基于 LM-BPNN 的高寒地区地下水微生物−毒理指标预测模型

贾卓鹏[1,2]，毕俊擘[3,4*]，原勇[1]，权昕[5]，王帅伟[3]，孙伟超[3,4]

1. 阿里地区人民医院，西藏 阿里地区 859400；
2. 西安医学院第一附属医院，西安 710000；
3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所，石家庄 050061；
4. 中国地质大学（北京）中国地质科学院，北京 100083；
5. 西安医学院，西安 710021

第一作者，E-mail：13088969796@163.com

* 通信作者，E-mail：bjunbo@mail.cgs.gov.cn

2024-06-19 收稿；2024-08-22 修回；2024-08-26 接受

基金项目：西藏阿里地区科学技术局资助项目（ALKJ-BJCZ-2024-04）

中图分类号：X54　　文章编号：2096-8523(2025)02-0368-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240345

摘　要：为建立高寒地区地下水微生物−毒理指标（细菌菌落总数（total bacteria count，简称 TBC）、总大肠杆菌菌落总数（total coliforms count，简称 TCC））预测模型，以我国西南高原地区某一水源地地下水微生物−毒理指标（TBC、TCC）为研究对象，通过正交试验设计，改变温度、pH 值、孔隙率等外部环境条件，开展室内批试验，获取了不同孔隙率、取样深度，流出溶液的温度、pH 值、化学需氧量（chemical oxygen demand，简称 COD）、氧化还原电位（oxidation-reduction potential，简称 ORP）等地下水水质指标及地下水中 TBC 和 TCC 值，然后分别以 TBC、TCC 为目标，以取样深度、溶液温度、pH 值、土壤孔隙率、ORP、COD 为影响因素，基于 Levenberg-Marquardt（LM）优化的神经网络（BPNN）算法，建立了高寒地区地下水微生物−毒理指标的预测模型。结果表明，TBC、TCC 模型的预测结果与试验结果的变化趋势一致，且最大相对误差均小于 15%（TBC、TCC 模型的最大相对误差分别为 11.52%，14.55%），符合工程要求。该方法可用于高寒地区地下水微生物−毒理指标的预测，可为高原地区地下水资源可持续利用和污染的有效防治提供科学依据，并为地下水中 TBC、TCC 的测定提供新的思路。

关键词：微生物−毒理指标；TCC；TBC；环境条件；地下水水质指标；LM-BPNN；预测模型；高寒地区

随着我国工业化、城镇化、农业现代化进程不断加快，人们对水资源开发利用强度日益增大，水资源供需矛盾、水资源安全等问题凸显[1]。当前，我国地表水水质总体为轻度污染[2]，地下水污染正在由点状、线状向面状扩散，并且存在由局部向区域扩散的趋势[3]。在我国高寒地区，独特的地形条件和显著的气候特征，使当地生活饮用水水源以山泉水、井水和沟塘水为主，加之牲畜养殖多为无序的散养和半散养方式，导致该区域土壤水环境中含大量的细菌、大肠杆菌等微生物[4-9]，饮用水细菌菌落总数（total bacterial community，简称 TBC）、总大肠杆菌菌落总数（total coliforms count，简称 TCC）严重超标[10-12]，常易诱发人体血液系统、消化系统相关疾病，轻者引起腹痛、腹泻[13]，重者会感染败血症、脑膜炎[14-16]，使患者丧失劳动能力，甚至休克、死亡，对人民群众的生产生活构成了严重威胁。因此，亟需建立高寒地区地下水中 TBC、TCC 演化的预测模型，以便及时预测地下水中 TBC、TCC 的演化情况，对土−水环境污染

著录信息：贾卓鹏，毕俊擘，原勇，等. 基于 LM-BPNN 的高寒地区地下水微生物−毒理指标预测模型［J］. 地质科技通报，2025，44(2)：368-377.
JIA Zhuopeng，BI Junbo，YUAN Yong，et al. Prediction model of groundwater microbiological toxicological indicators in alpine regions based on LM-BPNN［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(2)：368-377.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

状况进行有效评估，为地下水资源合理的开发利用提供科学依据。

现有研究表明，影响地下水中 TBC、TCC 演化的因素众多[17-21]，这些影响因素与 TBC、TCC 之间存在着极强的非线性关系[22-24]，通过常规的数理统计分析难以建立有效的预测模型。而机器学习作为一类能通过经验自动改进的计算机算法[25]，已经在菌群聚类分析[26]、菌群识别分类[27-28] 及宿主表型预测[29] 等方面表现出了独特优势。机器学习主要用作核心建模算法，包括支持向量机（support vector machine，简称 SVM）建模、随机森林（random forest，简称 RF）建模、人工神经网络（artificial neural network，简称 ANN）建模等[30]。其中，由于人工神经网络（ANN）具有良好的自适应性，自组织性及很强的学习、联想、容错和抗干扰能力[31-32]，已经被广泛应用于多个领域。但其在高寒地区地下水中 TBC、TCC 演化预测方面研究较少，不利于对高寒地区土水环境污染的状况进行有效评估。

噶尔县是典型西北高原区，是狮泉河流经的、以狮泉河镇为主的重要盆地区，是西藏阿里地区人口最集中区域，但由于当地农牧民独特的生活方式，加之对该地区地下水中 TBC、TCC 演化研究较少，导致对该地区地下水中 TBC、TCC 的演化规律认识不清，对当地人民群众的正常生产生活产生潜在威胁，严重影响着该地区社会经济的可持续发展。鉴于此，笔者以该地区某水源地地下水中 TBC、TCC 为研究对象，以温度、pH 值、孔隙率[33-38] 作为试验条件，通过正交试验设计，进行室内批试验；测试不同试验条件下地下水中 pH 值、化学需氧量 COD、氧化还原电位 ORP 及地下水中的 TBC、TCC；然后以 TBC、TCC 为目标，以取样深度、地下水的温度、pH 值、孔隙率、ORP、COD 为影响因素[21]，基于 LM 方法优化的神经网络（LM-BPNN）算法建立高寒地区地下水 TBC、TCC 预测模型。本研究有望为高原地区地下水资源可持续利用和污染的有效防治提供科学依据，并为地下水中 TBC、TCC 的测定提供新的思路。

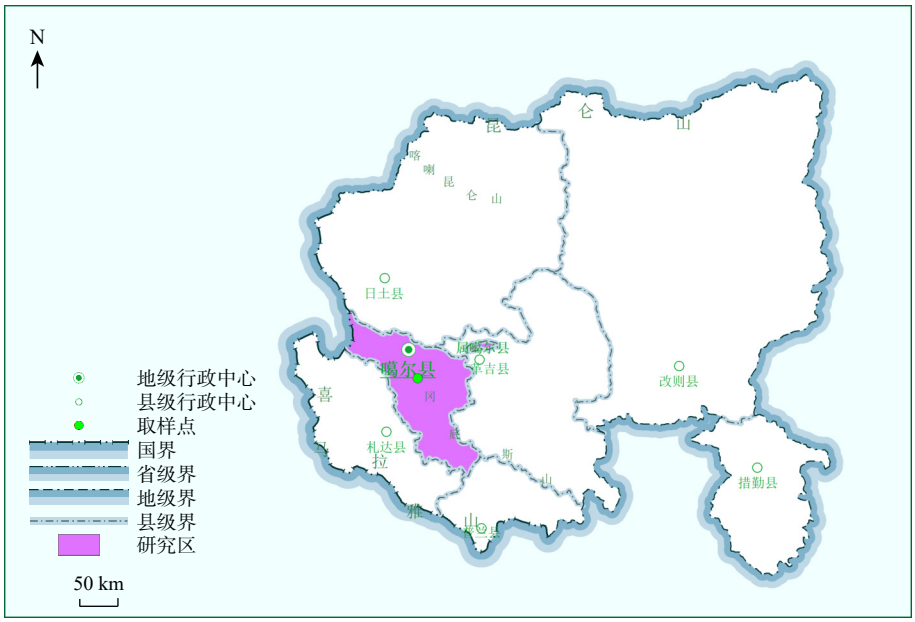
1　研究区概况

1.1　地理位置

研究区位于中国西南部、西藏自治区西部、阿里地区西南部，东南与普兰县相邻、西南与扎达县接壤、北靠日土县、东与革吉县毗邻，地理坐标为东经 79°07′ ~ 81°10′，北纬 30°58′ ~ 33°17′，总面积 1.8 万 km^2（图 1）。

1.2　气象

研究区属高原亚寒带季风干旱气候，参照噶尔县 1961–2018 年气象资料[39] 及狮泉河气象站气象资料可知，噶尔县全年平均气温 0.5℃，7 月份平均气温最高，为 13.8℃；最冷月均出现在 1 月份，气温为 −12.7℃，极端最高温度为 26.9℃，极端最低温度为 −41℃。年均降雨量 200 ~ 300 mm，主要集中在 6–



注：底图采用中华人民共和国自然资源部网站的公开地图（阿里地区地图政区简图版），审图号为：藏 S（2023）004 号，底图未修改

图 1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location of study area

9 月份，占全年降雨量的 85% 以上；由于海拔高，云日少，研究区年日照时数长达 3 153 ~ 3 417 h[40]。

1.3　地层岩性与地下水

查阅资料[40] 分析可知，研究区出露最老地层为石炭系−二叠系，出露在狮泉河局部地区，以海相碳酸盐岩砂泥质岩组合为主。中生界三叠系不发育，侏罗系−白垩系分布极广，侏罗系以海相碳酸盐岩和砂泥质岩组合为主，白垩系以碳酸盐岩、砂泥质和火山岩组合为主。中生界不整合在石炭系−二叠系之上。新生界为陆相碎屑堆积，不整合在下伏各时代地层之上。河谷地带上更新统−全新统冲洪积物（$Q_4^{al\text{-}pl}$、Q_3^{pl}）广泛分布在噶尔狮泉河河谷，其岩性以亚砂土、中粗砂、砾石为主，局部夹黏土透镜体。

查阅文献可知，研究区地下水类型主要为 HCO_3-Ca 型水，地下水 pH 值范围在 6 ~ 8 之间[40]。对研究区内居民取水点最多的区域开展野外取样工作，通过容重比重法（图 2）测得所取土样的孔隙率为 0.49 ~ 0.58。

2　试验材料与方法

2.1　试验材料

（1）选取阿里地区狮泉河流域表层不同深度原状土，在室内试验条件下通过土工试验方法测定不同深度原状土的孔隙率、干密度和相对密度等，获取了研究区表层土体物理力学指标，通过控制相同密度和孔隙率，按照平移方式（每 10 cm 对应照搬）装



图 2　土体相对密度测定

Fig. 2　Determination of specific gravity of the soil sample

填有机玻璃柱，装填总高度为 50 cm。模拟自然条件下阿里地区表层土层状态，装填示意图与具体试验装置如图 3 所示。

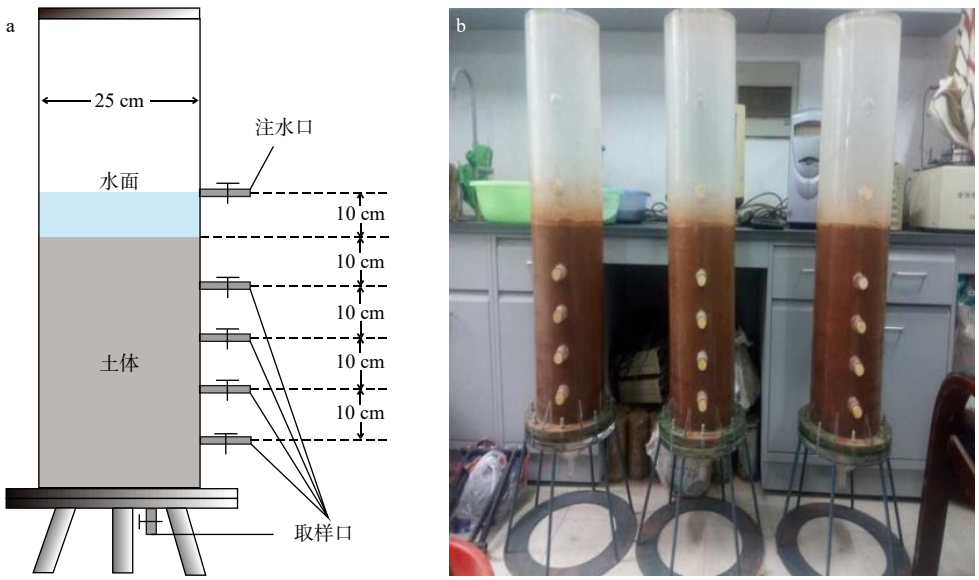
（2）取蒸馏水配置地下水（添加醋酸钠及硝酸铵模拟地下水的 pH 值），加入有机玻璃柱中，模拟研究区土壤水的渗透过程。

（3）其他材料装置包括：恒温培养箱、试管、培养皿、消解仪、分光光度计、哈希 COD 试剂管（量程：3 ~ 150 mg/L、20 ~ 1 500 mg/L）、移液枪（量程：100 ~ 1 000 μL、0.5 ~ 5 mL、1 ~ 10 mL）、取样针、哈纳便携式 pH 值测定仪、哈纳便携式 ORP 测定仪、止水夹等。

2.2　试验方法

2.2.1　试验设计

有文献研究表明，在 4℃ 条件下大肠杆菌的生长处于停滞状态[41-42]，同时结合研究区极端温度的最大值、平均温度最大值并考虑 TCC 活性，将室内试验的环境温度取为 5，15，25℃；根据资料收集到的地



a. 试验装置示意图；b. 实际试验装置

图 3　室内土柱试验

Fig. 3　Indoor soil column test

下水 pH 值分布范围，将室内试验 pH 值定为 6, 7, 8；依据土壤孔隙率的分布范围，将室内试验的土壤孔隙率取为 0.50, 0.55, 0.60。根据正交试验设计 3 因素 3 水平的正交试验如表 1 所示。试验开展日期为冬季，在铁皮试验室中按照不同温度条件分批次进行，用中央空调控制试验室的温度条件，并通过温度计实时监测室内温度。

表 1　正交试验参数

Table 1　Orthogonal test table

试验编号	温度/℃	孔隙率	pH值
1	5	0.50	6
2	5	0.55	7
3	5	0.60	8
4	15	0.50	7
5	15	0.55	8
6	15	0.60	6
7	25	0.50	8
8	25	0.55	6
9	25	0.60	7

2.2.2　数据测定

根据正交试验设计 9 组试验，编号分别为 1 ~ 9。为保证各试验组水流通畅，设置各试验组的水位均高出土壤表面 10 cm(图 3a)。试验开始后，每隔 12 h 分别在距土壤表面 10, 20, 30, 40, 50 cm 处取样。根据 GB/T5750−2022《生活饮用水标准检验方法》进行室内试验水样水质 *TBC* 值、*TCC* 值(图 4a, b)测试，同时测定溶液的 ORP、pH 及 COD 值(图 4c, d)。直至 *TBC* 值、*TCC* 值基本保持不变，试验停止。*TBC* 值

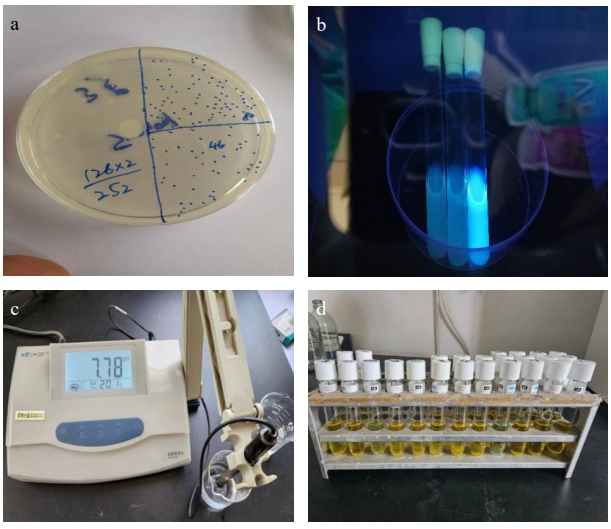


图 4　*TBC* (a)、*TCC* (b)、溶液 pH 值 (c) 与 COD (d) 测定试验

Fig. 4　*TBC* (a), *TCC* (b), solution pH (c) and COD (d) determination

采用平板计数法：将 1 mL 水样接种于牛肉提取物蛋白胨琼脂培养基平板上，37℃ 下孵育 24 h，然后对平板上的菌落形成单位(CFU)进行计数，得到 TBC 值(CFU/mL)；采用多管发酵法(MTF)计算 *TCC* 值：将水样和乳糖肉汤的适当小数稀释的一系列试管进行接种。在 37℃ 孵育 24 h 后，试管中产生气体、形成酸或大量生长构成积极的推定反应。所有推定反应为阳性的试管随后进行确认试验。37℃ 下 24 h 内任何时间亮绿色乳糖胆汁液发酵管中气体的形成构成阳性确认试验。MTF 计数的结果以 100 mL 样品中存在的微生物的最可能数量(MPN/100 mL)表示。

2.2.3　建模算法

(1)BP 神经网络

BP 神经网络是一种输入信息向前传播，误差逆向传播的多层前馈神经网络，通过修正隐含层神经元的权值和阈值来减小误差，从而使输出值与期望值更接近，直至满足期望为止[43]，其结构示意图如图 5 所示。由于 BP 神经网络具有大规模并行处理能力、较高的自学习能力和自适应性等[44] 优点，在处理非线性问题时具有独特的优势，所以本研究采用 BP 神经网络(BPNN)作为核心的机器算法建立 TBC、TCC 的预测模型。

(2)算法参数优化

BP 神经网络的本质是一种梯度寻优算法，其权值和阈值的修正依赖于目标函数的一阶导数信息，并且 TBC、TCC 与取样深度 *H*、ORP、COD、溶液 pH 值、温度 *T*、孔隙度 *n* 之间是复杂的超平面关系，且它们之间可能会存在多个局部极值点。又因为 BP 神经网络本身存在着收敛速度慢、易陷入局部收敛和网络泛化能力难保证等缺陷[43]，所以要想获得精度较高的预测模型需对 BP 神经网络进行优化。

目前常用的优化 BP 神经网络的算法大体可分为 2 类，分别为启发式技术和数值最优化技术。近年来研究结果表明，数值最优化技术与 BP 神经算法的结合体现出了极佳的性能，尤其以 Levenberg-Marquardt(LM)算法最为突出[44]。由于 LM 算法具有的收敛速度快、预测精度高的特点，有效弥补了 BP 算法存在的缺陷，所以本研究采用 LM 算法来优化 BP 神经网络[44-46]。

3　模型构建

根据第 2 章试验设计得到了 105 组试验数据，如表 2 所示。分别以 TBC 和 TCC 为目标，以深度、

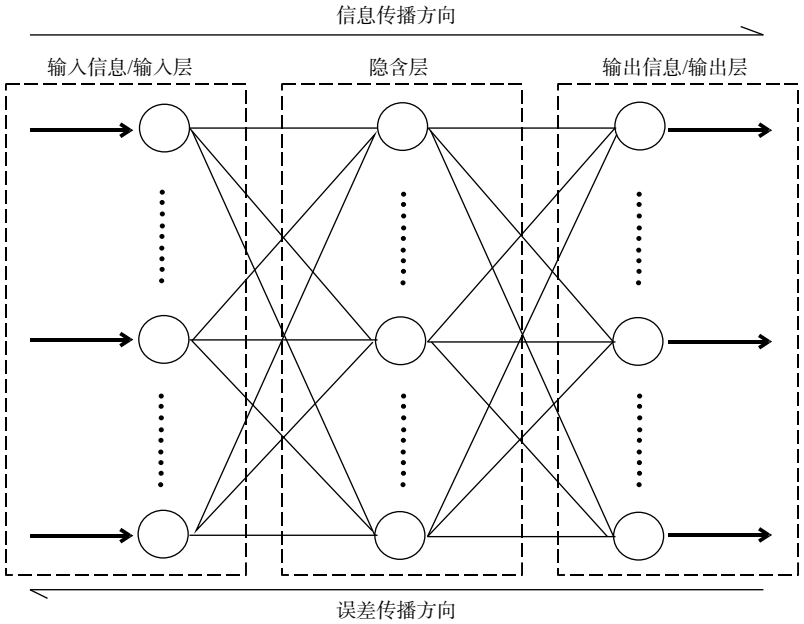


图 5　BP 神经网络结构

Fig. 5　Schematic diagram of BP neural network structure

温度、孔隙率、pH 值、ORP、COD 为影响因素，随机选取 80 组数据作为学习样本，建立 TBC 和 TCC 的预测模型，并以剩余 25 组样本作为预测样本，验证模型的准确度。

3.1　TBC 模型构建

经过数值试验发现，只有 1 个隐含层的 3 层 BP 神经网络即可满足预测精度要求。因此，本研究选用 3 层网络结构（即 1 个输入层，1 个隐含层和 1 个输出层）。共选取 6 个因素作为输入变量，所以选取输入层节点数为 6；输出变量为 TBC 指标，所以输出节点数为 1。隐含层节点数参照经验公式 $n=\sqrt{n_i+n_0}+a$ 并结合试凑法进行（其中 n_i 为输入层结点数，n_0 为输出层结点数，a 为 1 ~ 10 之间的常数）计算，得出隐含层节点数为 6。因此本研究采用神经网络的结构层次为 6×6×1，如图 6 所示。

采用 LM 算法优化 BP 神经网络模型的参数设置为：学习目标 10^{-6}，初始学习效率 0.002，迭代次数 500。输入训练样本在迭代计算 40 次后，达到预设

表 2　室内试验结果

Table 2　Indoor test results

序号	深度/m	温度/℃	孔隙率	pH值	ORP/mV	ρ(COD)/(mg·L^{-1})	*TBC*/(CFU·mL^{-1})	*TCC*/(MPN·100^{-1} mL^{-1})
1	0.1	5	0.6	6.14	36	4.81	74900	33
2	0.2	5	0.6	6.06	41	6.16	107300	22
3	0.3	5	0.6	5.94	48	8.50	111000	19
4	0.4	5	0.6	5.96	47	3.08	43700	27
…	…	…	…	…	…	…	…	…
103	0.3	25	0.55	6.41	20	8.18	482000	376
104	0.4	25	0.55	6.07	40	8.77	320000	368
105	0.5	25	0.55	7.08	−19	8.65	250000	420

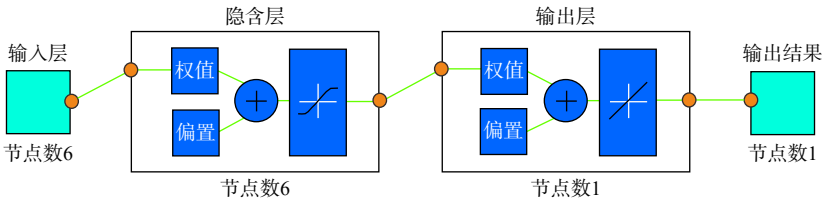


图 6　BP 神经网络结构层次图

Fig. 6　Structure hierarchy diagram of BP neural network

的试验精度要求，此时的训练结果如图 7a 所示。

3.2 TCC 模型构建

参照上文 TBC 预测模型的构建方式，构建 TCC 预测模型，在迭代计算 22 次后，达到预设的试验精度要求，此时的训练结果如图 7b 所示。

4 结果与结论

4.1 结 果

将试验数据中剩余的 25 组预测样本数据分别输入上述所建立的 TBC、TCC 预测模型中，TBC、TCC 预测结果与试验结果对比如图 8 所示，TBC、TCC 试验结果与预测结果变化趋势如图 9 所示。

分别计算 TBC、TCC 基于预测模型的预测结果与试验结果的绝对误差与相对误差，计算结果如表 3 所示。

结合图 8 和表 3 可以看出，TBC 的模型预测结果与试验结果的最大绝对误差为 50 000，最大相对误差为 11.52%，平均相对误差为 5.05%。TCC 的模型预测结果与试验结果的最大绝对误差为 40，最大相对误差为 14.55%，平均相对误差为 6.96%，平均相对误差均小于 10%，均符合工程要求。由图 9 可以看出，TBC、TCC 模型的预测结果变化趋势与试验结果变化趋势相同。

4.2 结 论

影响地下水中微生物–毒理指标演化的因素众多，它们之间具有很强的随机性、非线性和不确定性，用常规的数学模型难以准确进行表达。本研究采用 LM 优化的 BPNN 算法，根据有限的样本建立了高寒地区影响地下水微生物演化的评价指标与地下水微生物–毒理指标演化之间的非线性预测模型，结果表明：①在本试验条件下，TBC、TCC 模型的预测结果与试验结果平均相对误差均小于 10%，符合工程要求；②预测模型的预测结果与室内试验结果变化

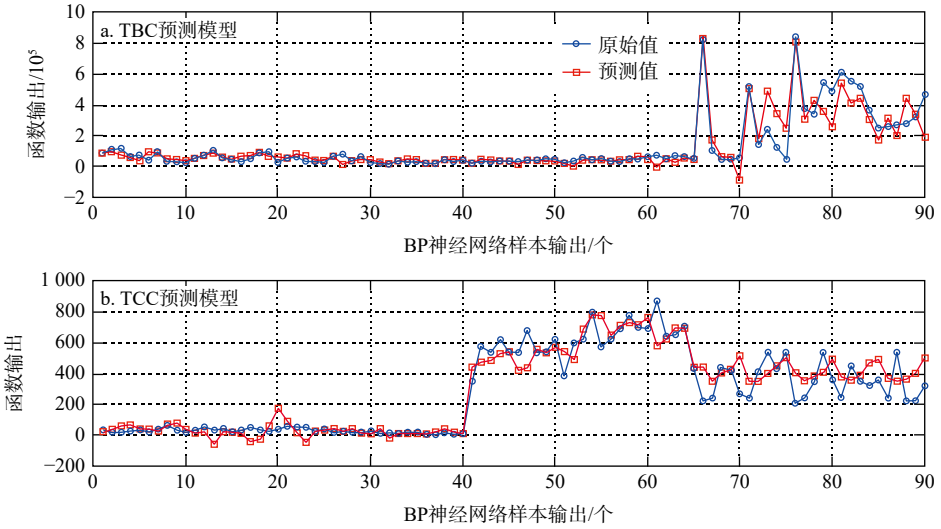


图 7 TBC (a) 和 TCC (b) 预测模型的训练结果图

Fig. 7 Training results of TBC (a) and TCC (b) predictive model

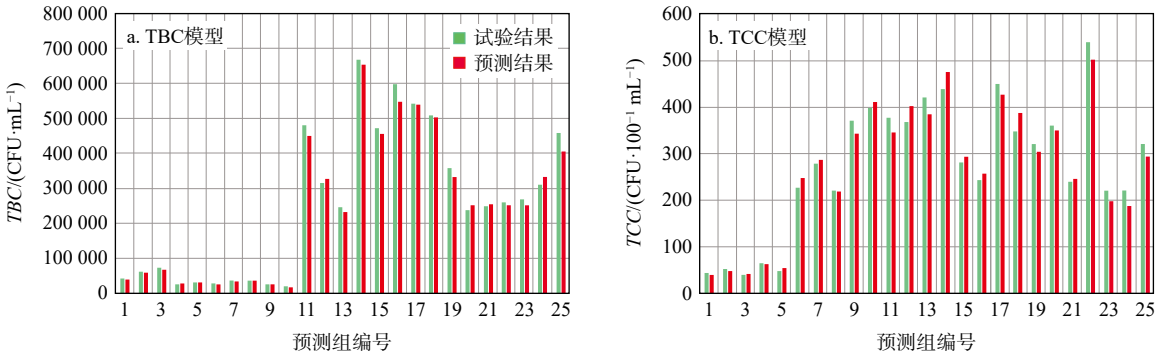


图 8 TBC (a) 和 TCC (b) 模型预测结果与试验结果对比图

Fig. 8 Comparison between the predicted results of TBC (a) and TCC (b) model and the experimental results

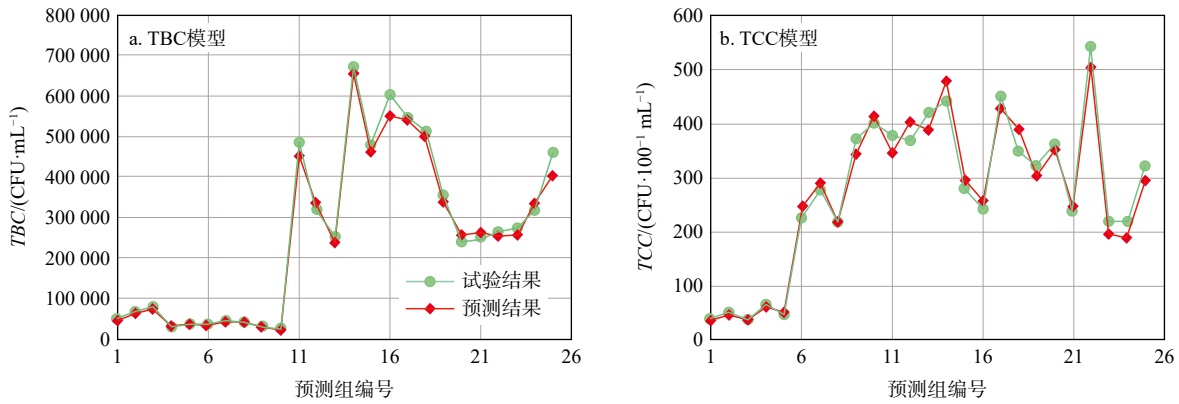


图 9　TBC (a) 与 TCC (b) 模型预测结果与试验结果变化趋势图

Fig. 9　Comparison between the predicted results of TBC (a) and TCC (b) model and the experimental results

表 3　TBC、TCC 模型预测结果与试验结果的误差

Table 3　Error between the predicted results of TBC and TCC model and the experimental results

序号	TBC预测模型		TCC预测模型	
	绝对误差	相对误差/%	绝对误差	相对误差/%
1	2360	5.18	4	9.09
2	600	0.94	4	7.69
3	5100	6.71	−2	−5.13
4	−1970	−6.75	3	4.62
5	1500	4.17	−5	−10.42
6	2670	8.14	−21	−9.29
7	2950	7.20	−10	−3.60
8	−200	−0.50	3	1.36
9	70	0.25	28	7.55
10	2560	10.64	−14	−3.52
11	30000	6.22	30	7.98
12	−11000	−3.44	−34	−9.24
13	15400	6.16	34	8.10
14	15800	2.36	−37	−8.41
15	17000	3.59	−14	−5.00
16	50000	8.33	−14	−5.76
17	3000	0.55	23	5.12
18	9800	1.91	−40	−11.49
19	25400	7.06	17	5.31
20	−14200	−5.92	10	2.78
21	−5000	−1.98	−6	−2.50
22	8700	3.30	38	7.04
23	17400	6.40	23	10.45
24	−22200	−7.12	32	14.55
25	53000	11.52	26	8.13

趋势一致，可有效预测高寒地区地下水微生物毒理指标的演化趋势；③高原地区地下水微生物−毒理指标的建立，为研究高寒地区水资源污染现状及土水环境污染变化趋势提供了新的思路，具有广泛的应用前景。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报·2022[M]. 北京：中国水利水电出版社，2023.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin·2022[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2023.（in Chinese）

[2] 中华人民共和国生态环境部，中国环境状况公报·2022[M]. 北京：中华人民共和国生态环境部出版社，2023.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, China Environmental Situation Bulletin·2022[M] Beijing: Publishing House of the Ministry of ecological environment of the People's Republic of China, 2023.（in Chinese）

[3] 中华人民共和国生态环境部. 全国地下水污染防治规划（2011-2020 年）[Z]. 北京：[出版社不详]，2015.
Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China, National Groundwater Pollution Control Plan（2011-2020）[Z]. Beijing: [S. n.], 2015.（in Chinese）

[4] 辛娇娇，索南顿珠，娄永志，等. 西藏牦牛粪便大肠杆菌毒力特性、耐药性与Ⅰ类整合子分子特征相关性分析 [J]. 中国畜牧兽医，2023，50（10）：4210-4222.
XIN J J, SUO N D Z, LOU Y Z, et al. Correlation analysis on virulence characteristics, drug resistance and molecular features of class Ⅰ integrator of escherichia coli isolated from feces in Tibetan yak[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2023, 50（10）：4210-4222.（in Chinese with English abstract）

[5] 李荣. 高原地区藏族儿童感染性腹泻病原分析 [J]. 中外医疗，2009，28（12）：131.
LI R. Pathogen analysis of infectious diarrhea in Tibetan children in plateau area[J]. China & Foreign Medical Treatment, 2009, 28（12）：131.（in Chinese）

[6] 陈家露，蔡重振，次旦，等. 西藏那曲市羊源大肠杆菌分离鉴定及耐药性研究 [J]. 中国畜牧兽医，2019，46（12）：3759-3767.
CHEN J L, CAI C Z, CI D, et al. Isolation, identification and drug resistance analysis of sheep *Escherichia coli* in Naqu, Tibet[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2019, 46（12）：

3759-3767.（in Chinese with English abstract）

[7] 毛惠玲, 陈席敏, 汤文慧, 等. 川西北高原地区牦牛腹泻大肠埃希菌毒力基因检测及致病性分析 [J]. 中国兽医学报, 2023, 43(8): 1658-1665.
MAO H L, CHEN X M, TANG W H, et al. Detection of virulence gene and pathogenicity analysis of *Escherichia coli* from yak diarrhea in northwest Sichuan Plateau[J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2023, 43(8): 1658-1665.（in Chinese with English abstract）

[8] 王昱昊. 肠道菌群参与高原胃肠应激发病的相关作用研究 [D]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2022.
WANG Y H. Correlational research on gut microbiota in gastrointestinal stress on the Plateau[D]. Xi'an: Air Force Medical University of PLA, 2022.（in Chinese with English abstract ）

[9] 贡嘎, 王刚, 罗润波, 等. 西藏牦牛源大肠杆菌分离株的致病性及遗传进化分析研究 [J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 57-62.
GONGGA, WANG G, LUO R B, et al. Pathogenic and phylogenetic analysis on the *Escherichia coli* derived from Tibetan yak[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 57-62.（in Chinese with English abstract）

[10] 赵瑜. 西藏农村生活饮用水微生物污染状况调查分析 [J]. 西藏科技, 2009(10): 26-28.
ZHAO Y. Investigation and analysis on microbial pollution of drinking water in rural areas of Tibet[J]. Tibet's Science and Technology, 2009(10): 26-28.（in Chinese）

[11] 程鹏鹏, 孔理杨, 尼玛朱杰, 等. 拉萨市部分乡村生活饮用水卫生微生物调查 [J]. 西藏科技, 2016(11): 40-41.
CHENG P P, KONG L Y, NI M Z J, et al. Investigation on hygienic microorganisms of drinking water in some rural areas of Lhasa City[J]. Tibet Science and Technology, 2016(11): 40-41.（in Chinese）

[12] 魏素珍, 徐瑾, 苏立彬, 等. 西藏农村生活饮用水微生物安全状况及风险评估 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(17): 57-60.
WEI S Z, XU J, SU L B, et al. Safety status and risk assessment of microorganisms in drinking water in Tibetan rural areas[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(17): 57-60.（in Chinese with English abstract）

[13] 王秀英, 陈添弥, 张伯玲, 等. 西藏地区急性腹泻侵袭性大肠杆菌的鉴定及药敏试验 [J]. 解放军预防医学杂志, 1994, 12(5): 383-385.
WANG X Y, CHEN T M, ZHANG B L, et al. Identification and drug sensitivity test of invasive *Escherichia coli* in acute diarrhea in Tibet[J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese PLA, 1994, 12(5): 383-385.（in Chinese）

[14] 徐莉立, 赵金华, 王学文, 等. 高原地区儿童脑炎脑膜炎症候群病原监测分析 [J]. 中国公共卫生, 2013, 29(9): 1260-1262.
XU L L, ZHAO J H, WANG X W, et al. Pathogen detection for syndromes of encephalitis and meningitis among child patients in plateau of Qinghai Province from 2010 to 2011[J]. Chinese Journal of Public Health, 2013, 29(9): 1260-1262.（in Chinese with English abstract）

[15] 秦菲. 高原地区胃肠肿瘤患者术后医院感染部位及病原体耐药情况分析 [J]. 高原医学杂志, 2019, 29(2): 46-49.
QIN F. Analysis of nosocomial infection site and pathogen drug resistance in patients with gastrointestinal tumor after operation in plateau area[J]. Journal of High Altitude Medicine, 2019, 29(2): 46-49.（in Chinese）

[16] 张学慧. 高原地区儿童脑炎脑膜炎症候群病原监测结果研究 [J]. 东方药膳, 2020(9): 122-123.
ZHANG X H. Study on the results of pathogen monitoring of encephalitis and meningitis syndrome in children in plateau area[J]. Oriental Medicated Diet, 2020(9): 122-123.（in Chinese）

[17] 刘娟娟. 环境条件对土壤微生物多样性和硝化作用的影响 [D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
LIU J J. Effects of environmental conditions on soil microbial diversity and nitrification[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.（in Chinese with English abstract）

[18] 于小彦, 杨艳芳, 张平究, 等. 不同水分条件下生物质炭添加对湿地土壤微生物群落结构的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1163-1171.
YU X Y, YANG Y F, ZHANG P J, et al. Effects of biochar addition on soil microbial community structure under different water conditions[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(9): 1163-1171.（in Chinese with English abstract）

[19] 韩志捷, 李洁, 王伟荔, 等. 微生物在多孔介质中的迁移机制及影响因素 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(2): 127-130.
HAN Z J, LI J, WANG W L, et al. Study on transport mechanisms and influencing factors of microorganisms in porous media[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 127-130.（in Chinese with English abstract）

[20] 王杰, 彭永臻, 杨雄, 等. 温度对活性污泥沉降性能与微生物种群结构的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 109-116.
WANG J, PENG Y Z, YANG X, et al. Effect of temperature on activated sludge settleability and microbial community structure[J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 109-116.（in Chinese with English abstract）

[21] 王帅伟. 石漠化区耕作污染的地下水微生物–毒理联合响应机制及模拟 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2019.
WANG S W. Microbial-toxicological combined response mechanism and simulation of groundwater polluted by farming in rocky desertification area[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019.（in Chinese with English abstract）

[22] 杨靖. 大肠杆菌对环境纳米颗粒及重金属铬共迁移的影响机制研究 [D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2021.
YANG J. Effect of *Escherichia coli* on Co-transport of environmental nanoparticles and heavy metal chromium[D]. Suzhou Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2021.（in Chinese with English abstract）

[23] 丁美月. 大肠杆菌 O157: H7 在不同土地利用类型的土壤中的存活行为及其影响因素 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
DING M Y. Survival behavior of *Escherichia coli* O157: H7 in soil from areas with different land use types [D]. Changchun: Jilin University, 2018.（in Chinese with English abstract）

[24] 李梅. 水环境中 ZnO 纳米颗粒对大肠杆菌的毒性及影响因素 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
LI M. The toxicity and impact factors of ZnO nanoparticles to *Escherichia coli* in aquatic environment[D]. Hangzhou: Zhejiang Uni-

versity, 2012. (in Chinese with English abstract)

[25] 张驰, 潘懋, 胡水清, 等. 融合储层纵向信息的机器学习岩性识别方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 289-299.
ZHANG C, PAN M, HU S Q, et al. A machine learning lithologic identification method combined with vertical reservoir information[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 289-299. (in Chinese with English abstract)

[26] ZHANG Y, HU X H, JIANG X P. Multi-view clustering of microbiome samples by robust similarity network fusion and spectral clustering[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2017, 14(2): 264-271.

[27] OUDAH M, HENSCHEL A. Taxonomy-aware feature engineering for microbiome classification[J]. BMC Bioinformatics, 2018, 19(1): 227.

[28] ZIELIŃSKI B, PLICHTA A, MISZTAL K, et al. Deep learning approach to bacterial colony classification[J]. PLoS One, 2017, 12(9): e0184554.

[29] JOHNSON H R, TRINIDAD D D, GUZMAN S, et al. A machine learning approach for using the postmortem skin microbiome to estimate the postmortem interval[J]. PLoS One, 2016, 11(12): e0167370.

[30] 任俊帆, 薛亮, 聂捷, 等. 基于随机森林算法的二氧化碳驱油与封存主控因素研究 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 147-156.
REN J F, XUE L, NIE J, et al. Research on the main control factors of carbon dioxide flooding and storage based on random forest algorithm[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 147-156. (in Chinese with English abstract)

[31] KELEŞ Z, SONUGÜR G, ALÇIN M. The modeling of the rucklidge chaotic system with artificial neural networks[J]. Chaos Theory and Applications, 2023, 5(2): 59-64.

[32] 孙伟超, 袁颖. 基于 PCA-LM-BP 融合的砂土液化预测评价模型 [J]. 中国科技论文, 2018, 13(13): 1511-1515.
SUN W C, YUAN Y. Prediction model of sand liquefaction based on PCA-LM-BP fusion[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(13): 1511-1515. (in Chinese with English abstract)

[33] JEWETT D G, HILBERT T A, LOGAN B E, et al. Bacterial transport in laboratory columns and filters: Influence of ionic strength and pH on collision efficiency[J]. Water Research, 1995, 29(7): 1673-1680.

[34] STRAUB T M, PEPPER I L, GERBA C P. Persistence of viruses in desert soils amended with anaerobically digested sewage sludge[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(2): 636-641.

[35] GANNON J, TAN Y H, BAVEYE P, et al. Effect of sodium chloride on transport of bacteria in a saturated aquifer material[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, 57(9): 2497-2501.

[36] SATO Y, OKANO K, HONDA K. Effects of small heat shock proteins from thermotolerant bacteria on the stress resistance of *Escherichia coli* to temperature, pH, and hyperosmolarity[J]. Extremophiles, 2024, 28(1): 12.

[37] 姚舜译. 大肠杆菌在饱和多孔介质中的迁移过程研究 [D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2016.
YAO S Y. Transport of Escherichia coli in Saturated Porous Media[D]. Yaan Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)

[38] 袁雪梅. 纳米银和大肠杆菌在饱和多孔介质中的共迁移研究 [D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2017.
YUAN X M. Co-transport of silver nanoparticles and *Escherichia coli* in saturated porous media[D]. Yaan Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)

[39] 百度文库. 1961-2018 年西藏自治区阿里地区噶尔县月尺度温度和降雨气候数据集 [J/OL]. https://wenku.baidu.com/view/57975686ef3a87c24028915f804d2b160b4e86cf.html?_wkts_=1715350672899&bdQuery=%E5%99%B6%E5%B0%94%E5%8E%BF%E5%8E%86%E5%B9%B4%E6%9C%88%E5%B9%B3%E5%9D%87%E6%B0%94%E6%B8%A9, 2024-12-22.
Baidu Wenku. Monthly Temperature and Rainfall Climatic Data Set of Gar County, Ali Prefecture, Xizang Autonomous Region, 1961-2018[J/OL]. https://wenku.baidu.com/view/57975686ef3a87c24028915f804d2b160b4e 86cf.html?_wkts_=1715350672899&bdQuery=%E5%99%B6%E5%B0%94%E5%8E%BF%E5%8E%86%E5%B9%B4%E6%9C%88%E5%B9%B3%E5%9D%87%E6%B0%94%E6%B8%A9, 2024-12-22.(in Chinese)

[40] 康小兵. 西藏阿里地区第四系地下水资源形成控制因素研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
KANG X B. Study on the formation and controlling factors of groundwater resources in Quaternary of Ali area, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)

[41] 姜英杰, 邹晓葵, 彭增起. 大肠杆菌在猪背最长肌上生长预测模型的建立 [J]. 食品科学, 2008, 29(12): 115-119.
JIANG Y J, ZOU X K, PENG Z Q. Construction of growth prediction model of escherichia coli in longissimus dorsi muscle[J]. Food Science, 2008, 29(12): 115-119. (in Chinese with English abstract)

[42] 张辉, 杨振泉, 赵隽, 等. 食源性大肠杆菌在即食食品中的生长预测模型 [J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1122-1127.
ZHANG H, YANG Z Q, ZHAO J, et al. Establishment of a predictive growth model for foodborne *Escherichia coli* in ready-to-eat food[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2011, 27(5): 1122-1127. (in Chinese with English abstract)

[43] 胡振东, 郭明强. 改进水循环优化 BP 神经网络的大坝变形预测 [J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 92-95.
HU Z D, GUO M Q. Dam deformation prediction method based on IWCA-BP neural network[J]. Geospatial Information, 2024, 22(1): 92-95. (in Chinese with English abstract)

[44] 高智慧, 左璐. 原状黄土天然孔隙比定量评价方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 53-62.
GAO Z H, ZUO L. A quantitative evaluation method regarding the natural void ratio of undisturbed loess[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 53-62. (in Chinese with English abstract)

[45] 魏玉明, 党星海. BP 神经网络在不等时距滑坡变形预报中的应用 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(12): 2959-2962.
WEI Y M, DANG X H. BP neural network model for time-distance in the range of landslide deformation prediction of the applied research[J]. Science Technology and Engineering, 2010,

10(12): 2959-2962. (in Chinese with English abstract)

[46] 盛仲飙, 同晓荣. BP 神经网络在曲线拟合中的应用 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(28): 6998-7000.

SHENG Z B, TONG X R. The application of BP neural networks in curve fitting[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(28): 6998-7000. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于 LM-BPNN 的高寒地区地下水微生物–毒理指标预测模型”

Prediction model of groundwater microbiological toxicological indicators in alpine regions based on LM-BPNN

JIA Zhuopeng[1,2], BI Junbo[3,4*], YUAN Yong[1], QUAN Xin[5], WANG Shuaiwei[3], SUN Weichao[3,4]

1. Ngari Prefecture People's Hospital, Ngari Area Xizang 859400, China;
2. The First Affiliated Hospital of Xi'an Medical University, Xi'an 710000, China;
3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;
4. Chinese Academy of Geological Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
5. Xi'an Medical College, Xi'an 710021, China

First author, E-mail: 13088969796@163.com

* Corresponding author, E-mail: bjunbo@mail.cgs.gov.cn

Abstract: [**Objective**] To establish a prediction model for groundwater microbial toxicological indicators (total bacteria count [TBC] and total coliform count [TCC]) in alpine regions, [**Methods**] this work focuses on the microbial toxicity indicators (TBC and TCC) of groundwater from a specific water source in the western plateau region of China. By using an orthogonal experimental design combined with indoor soil column batch experiments, we varied environmental factors such as pH, temperature, and porosity to obtain the evolution results of TBC and TCC under different depths, pH values, oxidation-reduction potential (ORP) values, temperatures, porosities, and chemical oxygen demand (COD) conditions. On the MATLAB platform, a predictive model for microbial toxicity indicators in groundwater in frigid regions was subsequently established using the LM (Levenberg Marquardt)-optimized BPNN (neural network) algorithm. [**Results**] These results indicate that the predictive results of the established TBC and TCC models align well with the experimental results. The maximum relative errors are less than 15% (meeting engineering requirements), yielding 11.52% and 14.55% for TBC, and TCC, respectively. Moreover, the evolutionary trends of TBC and TCC match the experimental results. [**Conclusion**] This model can be used for predicting microbial toxicity indicators in groundwater in plateau regions, and the results of this study provide new insights for predicting microbial toxicity indicators in groundwater in high-elevation areas.

Key words: microbiological toxicological indicator; TCC; TBC; environmental condition; groundwater quality indicator; LM-BPNN; prediction model; alpine region

Received: 2024-06-19; Revised: 2024-08-22; Accepted: 2024-08-26

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240345