water quality monitoring results for 1#-12# wells

指标 Index	标准 Standard	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#
浑浊度 Turbidity/(°)	3	5.02	2.55	2.41	4.00	2.92	2.86	2.72	2.47	2.44	2.90	2.11	2.75
总硬度 Total hardness/(mg·L ⁻¹)	450	816.13	254.31	174.50	245.74	159.62	140.68	518.54	244.39	251.15	258.82	168.64	247.54
总溶解性固体 TDS/(mg·L ⁻¹)	1000	1482.96	565.13	387.77	546.09	354.71	312.62	1152.30	543.08	558.11	575.15	374.75	550.10
硝酸盐氮 Nitrate N (mg·L ⁻¹)	20	61.72	15.03	17.03	17.03	13.03	13.03	16.03	14.03	13.03	12.02	13.03	11.02
氨氮 Ammonia N/(mg·L ⁻¹)	0.2	0.18	0.14	0.16	0.17	0.14	0.13	0.13	0.15	0.18	0.19	0.65	0.17
氟化物 Fluoride/(mg·L ⁻¹)	1.0	0.31	0.44	0.38	0.31	0.67	0.71	0.97	0.75	1.58	0.88	0.94	0.76

张宝龙等^[23]对比了昌平区浅层、深层及基岩层地下水中的氟化物浓度,发现深层与基岩层地下水中的氟化物浓度明显高于浅层地下水,氟污染主要来源于原生作用。本研究 1#~12#井水质监测结果表明,氟化物超标区域主要位于小汤山一带(图 3)。该区域为昌平区主要构造断裂带,地下水的补给方式为顶托补给,地下水自下向上流动,将基岩和深层溶滤的氟化物带到浅层,故呈现出基岩层和深层浓度高于浅层的现象。此外,小汤山一带以温泉闻名,而地下水中氟离子含量与水温具有十分密切的关系^[24-26],较高温度的地下水流经富含氟的岩土时,在高温高压条件下能够促使难溶的萤石(CaF₂)转化为易溶的氟化钠,进而增加地下水中的氟化物浓度。

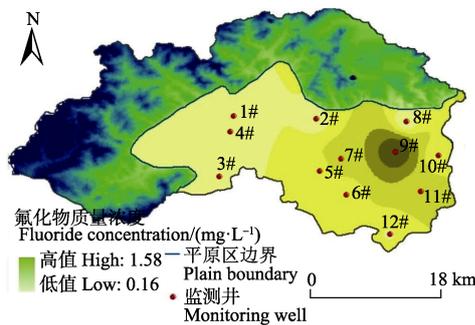


图 3 昌平平原区浅层地下水氟化物分布
Fig.3 Fluoride distribution of shallow groundwater in Changping plain area

氮素超标区域包括西北部山前的 1#井周围,也包括平原区东南部的 11#井周围,其中 1#井附近的氮污染物为硝酸盐氮(图 4a),11#监测井为氨氮超标(图 4b)。1#井靠近山区,渗透性良好,有利于地表水源入渗,地表氮污染物易随地表水源入渗进入地下水,

2 结果与分析

2.1 基于单因子评价的水质监测结果

基于地下水 III 类标准^[22], 1#、4#、7#、9#、11#井水质超标,总硬度、浑浊度、TDS、氮素以及氟化物为最主要的超标因子(表 2)。1#井浑浊度、总硬度、TDS、硝酸盐氮分别超标 1.67、1.81、1.48、3.08 倍;4#井浑浊度超标 1.33 倍;7#井总硬度、TDS 分别超标 1.2、1.15 倍;9#井氟化物超标 1.58 倍;11#井氨氮超标 3.25 倍。

但由于该处地下水埋深较大,包气带较厚,而土壤对氨氮的吸附作用较强,硝酸盐氮更易溶滤下渗。此外,山前地带含水层介质较粗大,地下水溶解氧浓度较高,为氧化环境,下渗的氮污染物易发生硝化反应转化为硝酸盐氮,故该处浅层地下水氮污染以硝酸盐氮为主。而 11#监测井地处平原区东南部,氮污染物下渗过程中,由于地下水位埋藏较浅,包气带厚度不大,包气带土壤对氨氮吸收程度不高,致使下渗的氨氮较多。同时,该处含水层颗粒较细,地下水的氧化还原电位较低,为相对还原的环境,这都使得氮污染物易以氨氮形式存在于浅层地下水中。

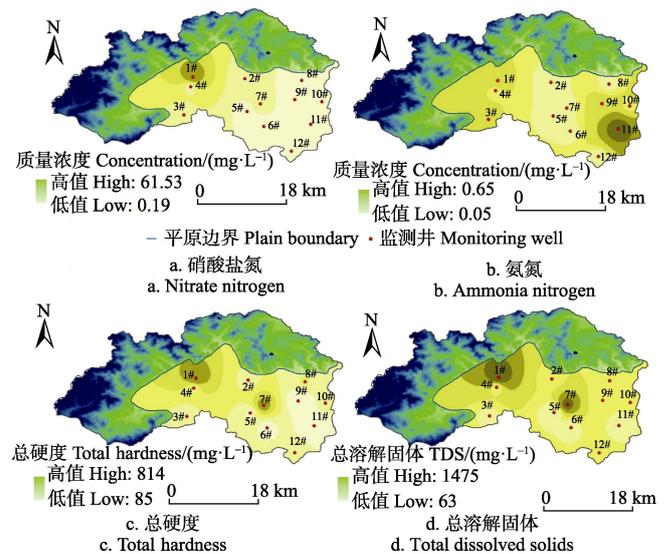


图 4 昌平平原区浅层地下水硝态氮、氨氮、总硬度、总溶解性固体空间分布

Fig.4 Spatial distribution of nitrate-N, ammonia-N, total hardness and total dissolved solids in shallow groundwater of Changping plain area

除氟化物与氮素外，昌平平原区地下水还存在总硬度、总溶解性固体、浑浊度 3 个严重超标因子，与氟化物和氮素相比这 3 个因子超标范围更广，影响程度更深。从北京来看，浅层地下水水质超标的最显著影响因子是总硬度^[27]，总硬度除与钙、镁离子关系十分密切外，还与 pH 值、总溶解性固体、氯离子等指标具有较强的相关性。从图 4c 与图 4d 的对比可看出，该区的总硬度与总溶解性固体分布具有较好的一致性。总硬度也是地下水盐污染的重要特征参数^[28-30]，故下面重点对总硬度超标原因进行探析。

对比 1999 年昌平区浅层地下水中总硬度超标情况^[31]，其超标范围由当时的 7#井周围的局部地区逐渐扩展到目前的 1#和 7#井周围的广大地区（图 4c）。2000 年后新增超标面积位置与 1999 年超标位置相分离，表明两者成因上没有直接关联。同时从盐分的垂向分布来看，研究区平原的盐分污染主要发生在浅层地下水中，深层地下水和基岩地下水中未见盐分超标现象。由此分析可知，昌平区地下水盐分污染主要来源于地表污染物下渗，且到目前为止，这些污染还未影响到深层及基岩层地下水。

根据张玉晨等^[31]的研究成果，7#井附近的总硬度升高受工业污染影响较大。随着城镇化发展，研究区工业废水与居民生活污水排放量逐年增加，增大了地下水的潜在污染风险。而 7#井所在区域属于冲洪积平原，地下水以垂向循环为主，水平径流较弱，从而使得地表污染物较易下渗，引起地下水的污染。地表污染物一方面直接进入地下水，使地下水中盐分离子的浓度升高，另一方面地表污染物富含丰富的有机质，污染物下渗后，有机质打破了浅层地下水中原有的 CO₂ 平衡，促进含水层介质中的 CaCO₃ 溶解，溶解的 CaCO₃ 又进一步为含水层介质中的置换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 与水溶性 Ca²⁺、Mg²⁺ 的形成创造了条件。

对比 1999 年地下水中的总硬度分布^[31]可知，1#井所在区域的总硬度是近十几年来才出现的，且其扩展速度非常快。从总硬度浓度分布（图 4c）可以看出，该区域的总硬度超标面积已远远超过 7#井区域的超标面积。该区地处平原区与山区交界地带，是平原区地下水重要的山前补给地带，但是由于近十几年来北京连续的干旱，地下水所能获得的补给资源严重减少，同时由于地表水的不断减少，区内的京密引水渠停止向昌平区供水，这也使得该区水资源来源更加匮乏。此外，1#井所在区域南临马池口水源地，东临邓庄水厂，近年来两处均大量开采地下水，使得该处地下水出现严重超采的局面。地下水漏斗的扩大使得该区地下环境发生改变，漏斗区的地球化学环境逐渐转变为氧化环境，促使含水层介质中的还原性化合物转化为氧化态，从而使得矿物溶解度增加，地下水硬度升高。同时，地下水漏斗扩大改变了地下水水流场，激发了地表污水下渗，进而造成地下水的直接污染。

根据郭海丹等^[30,32]的研究成果，在间歇型入渗条件下，硝酸盐氮的存在会促进钙镁难溶盐溶解，最终导致地下水硬度的升高。对比研究区的硝酸盐氮浓度分布图

（图 4a）与总硬度分布图（图 4c）发现，1#监测井附近的总硬度超标范围与硝酸盐氮超标范围基本一致。而该区地表水缺乏，入渗水源主要来自降水、农业灌溉水等，属于间歇型入渗。在此入渗条件下，氮的迁移转化改变了浅层地下水水土系统的酸碱条件，促进介质中钙镁难溶盐溶解，进而升高地下水硬度^[28]。

2.2 基于 BP 神经网络的水质综合评价结果

基于 BP 神经网络对各监测井水质的分类结果，昌平区浅层地下水水质可分为 III、IV、V 3 个等级，各监测井水质等级见表 3。从评价结果可知，浅层地下水水质较差，12 眼浅层监测井水质均在 III 类及以上，其中 V 类水质监测井 1 眼，占 8.33%，IV 类水质监测井 5 眼，占 41.67%，III 类水质监测井 6 眼，占 50%。

表 3 基于 BP 神经网络的昌平平原区浅层地下水水质评价综合指标

Table 3 Comprehensive index of shallow groundwater water quality based on BP neural network in Changping plain area

监测井 Monitoring well	计算值 Calculated value	水质等级 Water quality grade
1#	0.8166	V
2#	0.5121	III
3#	0.4679	III
4#	0.6687	IV
5#	0.5944	III
6#	0.5154	III
7#	0.7123	IV
8#	0.4169	III
9#	0.6933	IV
10#	0.6786	IV
11#	0.7139	IV
12#	0.4197	III

结合单因子评价结果可知，1#井所在区域地下水的总硬度（超标 1.81 倍）、TDS（超标 1.48 倍）、浑浊度（超标 1.67 倍）、硝酸盐氮（超标 3.08 倍）4 项均超标，因此 BP 神经网络法将该处地下水水质评为 V 类是十分合理的。IV 类水质涉及的监测井有 4#、7#、10#、11#，其中 7#监测井有 2 项指标超标，分别为总硬度（超标 1.20 倍）和 TDS（超标 1.15 倍），11#监测井附近氨氮超标严重，超标倍数达 3.25 倍，4#监测井为浑浊度超标 1.33 倍，10#监测井虽没有超过 III 类标准的指标，但该处亚硝酸盐氮、氨氮均为 III 类水平，从空间上来看，10#监测井与 11#监测井位置临近，其氮素超标与 11#监测井可能存在一定的关联性，此外 4#监测井紧邻 1 号监测井，且位于 1#监测井地下水径流的下游，其水质受 1#监测井地下水的影响。总之，4#、7#、10#、11# 4 眼监测井水质评为 IV 类是较为合理的。其余各井的氮素浓度普遍偏高，总硬度和 TDS 均低于 III 类水平，部分地区氯化物和锰偏高，为 III 类水平。

3 结论与讨论

昌平平原区 12 眼浅层监测井中其中 V 类水质监测井

1眼,占8.33%,IV类水质监测井5眼,占41.67%,III类水质监测井6眼,占50%。浅层地下水的主要超标因子为总硬度、总溶解性固体、氮素及氟化物等。鉴于浅层地下水存在氮素、总硬度、溶解性、总固体等因子超标的现象,且有继续恶化趋势,今后工作中应加强对昌平区浅层地下水的监测,防控表层污染物下渗,减少地下水超采。

本研究地下水取样时间为枯水期,需在后期工作中,加强对水质的长期连续监测,研究其枯水期、丰水期水质多年变化规律,为昌平区地下水管理工作提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 寇文杰,赵微,杨庆,等.基于水质评价的北京市地下水资源开发利用分区[J].南水北调与水利科技,2012,10(6):100-103.
Kou Wenjie, Zhao Wei, Yang Qing, et al. Partition of groundwater resources utilization in Beijing based on water quality assessment [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 100-103. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵微,林健,郭高轩,等.北京市地下水环境分层监测和专项监控网的建立[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):83-87.
Zhao Wei, Lin Jian, Guo Gaoxuan, et al. Development of layered monitoring and specialized inspection system of groundwater environment in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 83-87. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报,2006,43(3):405-413.
Liu Hongbin, Li Zhihong, Zhang Yungui, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405-413. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马洪斌,李晓欣,胡春胜.中国地下水硝态氮污染现状研究[J].土壤通报,2012,43(6):1532-1536.
Ma Hongbin, Li Xiaoxin, Hu Chunsheng. Status of nitrate nitrogen contamination of groundwater in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1532-1536. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李录娟,邹胜章.综合指数法和模糊综合法在地下水质量评价中的对比:以遵义市为例[J].中国岩溶,2014,33(1):22-30.
Li Lujuan, Zou Shengzhang. Comparison of comprehensive index method and fuzzy comprehensive method in the evaluation of groundwater quality: A case study in Zunyi city [J]. Carsologica Sinica. 2014, 33(1): 22-30. (in Chinese with English abstract)
- [6] 余世鹏,杨劲松,刘广明,等.基于模糊神经算法的区域地下水盐分动态预测[J].农业工程学报,2014,30(18):142-150.
Yu Shipeng, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Regional groundwater salinity dynamics forecasting based on neuro-fuzzy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 142-150. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李浩鑫,邵东国,何思聪,等.基于循环修正的灌溉用水效率综合评价方法[J].农业工程学报,2014,30(5):65-72.
Li Haoxin, Shao Dongguo, He Sicong, et al. Comprehensive evaluation method for irrigation-water use efficiency based on circulation-correction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 65-72. (in Chinese with English abstract)
- [8] 尚佰晓,吕子楠,李杰年,等.基于模糊综合评价法与单因子指数评价法的水质评价[J].中国环境管理干部学院学报,2013,23(5):1-4.
Shang Baixiao, Lü Zinan, Li Jienian, et al. Application of fuzzy mathematics and single factor index in water quality evaluation[J]. Journal of EMCC, 2013, 23(5): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [9] 邱贵江,李祚泳,汤驰,等.基于指标规范值的灰色聚类法的地下水水质评价[J].水文,2011,31(4):35-39.
Qiu Guijiang, Li Zuoyong, Tang Chi, et al. groundwater quality assessment based on grey cluster of Index normalization values[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(4): 35-39. (in Chinese with English abstract)
- [10] 庞博,李玉霞,童玲.基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J].环境科学与技术,2011,34(11):185-188.
Pang Bo, Li Yuxia, Tong Ling. Application of grey clustering method and fuzzy comprehensive assessment method to assess eutrophication level of water quality[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34 (11):185-188. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨渺,谢强,王维,等.基于线性变换的水质综合评价方法[J].长江流域资源与环境,2015,24(1):156-161.
Yang Miao, Xie Qiang, Wang Wei, et al. Comprehensive assessment of surface water quality based on linear transformation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(1): 156-161. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孟宪林,邵雪,齐志宁,等.灰色加权关联度法用于水环境功能评价[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(4):67-70,85.
Meng Xianlin, Shao Xue, Qi Zhining, et al. Research on gray-weighted correlation method for evaluation of water environment function[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(4): 67-70, 85. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘颖秋.用灰色关联度法评价区域水资源保护状况[J].中国水利,2013(23):43-45.
Liu Yingqiu. Application of grey relational analysis for regional water resources evaluation[J]. China Water Resources, 2013(23): 43-45. (in Chinese with English abstract)
- [14] 彭杰,刘焕军,史舟,等.盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演[J].农业工程学报,2014,30(17):167-174.

- Peng Jie, Liu Huanjun, Shi Zhou, et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30 (17): 167—174. (in Chinese with English abstract)
- [15] Kunwar P Singh, Ankita Basant, Amrita Malik, et al. Artificial neural network modeling of the river water quality: A case study [J]. Ecological Modelling, 2009, 220: 888—895.
- [16] Matthias Raiber, Paul A White, Christopher J Daughney, et al. Three-dimensional geological modelling and multivariate statistical analysis of water chemistry data to analyse and visualise aquifer structure and groundwater composition in the Wairau Plain, Marlborough District, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 2012, s436/437(5):13—34.
- [17] 董艳慧, 周维博, 赖坤容, 等. 基于概率神经网络的西安地区地下水水质评价[J]. 自然资源学报, 2009, 24(4): 737—742.
- Dong Yanhui, Zhou Weibo, Lai Kunrong, et al. The application of probabilistic neural network model in evaluating the groundwater quality of Xi'an area[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(4): 737—742. (in Chinese with English abstract)
- [18] 卞建民, 胡昱欣, 李育松, 等. 基于 BP 神经网络的辽河源头区水质评价研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 147—151.
- Bian Jianmin, Hu Yuxin, Li Yusong, et al. Water quality assessment in source area of Liao river based on BP neural network[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 147—151. (in Chinese with English abstract).
- [19] 李玲, 周金龙, 赵斐. BP 神经网络模型在新疆焉耆县浅层地下水水质评价中的应用[J]. 新疆环境保护, 2015, 37(3): 40—43.
- Li Ling, Zhou Jinlong, Zhao Pei, et al. Application of BP neural network model on shallow groundwater quality evaluation in Yanqi county in Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2015, 37(3):40—43. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郭孝玉, 孙玉军, 王轶夫, 等. 基于改进人工神经网络的植物叶面积测定[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 200—204.
- Guo Xiaoyu, Sun Yujun, Wang Yifu, et al. Improved artificial neural network for determination of plant leaf area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 200—204. (in Chinese with English abstract)
- [21] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法: GB5750-2006[S/OL]. (2006-12-29) [2016-01-01] <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/19185510.html>
- [22] 国家技术监督局. 中华人民共和国地下水质量标准: GB/T14848-93[S/OL]. (1993-12-30) [2016-01-01]<http://max.book118.com/html/2014/0116/5574679.shtm>
- [23] 张宝龙, 陆苏. 昌平区地下水水质评价[J]. 北京水务, 2013(2): 32—34.
- Zhang Baolong, Lu Su. The groundwater quality evaluation in Changping district [J]. Beijing Water, 2013(2): 32—34. (in Chinese with English abstract)
- [24] 黄栋. 北京市平原区地下水脆弱性研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- Huang Dong. The Groundwater Vulnerability Research of the Plain Area of Beijing [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郑跃军, 李文鹏, 万利勤, 等. 北京昌平地区地下水地球化学[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 8—11.
- Zheng Yuejun, Li Wenpeng, Wan Liqin, et al. Groundwater geochemistry in the Changping area, Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 8—11. (in Chinese with English abstract)
- [26] 姜体胜, 杨忠山, 黄振芳, 等. 北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 33—37.
- Jiang Tisheng, Yang Zhongshan, Huang Zhenfang, et al. Tendency and mechanism analysis of total hardness in shallow groundwater in the suburb of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [27] 林沛. 北京市城近郊区地下水水质评价与趋势分析[D]. 吉林: 吉林大学, 2004.
- Linpei. The Assessment and Analysis of Groundwater Quality in Suburb Area of Beijing [D]. Jilin: Jilin University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [28] 肖勇, 邵景力, 顾晓敏, 等. 北京昌平平原区地下水污染特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 252—256, 338.
- Xiao Yong, Shao Jingli, Gu Xiaomin, et al. Characteristics of groundwater pollution in Changping Plain of Beijing [J]. South-to-North Water transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 252—256,338. (in Chinese with English abstract)
- [29] 邹胜章, 张金炳, 李洁, 等. 北京西南城近郊浅层地下水盐污染特征及机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(1): 5—9.
- Zou Shengzhang, Zhang Jinbing, Li Jie, et al. Shallow groundwater salt pollution feature and mechanism analysis the Southwest suburb of Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 29(1): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭海丹, 魏加华, 王光谦. 地下水硬度升高机理研究综述 [J]. 人民黄河, 2011, 33(6): 52—55.
- Guo Haidan, Wei Jiahua, Wang Guangqian. The summary of hardness increased mechanism of groundwater[J]. Yellow River, 2011, 33(6): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张玉晨, 林健. 北京市平原区地下水水质概况[J]. 北京地质, 2000, 12(1): 8—18.
- Zhang Yuchen, Lin Jian. Brief introduction of groundwater quality in Beijing plain[J]. Beijing Geology, 2000, 12(1): 8—18. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王东胜, 沈照理, 钟佐桑, 等. 氮迁移转化对地下水硬度升高的影响[J]. 现代地质, 1998, 12(3): 431—436.
- Wang Dongsheng, Shen Zhaoli, Zhong Zuoxin, et al. Effects of nitrogen transformation on hardness increment of groundwater[J]. Geoscience, 1998, 12(3): 431—436. (in Chinese with English abstract)

Evaluation of groundwater quality in Changping piedmont plain of Beijing based on BP neural network

Kong Gang^{1,2}, Wang Quanjiu¹, Huang Qiang¹

(1. College of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Center of Water Assessment of Beijing, Beijing 100161, China)

Abstract: Groundwater quality is closely related with human health and environmental safety. In the suburb of Beijing, the groundwater quality is heavily concerned. In this study, the groundwater quality in Changping piedmont plain was evaluated based on the single factor evaluation method and comprehensively evaluated based on BP neural network. The Changping district is located in the northwestern area of Beijing. Considering that the main area affected by human activity was the shallow groundwater, we arranged a total of 12 monitoring wells around the plain area. The depths of wells 1#, 2# and 11# were 130 m, the depth of wells 3#, 4# and 7# were about 125 m, and the depths of wells 5#, 6#, 8#, 9#, 10#, 12# were about 120 m. The groundwater samples were collected on April 16, 2015. A total of 27 indexes were determined including pH value, chloride, sulfide, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, heavy metals, fluoride, and so on. In the single factor evaluation, the groundwater quality was evaluated according to the National Groundwater Quality Standards (GB/T14848-93). Based on the single factor evaluation method, water quality in 5 wells of 1#, 4#, 7#, 9# and 11# exceeded the standards. In the 1# well, the turbidity, total hardness, total dissolved solids and nitrate nitrogen exceeded the standards by 1.67, 1.81, 1.48, and 3.08 times, respectively. In the 4# well, the turbidity was 1.33 times exceeding the standard. In the 7# well, the total hardness and total dissolved solids exceeded the standards by 1.2 and 1.15 times, respectively. In the 9# well, the fluoride exceeded the standard by 1.58 times. The ammonia nitrogen in the 11# well exceeded the standard by 3.25 times. Compared the values in 1999, the area with total hardness exceeding the standard was expanded largely. Among the 27 indexes, we chose 17 indexes for the comprehensive evaluation based on BP neural network, including the turbidity, iron, chloride, sulfate, TDS, total hardness, manganese, zinc, potassium permanganate index, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, ammonia nitrogen, fluoride, and so on. The BP evaluation showed that all the 12 wells had the water quality above III. Among the wells, 1 was V grade, 5 were IV grade and 6 were III grade. Compared with the single evaluation results, the comprehensive evaluation based on BP neural network was reasonable. The 1# well had 4 indexes exceeding the standards and thus the water quality was V grade. Compared with previous study, the pollution of nitrate and ammonia nitrogen might be due to surface pollutants infiltration. In the future, the continuous monitoring of shallow groundwater should be conducted, and the surface pollutants infiltration prevention control should be strengthened. The study may provide valuable information for the management of the groundwater in Beijing.

Keywords: groundwater; water quality; neural networks; evaluation; total hardness; Beijing