

高瑜, 张华, 康晓莉, 等. 云南省主要盆地地下水水质监测与变化趋势分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 542-552.

DOI: 10.11932/karst20220404

# 云南省主要盆地地下水水质监测与变化趋势分析

高瑜<sup>1</sup>, 张华<sup>1</sup>, 康晓莉<sup>1</sup>, 周俊蓉<sup>1</sup>, 武红梅<sup>1</sup>, 刘海峰<sup>1</sup>, 叶咸<sup>2</sup>

(1. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室/云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 2. 云南省交通规划设计研究院有限公司 云南省数字交通重点实验室(筹), 云南昆明 650041)

**摘要:** 云南省的高原山间盆地是重要的水源汇集区, 人口聚集和经济活动中心, 也是对水环境影响和变化具有指标意义的环境水文地质单元。文章阐述了云南省高原主要山间盆地地下水水质监测概况, 并依据多年地下水水质监测数据, 按照孔隙水、裂隙水、岩溶水三种地下水类型进行了水质评价。通过数据统计法、Piper 三线图、小波神经网络时间序列分析, 预测云南省地下水化学特征及水质变化趋势。研究发现: 地下水化学类型种类复杂多样, 以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型为主。氨氮、锰、氟化物、硝酸根离子等含量超标率较高, 是导致地下水水质超标的主要指标, 不同污染指标的污染来源不同, 主要为生活污染和工业污染。根据统计分析结果显示云南高原主要盆地水质总体上呈稳定趋势, 针对研究结果提出了地下水环境保护的措施建议。

**关键词:** 水环境; 地下水水质; 地下水监测; 污染指标; 高原盆地

中图分类号: P641.7 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)04-0542-11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

地下水是自然界水循环体系中不可分割的一部分, 是支撑地球生态系统的关键要素。地下水资源及其生态价值不仅取决于水量的大小, 还取决于水质的好坏。在高原山间盆地底部平坝区广泛分布的松散堆积层、基岩裂隙、岩溶孔洞等介质中赋存了大量的地下水资源, 因此, 地下水成为当地居民生活和工农业生产的重要供水水源。据周仰效等<sup>[1]</sup>统计, 在我国约有 60% 的城市主要依赖地下水供水, 而农业灌溉用水中地下水的比例甚至超过 80%, 地下水的过度开发造成了地面塌陷、地面沉降及地下

水系统的破坏。而地下水的补给过程中受到农药化肥、城市雨水污水、工业生产的污水、采矿的废水、固体废渣淋滤等影响, 地下水水质不断朝着恶化的方向发展<sup>[2-4]</sup>, 饮水安全状况和人居环境质量下降, 严重影响着我国经济社会的可持续发展。云南省地下水调查工作始于 20 世纪 50 年代末期<sup>[5]</sup>, 并建立了地下水动态监测网点, 21 世纪初开展了云南重点岩溶流域水文地质环境地质调查工作, 在地下水量和质的调查研究与评价方面取得了大量研究成果<sup>[6-7]</sup>。云南高原地质环境极为复杂, 大量分布可溶岩、红层, 地质构造极为发育, 地下水环境脆弱<sup>[8]</sup>, 容易受到地表水环境和人类经济活动的影响<sup>[9]</sup>, 为此

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502502); 广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题(KDL202101); 国家地下水监测工程(WF202000PB)

第一作者简介: 高瑜(1991—), 女, 工程师, 主要从事水文、工程、环境地质调查与研究。E-mail: 993536618@qq.com。

通信作者: 张华(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水文、工程、环境地质调查与研究。E-mail: ybddysghs.zhh@163.com。

收稿日期: 2022-03-10

开展地下水水质、水位的长期监测和评价工作非常必要。针对水环境、地下水污染、水位变化、水质评价、模拟等方法、研究成果众多<sup>[10-14]</sup>，云南省面积在 100 km<sup>2</sup> 以上的盆地有近 50 个，已布设地下水监测点的盆地为 7 个，分别在昆明、玉溪、大理、楚雄、曲靖、景洪、开远。本文主要收集了云南省 79 个省级地下水监测点 2016 年至 2021 年的动态监测数据，开展枯水期和丰水期水质状况分析，评估云南省内 7 个主要盆地地下水水质特征和总体变化趋势，依据重要监测点超标项指标，采用数据统计法、Piper 三线图，以及对昆明、楚雄盆地典型监测点进行小波神经网络时间序列分析，预测云南省地下水化学动态特征及水质变化趋势，旨在为当地经济和社会发展、地下水资源的合理开发利用与有效保护提供科学依据。

## 1 监测点基本情况

截止 2021 年，云南省共有 183 个省级地下水监测点，分布在昆明、玉溪、大理、楚雄、曲靖、西双版纳、红河七个州市<sup>[15]</sup>。按监测井地下水类型统计，19 个监测孔隙水，14 个监测裂隙水（其中 6 个为地热水），46 个监测岩溶水。按监测项目分类，监测水位的为 113 个，监测流量的为 22 个，监测水质的 79 个，监测水温的为 27 个。其中，同时观测流量、水温的 22 个，同时观测水温、水质的 18 个，同时观测流量、水质的 13 个，同时观测水位、水温的 5 个（表 1）。云南省面积在 100 km<sup>2</sup> 以上的盆地有近 50 个，仅有 7 个布设水质监测点，其余盆地仍为地下水监测的空白区（图 1）。

## 2 地下水化学类型及水质变化趋势

### 2.1 水化学类型

图 2 为研究区 2016 年与 2021 年主要阴阳离子组成的 Piper 三线图。2016 年与 2021 年相比，整体呈现出：水样点均集中落在偏左端，阳离子中，Ca<sup>2+</sup> 含量最多<sup>[16]</sup>，相对摩尔百分比为 40%~80%，其次为 Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>，相对摩尔百分比为 80%~100%。阴离子中，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的含量最多，相对摩尔百分比为 80%~100%，远远高于 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量。相比 2016 年，2021 年的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 比重稍有增大。相比枯水期，丰水期的水化学类型稍有增多。研究区水化学类型主要为 HCO<sub>3</sub>-Ca 和 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg 型，少量为 HCO<sub>3</sub>-Ca·Na、HCO<sub>3</sub>-Mg、HCO<sub>3</sub>-Cl-Ca、HCO<sub>3</sub>-Cl·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg、HCO<sub>3</sub>-Cl-Mg·Ca 等<sup>[17]</sup>。

### 2.2 评价方法及结果

采用《地下水质量标准 (GB/T 14848—2017)》<sup>[18]</sup> 对 79 个水质点，近 6 年的枯、丰期水质进行评价，指标包括 pH、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、挥发性酚类、阴离子表面活性剂、高锰酸盐指数、氨氮、钠、亚硝酸盐、硝酸盐、氰化物、氟化物、碘化物、汞、砷、硒、镉、铬（六价）、铅、总 α 放射性、总 β 放射性共计 27 项。按地下水类型进行统计分析得出以下水质特征及变化趋势。

#### 2.2.1 孔隙水

对 19 个孔隙水水质监测点数据进行评价结果

表 1 云南省地下水监测站点分布情况表

Table 1 Distribution of groundwater monitoring sites in Yunnan Province

| 州市 | 数量  | 监测项目分类/个 |    |    |    |         |         |         |         |
|----|-----|----------|----|----|----|---------|---------|---------|---------|
|    |     | 水位       | 流量 | 水质 | 水温 | 流量、水温共用 | 水位、水质共用 | 流量、水质共用 | 水位、水温共用 |
| 昆明 | 110 | 68       | 9  | 50 | 14 | 9       | 11      | 4       | 5       |
| 玉溪 | 12  | 7        | 3  | 6  | 3  | 3       | 1       | 3       | 0       |
| 开远 | 21  | 11       | 3  | 5  | 3  | 3       | 0       | 0       | 0       |
| 大理 | 11  | 7        | 2  | 5  | 2  | 2       | 1       | 2       | 0       |
| 楚雄 | 11  | 9        | 1  | 5  | 1  | 1       | 3       | 1       | 0       |
| 曲靖 | 10  | 6        | 2  | 5  | 2  | 2       | 1       | 2       | 0       |
| 景洪 | 8   | 5        | 2  | 3  | 2  | 2       | 1       | 1       | 0       |
| 合计 | 183 | 113      | 22 | 79 | 27 | 22      | 18      | 13      | 5       |

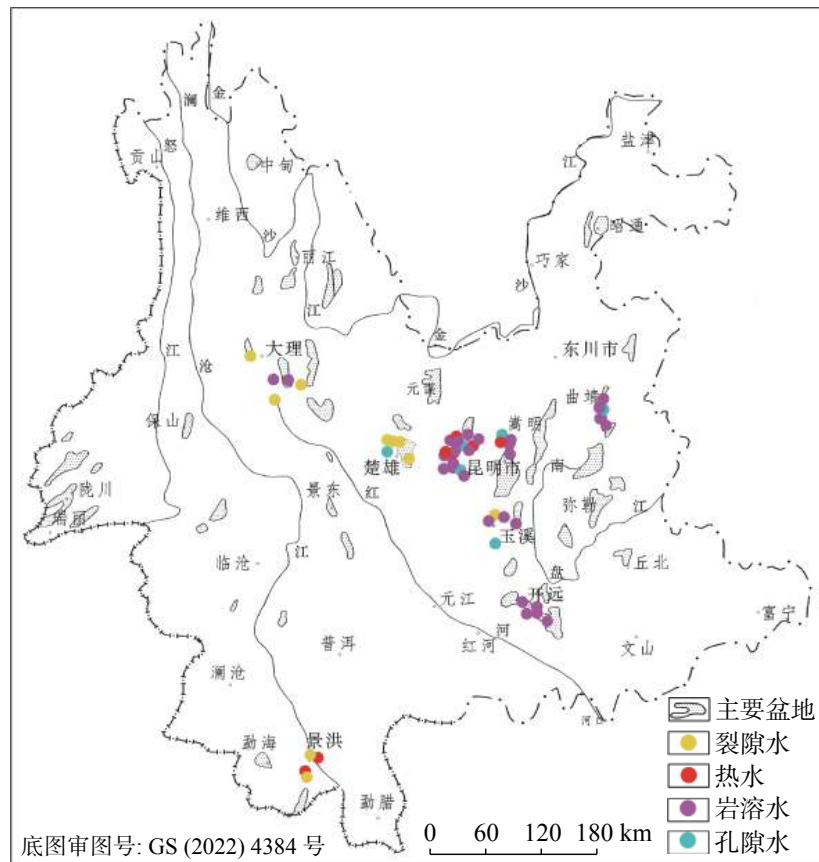


图1 水质监测点分布图

Fig. 1 Distribution map of monitoring sites of water quality

如图3。近6年来,孔隙水水质超标率保持稳定。2020年丰水期水质明显劣于枯水期水质,超标率达78.95%,其余年份均在60%上下波动。就已有统计结果分析,孔隙水水质将保持稳定,为V类水。超标组分主要为pH、总硬度、碘离子、硝酸根、氨氮等。

### 2.2.2 裂隙水

对14个裂隙水水质监测点进行评价结果如图4。近6年来,裂隙水水质超标率基本不变,但是,V类水的比重呈上升趋势,主要呈上升趋势的地域为昆明、楚雄、玉溪。2017–2019年超标率相对较低。就已有统计结果分析,裂隙水水质呈变差趋势。超标组分主要为锰离子、pH、氟化物等。

### 2.2.3 岩溶水

对46个岩溶水水质监测点进行评价结果如图5。近6年来,岩溶水水质超标率逐渐降低,枯水期超标率由原来的23.91%降为15.22%,主要为II、III类水。超标组分主要为锰离子、砷离子、氨氮等。就已有

统计结果分析,岩溶水水质超标率将逐渐降低至限值,2018年开始岩溶水水质超标率 $<20\%$ ,至今仍保持稳定,未继续降低也未升高。

整体看来,岩溶水水质明显优于孔隙水、裂隙水,枯水期水质普遍优于丰水期。锰离子、铵根离子、硝酸根离子、氟化物为引起水质超标的主要因子,锰离子的影响率最大,硝酸根离子、pH的影响率在逐渐降低,氨氮离子的影响率变幅不明显(图6)。

## 3 水质变化成因分析

地下水水质变化主要受控于埋藏条件和水动力条件。因赋存于含水介质中,地下水不像地表水那样容易受直接污染。本文根据地下水赋存介质的不同进行地下水水质变化成因分析:

### 3.1 孔隙水

孔隙水主要分布于盆地及河谷地区,埋藏一般较浅。孔隙含水层渗透性强,直接接受降雨及地表

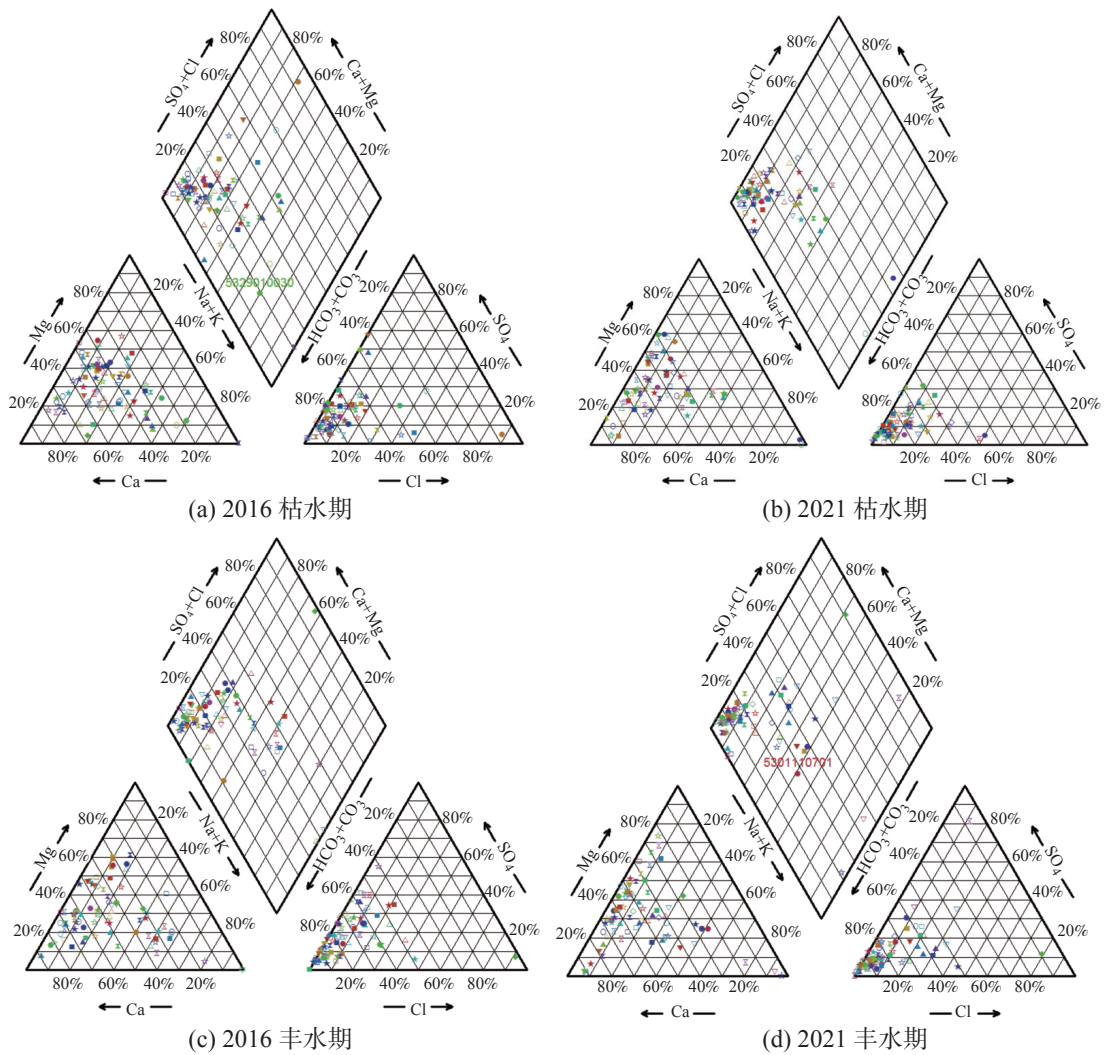


图 2 云南省 2016 年与 2021 年 piper 三线图

Fig. 2 Piper trilinear diagram of Yunnan Province in 2016 and 2021

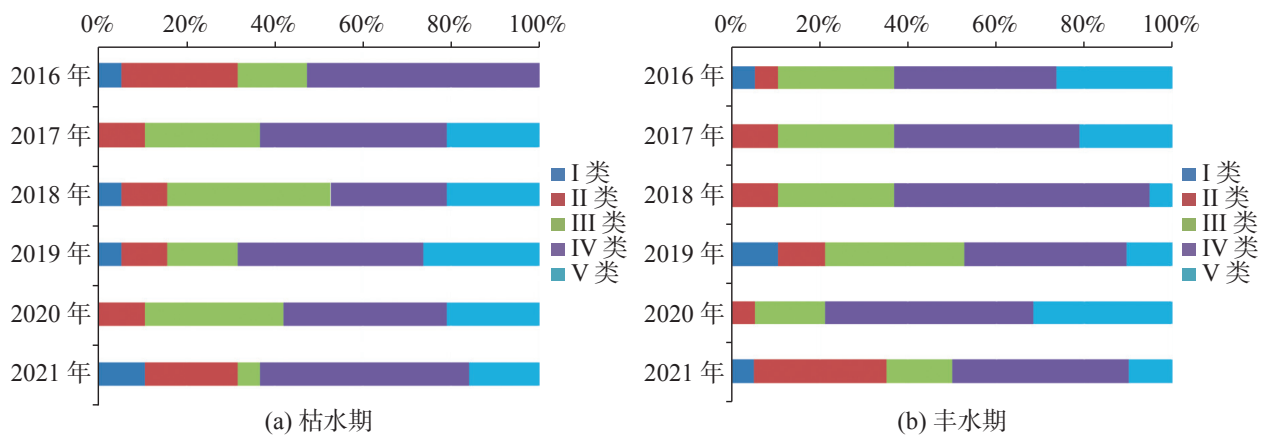


图 3 孔隙水水质评价结果条形图

Fig. 3 Bar chart of quality evaluation of pore water

水补给,部分接受河流侧向补给<sup>[19]</sup>,地下水与地表水水力联系密切。地下水水质的恶化与城市生活污水

排放、工业“三废”排放及农业施用化肥、农药、灌溉等因素息息相关<sup>[20]</sup>。孔隙水污染原因机制主要为

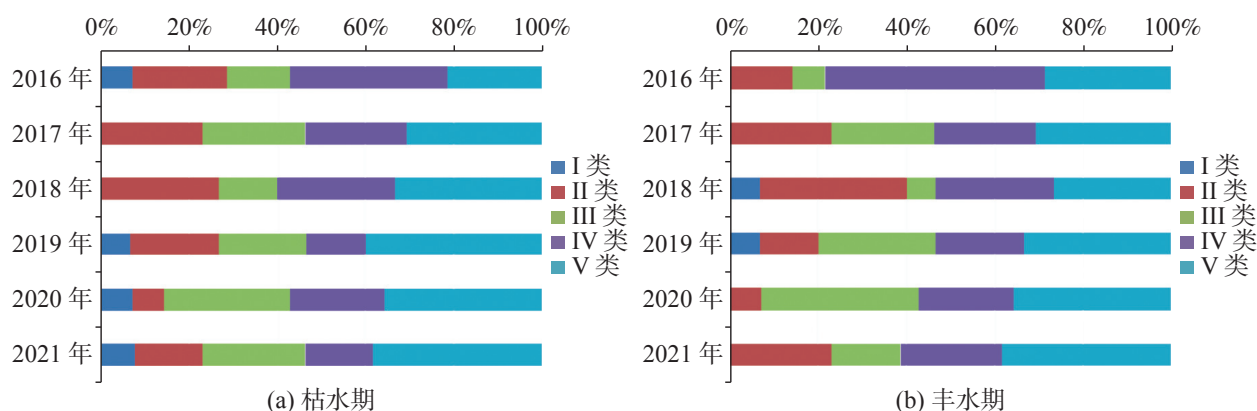


图4 裂隙水水质评价结果条形图  
Fig. 4 Bar chart of quality evaluation of fissure water

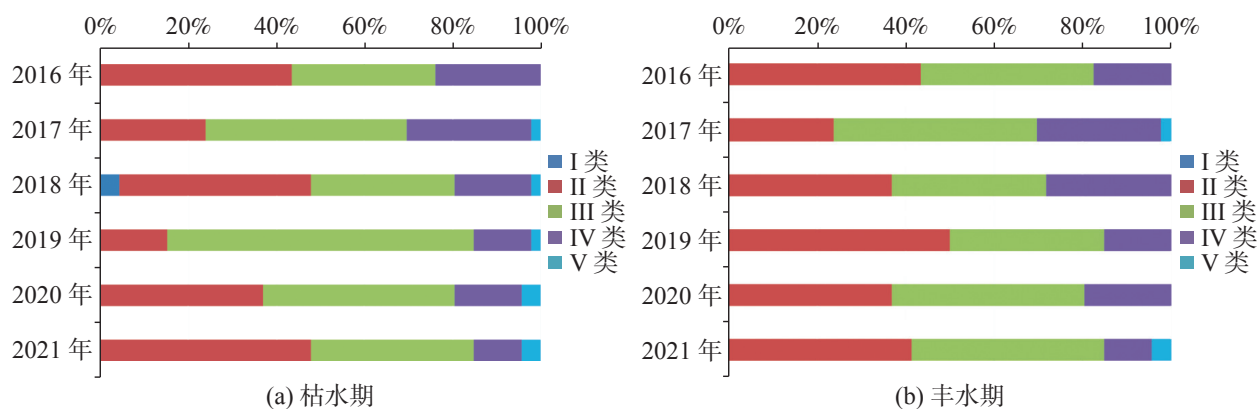


图5 岩溶水水质评价结果条形图  
Fig. 5 Bar chart of quality evaluation of karst water

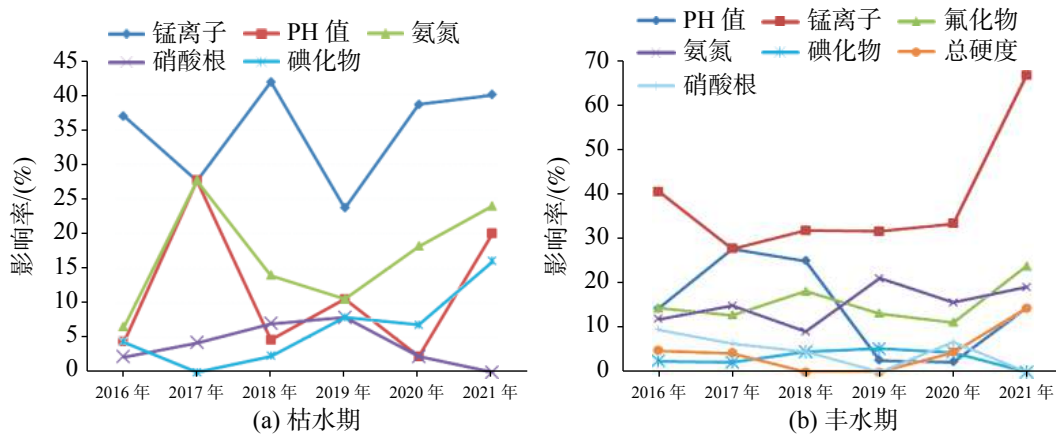


图6 水质污染影响因子变化折线图  
Fig. 6 Line chart of influence factors of water pollution

三种类型:

(1)降雨入渗型 大气降雨后, 污染物在入渗过程中, 参与到地下水的运移过程中, 使浅层孔隙水遭受污染;

(2)表水交换型 由于埋藏浅, 含水层与地表水

力联系密切, 在较平坦的地区, 地表水体不是区域最低排泄基准, 地下水与地表水体存在一定的补给排泄关系, 因而地下水与地表水有物质交换, 地下水易受地表水直接污染。如在昆明盆地内, 已污染的地表水进入孔隙含水层内, 引起浅层孔隙水水质恶化<sup>[21]</sup>;

(3)农业灌溉型 农药、化肥等在灌溉作用下,相关组分进入地下水,如昆明周边及地州部分监测点表现为氨氮、农药超标。

### 3.2 裂隙水

裂隙水埋藏相对较深,与孔隙水比较,受污染源影响相对较小。而部分水质为V类是受到地下水背景值高影响。例如楚雄的谢家河监测点,由于滇中红层区裂隙水中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 含量较高,导致其 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 常年超标<sup>[22]</sup>。

### 3.3 岩溶水

岩溶水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主。岩溶水的储水介质极为复杂,大到岩溶管道,小到溶蚀裂隙和溶蚀孔洞,地下水的径流极其复杂。受此影响,岩溶山区通常表现出生态环境脆弱,表生带调蓄功能差,地下水径流动态变幅大。在人类工程活动影响下,地下水极易遭受污染。

(1)淋滤型 在岩溶洼地区堆放的工业废渣或生活垃圾,是典型的污染源。在降雨的作用下,废弃物的渗滤液进入地下水含水系统,导致地下水水质恶化。

(2)灌入型 盆地沉积平坝边缘落水洞,或在浅覆盖岩溶地段由于岩溶塌陷形成落水洞,地表水通过落水洞直接进入岩溶水系统,引起地下水污染<sup>[23]</sup>。

(3)回灌型 大量开采地下水导致地下水位降低,形成一定区域的地下水降位漏斗,地下水动力条件改变,周围地下水向漏斗区回灌,携带污染物质进入该区,造成污染<sup>[24]</sup>,在盆地底部较为突出。

## 4 典型监测点水质模拟分析与预测

### 4.1 小波神经网络时间序列分析方法

小波神经网络是基于BP神经网络拓扑结构,以小波基函数作为隐含层节点的传递函数,构成了一种信号在前向传播的同时误差反向传播的神经网络<sup>[25]</sup>。

在输入信号序列为 $x_i(i=1,2,\dots,k)$ 时,隐含层输出计算公式为:

$$h(j) = h\left(\frac{\sum_{i=1}^k w_{ij}x_i - b_j}{a_j}\right) \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

式中: $h(j)$ 为隐含层第 $j$ 个节点的输出值; $w_{ij}$ 为输入

层和隐含层的连接权重; $b_j$ 为小波基函数 $h_j$ 的平移因子; $a_j$ 为小波基函数 $h_j$ 的伸缩因子; $h_j$ 为小波基函数<sup>[26]</sup>。

本文采用的小波基函数为Morlet母小波基函数,公式为:

$$y = \cos(1.75x)e^{x^2/2} \quad (2)$$

输出层计算公式为:

$$y(k) = \sum_{i=1}^l w_{ik}h(i) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中: $w_{ik}$ 为隐含层到输出层的权值; $h(i)$ 为第 $i$ 个隐含层节点的输出; $l$ 为隐含层节点数; $m$ 为输出层节点数<sup>[27]</sup>。

小波神经网络权值参数修正算法采用梯度修正法修正网络的权值和小波基函数参数,从而实现小波神经网络预测输出与期望输出的逼近。

研究表明,地下水水质指标在某时刻上的数值与该位置处前一段时间的量值存在关联,即具有时间序列上的周期性。根据地下水水质的特性设计小波神经网络,该网络分为输入层、隐含层和输出层三层<sup>[28]</sup>。其中,输入层输入为当前时间节点的前 $n$ 个时间点的量值;隐含层节点由小波基函数构成<sup>[29]</sup>;输出层输出当前节点的预测量值。通过对历史地下水水质指标数据进行训练,并不断修正小波神经网络,最终使神经网络具有可信的预测功能<sup>[30]</sup>。

### 4.2 典型监测点模拟结果与分析

昆明盆地面积1474 km<sup>2</sup>,为云南省的主要岩溶断陷盆地之一<sup>[31]</sup>,楚雄盆地面积113.8 km<sup>2</sup>,距昆明165 km,为云南省主要红层断陷盆地。本文对昆明盆地和楚雄盆地的典型监测点水质进行分析预测,选取昆明盆地152号孔的硝酸根离子、楚雄盆地101号孔的锰离子、铵根离子进行模拟。模拟过程及结果如下。

(1)昆明盆地152号孔为岩溶水,硝酸根离子虽未超标,但变幅较大,故选取该点的硝酸根离子进行模拟。为了使数据更加连续,对152号孔2006年4月-2021年9月的28个硝酸根离子数据按30天进行插分,插分后得190个数据,运用Matlab进行小波神经网络模拟。通过小波神经网络得到的硝酸根离子预测值与实测值的曲线拟合较好(图7),平均百分比误差(MRE)为7.33%,均方根误差(RMSE)<sup>[32]</sup>为0.16(表2),模型预测精度较高。故该模拟可以预测

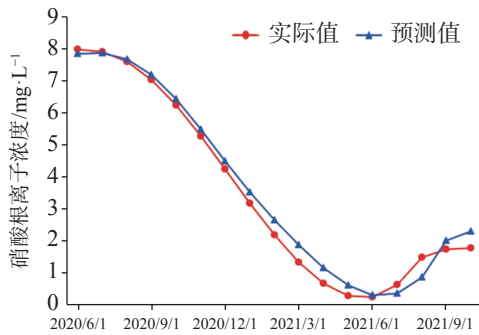


图 7 昆明盆地 152 号孔硝酸根离子浓度预测结果相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of prediction results of nitrate ion concentration in Hole 152 of Kunming basin

表 2 昆明盆地 152 号孔硝酸根离子浓度预测结果误差分析表

Table 2 Error analysis of prediction results of nitrate ion concentration in Hole 152 of Kunming basin

| 实际值/<br>mg·L <sup>-1</sup> | 预测值/<br>mg·L <sup>-1</sup> | 偏差/<br>% | 平均百分比<br>误差/% | 均方根<br>误差 |
|----------------------------|----------------------------|----------|---------------|-----------|
| 7.974 032                  | 7.836 001                  | -6.90    |               |           |
| 7.898 648                  | 7.856 258                  | -2.12    |               |           |
| 7.599 509                  | 7.661 768                  | 3.11     |               |           |
| 7.029 46                   | 7.195 764                  | 8.32     |               |           |
| 6.232 3                    | 6.439 032                  | 10.34    |               |           |
| 5.279 58                   | 5.494 991                  | 10.77    |               |           |
| 4.242 854                  | 4.494 204                  | 12.57    |               |           |
| 3.193 681                  | 3.529 283                  | 16.78    |               |           |
| 2.203 616                  | 2.663 838                  | 23.01    | 7.33          | 0.16      |
| 1.344 214                  | 1.882 355                  | 26.91    |               |           |
| 0.687 033                  | 1.181 627                  | 24.73    |               |           |
| 0.303 629                  | 0.635 833                  | 16.61    |               |           |
| 0.265 557                  | 0.334 812                  | 3.46     |               |           |
| 0.644 374                  | 0.377 119                  | -13.36   |               |           |
| 1.511 637                  | 0.890 394                  | -31.06   |               |           |
| 1.75                       | 2.030 851                  | 14.04    |               |           |

短期内硝酸根离子的浓度,根据预测结果,下一个月硝酸根离子的浓度为 2.309 mg·L<sup>-1</sup>。由图 7 可知,152 号孔硝酸根离子浓度短期内呈增高趋势,但是增高速率在降低,趋于平稳。

(2)楚雄 101 号孔为裂隙水,锰离子为其主要污染因子之一,故对其锰离子进行模拟。上述同样的方法对楚雄 101 号孔 2008 年 4 月—2021 年 9 月的锰离子数据进行数值模拟,结果如图 8,平均百分比误差 (MRE) 为 1.84%,均方根误差 (RMSE) 为 0.05 (表 3),模型预测精度较高。故该模拟可以预测短期

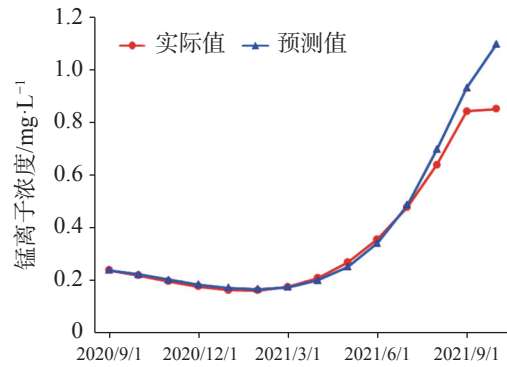


图 8 楚雄 101 号孔锰离子浓度预测结果相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of prediction results of manganese ion concentration in Hole 101 of Chuxiong

表 3 楚雄 101 号孔锰离子浓度预测结果误差分析表

Table 3 Error analysis of prediction results of manganese ion concentration in Hole 101 of Chuxiong

| 实际值<br>mg·L <sup>-1</sup> | 预测值<br>mg·L <sup>-1</sup> | 偏差/<br>% | 平均百分比<br>误差/% | 均方根<br>误差 |
|---------------------------|---------------------------|----------|---------------|-----------|
| 0.239 386                 | 0.239 68                  | 0.12     |               |           |
| 0.219 571                 | 0.223 052                 | 1.59     |               |           |
| 0.197 511                 | 0.203 475                 | 3.02     |               |           |
| 0.177 614                 | 0.185 628                 | 4.51     |               |           |
| 0.164 399                 | 0.173 083                 | 5.28     |               |           |
| 0.162 388                 | 0.167 336                 | 3.05     |               |           |
| 0.176 101                 | 0.175 076                 | -0.58    | 1.84          | 0.05      |
| 0.210 056                 | 0.200 816                 | -4.40    |               |           |
| 0.268 775                 | 0.251 975                 | -6.25    |               |           |
| 0.356 778                 | 0.342 704                 | -3.94    |               |           |
| 0.478 584                 | 0.487 297                 | 1.82     |               |           |
| 0.638 714                 | 0.697 465                 | 9.20     |               |           |
| 0.841 688                 | 0.930 564                 | 10.56    |               |           |

内锰离子的浓度,根据预测结果,下一个月锰离子的浓度为 1.096 mg·L<sup>-1</sup>。由图 8 可知,101 号孔锰离子浓度呈增加趋势,且将继续增加。

(3)铵根离子同样为楚雄 101 号孔的主要污染因子。按照上述方法对楚雄 101 号孔 2008 年 4 月—2021 年 9 月的铵根离子数据进行数值模拟,模拟结果如图 9,平均百分比误差 (MRE) 为 0.35%,均方根误差 (RMSE) 为 0.01 (表 4),模型预测精度较高。故该模拟可以预测短期内铵根离子的浓度变化,根据预测结果,下一个月铵根离子的浓度为 1.635 mg·L<sup>-1</sup>。由图 9 可知,101 号孔铵根离子开始呈下降趋势,在近一两年出现最低后逐渐增加,预测短期内仍会增加。

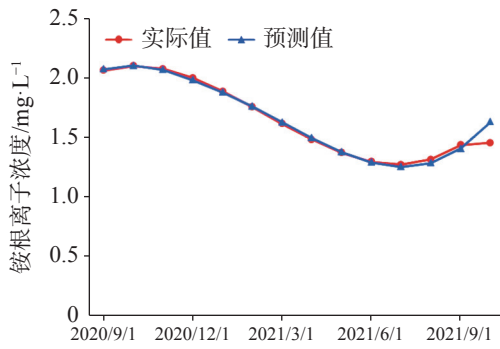


图 9 楚雄 101 号孔铵根离子浓度预测结果相关性分析  
Fig. 9 Correlation analysis of prediction results of ammonium ion concentration in Hole 101 of Chuxiong

表 4 楚雄 101 号孔铵根离子浓度预测结果误差分析表  
Table 4 Error analysis of prediction results of ammonium ion concentration in Hole 101 of Chuxiong

| 实际值<br>/mg·L <sup>-1</sup> | 预测值<br>/mg·L <sup>-1</sup> | 偏差<br>/% | 平均百分比<br>误差/% | 均方根<br>误差 |
|----------------------------|----------------------------|----------|---------------|-----------|
| 2.062 402                  | 2.075 19                   | 0.62     |               |           |
| 2.100 669                  | 2.102 612                  | 0.09     |               |           |
| 2.075 476                  | 2.067 837                  | -0.37    |               |           |
| 2.000 217                  | 1.983 028                  | -0.86    |               |           |
| 1.889 264                  | 1.880 876                  | -0.44    |               |           |
| 1.756 986                  | 1.763 891                  | 0.39     |               |           |
| 1.617 755                  | 1.632 051                  | 0.88     | 0.35          | 0.01      |
| 1.485 943                  | 1.499 617                  | 0.92     |               |           |
| 1.375 92                   | 1.382 616                  | 0.49     |               |           |
| 1.302 058                  | 1.297 05                   | -0.38    |               |           |
| 1.278 726                  | 1.259 742                  | -1.48    |               |           |
| 1.320 298                  | 1.290 263                  | -2.27    |               |           |
| 1.441 143                  | 1.410 574                  | -2.12    |               |           |

## 5 结 论

(1)对云南省主要盆地的长序列水质数据进行分析后得出,地下水水化学类型主要为 HCO<sub>3</sub>-Ca 和 HCO<sub>3</sub>-Ca-Mg 型。2016—2021 年以来,孔隙水水质总体较差,裂隙水存在水质变差的趋势,岩溶水总体水质较好。锰离子、铵根离子、硝酸根离子、氟化物为引起水质超标的主要离子,其中,锰离子的影响最大;

(2)对主要地下水钻孔进行小波神经网络模拟得出,昆明盆地 152 号孔硝酸根离子浓度短期内呈增高趋势,但是增高速率在降低,趋于平稳;楚雄 101 号孔锰离子浓度呈增加趋势,且将继续增加,铵根离子开始呈下降趋势,在近一两年出现最低后逐

渐增加,预测短期内仍会增加的趋势。小波神经网络拟合精度较高,平均百分比误差均 < 10%,可获得比较满意的预测效果,为合理开发地下水和保护地下水及对地下水水质预测预警平台建设提供科学参考依据;

(3)水质变化原因归纳为:孔隙水受大气降水将污染渗入补给孔隙含水层,地表水河沟侧向补给孔隙水及农业灌溉污染;而裂隙水主要受背景值影响较大;岩溶水通过低洼的岩溶裂隙、落水洞、地下水抽排等污染岩溶含水层组;

(4)长时间序列的观测数据及研究成果为云南省地下水开发利用及保护、治理提供了基础数据和决策依据,并且能为水质变差现场提出针对性的保护措施。对云南省城乡规划、水利建设及环保事业具有重要参考价值。

## 参考文献

[ 1 ] 周仰效,李文鹏.地下水水质监测与评价[J].水文地质工程地质,2008(1): 1-9.  
ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater quality monitoring and assessment[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(1): 1-9.

[ 2 ] 田振君.沧州市浅层地下水水质变化趋势分析[J].河北水利水电学院院报,2020,30(4): 54-57.  
TIAN Zhenjun. Trend analysis of shallow groundwater quality in Cangzhou City[J]. Journal of Hebei University of water Resources and Electric Engineering. 2020, 30(4): 54-57.

[ 3 ] 雷天雷,马运革,郝仁琪.成都平原浅层地下水水质变化趋势浅析[J].水利技术监督,2021(4): 23-26,146.  
LEI Tianlei, MA Yunge, HAO Renqi. Analysis on variation trend of shallow groundwater quality in Chengdu Plain[J]. Water Conservancy Technical Supervision, 2021(4): 23-26,146.

[ 4 ] 王波,王宇,张贵,张华,代旭升,康晓波.滇东南泸江流域岩溶地下水质量及污染影响因素研究[J].地球学报,2021,42(3): 352-362.  
WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Hua, DAI Xusheng, KANG Xiaobo. A Study of quality and pollution factors of karst groundwater in Lujiang River basin in Southeast Yunnan [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 352-362.

[ 5 ] 王宇,张贵,张华,康晓波,彭淑惠,王波,王劲,周翠琼.云南省岩溶水地质环境地质调查与研究[M].北京:地质出版社.2018.  
WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Hua, KANG Xiaobo, PENG Shuhui, WANG Bo, WANG Jin, ZHOU Cuiqiong. Investigation and study on karst hydrogeology and environmental geology in Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 2018.



- [6] 张华,王宇,张贵.云南重点岩溶流域水文地质及环境地质调查成果评析[J].*云南地质*,2014,33(2):259-263.  
ZHANG Hua, WANG Yu, ZHANG Gui. Evaluation of hydrogeological and environmental geological survey results in key karst basins in Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2014, 33(2): 259-263.
- [7] 王宇.云南省地下水资源潜力评价现状与问题分析[J].*中国岩溶*,2020,39(2):137-146.  
WANG Yu. Evaluation status and problems of groundwater resource potential in Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(2): 137-146.
- [8] 卢丽,王喆,裴建国,杜毓超,林永生,樊连杰.红水河中上游流域岩溶地下水水质影响因素的R型因子分析[J].*中国岩溶*,2015,34(4):415-419.  
LU Li, WANG Zhe, PEI Jianguo, DU Yuchao, LIN Yongsheng, FAN Lianjie. R-mode analysis for influencing factors of karst groundwater quality in middle and upper reaches of the Hongshuihe river[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 415-419.
- [9] 李从仁,杨艳华.云南省地下水资源分布特征及地下水环境问题[C].*中国地质矿产经济学会2005年学术年会论文集*.2005:512-516.  
LI Congren, YANG Yanhua. Geological characteristics of groundwater and groundwater resources in Yunnan Province [C]. *Proceedings of 2005 academic annual meeting of China Society of Geology and mineral economics*, 2005: 512-516.
- [10] 高旭波,王万洲,侯保俊,李成城,姜春芳.中国北方岩溶地下水污染分析[J].*中国岩溶*,2020,39(3):287-298.  
GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.
- [11] 章程,蒋勇军,Michèle Lettingue,王松.岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用[J].*中国岩溶*,2007,26(4):334-340.  
ZHANG Cheng, JIANG Yongjun, Michèle Lettingue, WANG Shong. Duality method for assessing karst groundwater vulnerability and its application in Jinfo mountain of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(4): 334-340.
- [12] 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯.崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评估[J].*环境科学*,2019,40(6):2675-2685.  
ZHOU Jinmei, JIANG Zhongcheng, XU Guangli, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, ZHANG Liankai. Water quality analysis and health risk assessment for groundwater at Xiangshui, Chongzuo[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2675-2685.
- [13] 刘伟.云南异龙湖水质及富营养化变化趋势分析[J].*人民长江*,2014,45(S1):48-50,56.  
LIU Weng. Analysis on water quality and eutrophication trend of Yilong Lake in Yunnan Province[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(S1): 48-50, 56.
- [14] 赵军,张祯宇,谢哲宇,黄金良,黄祖亚.基于BP人工神经网络的闽江口水厂水质模拟[J].*环境科学与技术*,2020,43(S1):198-203.  
ZHAO Jun, ZHANG Zhenyu, XIE Zheyu, HUANG Jinliang, HUANG Zhuya. Water quality modeling for water works in the Minjiang River estuary based on BP neural network model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(S1): 198-203.
- [15] 李芸,张楠,张坤.云南省地下水监测及开发利用浅析[J].*人民珠江*,2016,37(8):44-47.  
LI Yun, ZHANG Nan, ZHANG Kun. Analysis of groundwater monitoring, exploitation and utilization in Yunnan Province[J]. *Pearl River*, 2016, 37(8): 44-47.
- [16] 王雅茹.基于Piper三线图的矿井水化学特征分析[J].*山东煤炭科技*,2019(4):145-150.  
WANG Yaru. Analysis of chemical characteristics of mine water based on Piper three line diagram[J]. *Shandong Coal Technology*, 2019(4): 145-150.
- [17] 刘世强,吕海滨,彭波.兰陵县地下水的水化学分布特征及其形成条件分析[J].*安全与环境工程*,2021,28(6):151-158.  
LIU Shiqiang, LV Haibin, PENG Bo. Hydrochemical distribution characteristics and formation conditions of groundwater in Lanling county, Shandong coal science and technology[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(6): 151-158.
- [18] GB/T14848-2017,地下水质量标准[S].2017.  
GB/T14848-2017, Groundwater quality standard[S].2017.
- [19] 袁忠玉,彭淑惠.近年昆明市茨坝—岗头村富水块段地下水持续下降原因分析[J].*中国岩溶*,2013,32(3):313-317.  
YUAN Zhongyu, PENG Shuhui. Analysis on the reasons for the continuous decline of groundwater level in Fushui block of yigangtou village, Ciba, Kunming in recent years[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(3): 313-317.
- [20] 张华,王波,王宇,张贵,何绕生,代旭升,康晓波,蓝芙宁.云南泸西岩溶断陷盆地水循环系统及水资源循环利用方案[J].*地球学报*,2021,42(3):313-323.  
ZHANG Hua, WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, HE Raosheng, DAI Xusheng, KANG Xiaobo, LAN Funing. Water circulation system and water resources recycling scheme in Luxi karst depression basin, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 313-323.
- [21] 叶许春.近20年来昆明盆地北端孔隙水化学场演变过程及其驱动因素分析[D].昆明:昆明理工大学,2006.  
YE Xuchun. Evolution process and driving factors of pore water chemical field in the northern end of Kunming Basin in recent 20 years[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2006.
- [22] 吴香根,朱春林,吴尚谦,叶十五.滇中红层水文地质特征与找水方向[J].*路基工程*,2011(5):46-49.  
WU Genxiang, ZHU Chunlin, WU Shangqian, YE Shiwu. Hydrogeological characteristics and water prospecting direction of red beds in Central Yunnan[J]. *Subgrade works*, 2011(5): 46-49.
- [23] 莫美仙,王宇,李峰.滇东断陷盆地地下水污染的水文地质模式[J].*昆明理工大学学报(自然科学版)*,2014,39(5):88-95.  
MO Meixian, WANG Yu, LI Feng. Hydrogeological model of groundwater pollution in east Yunnan fault basin[J]. *Journal of*

- Kunming University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2014, 39(5): 88-95.
- [24] 刘长礼, 王秀艳, 吕敦玉, 赵悦文. 中国南方岩溶地下水污染源风险评价及防控对策[J]. *地球学报*, 2017, 38(6): 910-918.  
LIU Changli, WANG Xiuyan, LV Donyu, ZHAO Yuwen. Risk assessment and control countermeasures of karst groundwater non-point source pollution in South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(6): 910-918.
- [25] 孟维伟. 基于神经网络的交通量预测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
MENG Weiwei. Research on traffic volume prediction technology based on Neural Network[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006.
- [26] MATLAB中文论坛. MATLAB神经网络30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.  
Matlab Chinese Forum Analysis of 30 cases of MATLAB neural network[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010.
- [27] 王鑫东. 小波神经网络模型在水库水质预测中的应用研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2016, 26(3): 54-56.  
WANG Xindong. Application of wavelet neural network model for prediction of water quality in the reservoirs[J]. *Flood control and drought relief in China*, 2016, 26(3): 54-56.
- [28] 卢志娟, 朱玲, 裴洪平, 汪勇. 基于小波分析与BP神经网络的西湖叶绿素a浓度预测模型[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4965-4973.  
LU Zhijuan, ZHU Ling, PEI Pongpin, WANG Yong. The model of chlorophyll-a concentration forecast in the West Lake based on wavelet analysis and BP neural networks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4965-4973.
- [29] 朱文龙, 龙艳萍, 贾磊. 基于RBF神经网络的交通流量预测算法[J]. *山东大学学报*, 2007, 37(4): 24-27.  
ZHU Wenlong, LONG Yanping, JIA Lei. Traffic flow prediction algorithm based on RBF neural network[J]. *Journal of Shandong University*, 2007, 37(4): 24-27.
- [30] 张国彬. 小波神经网络算法的改进与应用[D]. 福州: 福州大学, 2005.  
ZHANG guobin. Improvement and application of wavelet neural network algorithm[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [31] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.  
WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shuhui, HE Raosheng, ZHOU Chuiqiong. Division and function of environmental geology in Karst faulted basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 283-295.
- [32] 赵贵章, 王淑丽, 李志萍, 龚建师, 王赫生. 基于小波分析的水质变化及预测研究: 以涡河为例[J]. *人民珠江*, 2022, 43(2): 79-87.  
ZHAO Guizhang, WANG Shuli, LI Zhiping, GONG Jianshi, WANG Hesheng. Study on water quality change and prediction based on wavelet analysis: Taking Wohe River as an example[J]. *Pearl River*, 2022, 43(2): 79-87.

## Trend analysis of groundwater quality in major basins of Yunnan Province

GAO Yu<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, KANG Xiaoli<sup>1</sup>, ZHOU Junrong<sup>1</sup>, WU Hongmei<sup>1</sup>, LIU Haifeng<sup>1</sup>, YE Xian<sup>2</sup>

( 1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area Plateau mountains, MNR/Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Digital Communications, Yunnan Communications Planning and Design Institute, Kunming, Yunnan 650041, China )

**Abstract** The plateau intermountain basin in Yunnan Province is an important water source gathering area, a population gathering and economic activity center, as well as an environmental hydrogeological unit with index significance of the impact and change of water environment. This article reviews the general monitoring situation of groundwater quality in the main intermountain basins of Yunnan Province. Among nearly 50 basins with an area of more than 100 square kilometers each, 7 have been laid out groundwater monitoring sites, respectively in Kunming, Yuxi, Dali, Chuxiong, Qujing, Jinghong and Kaiyuan. On the basis of dynamic monitoring data for groundwater quality in these basins from 2016 to 2021, the quality of pore water, fissure water and karst water is evaluated. Besides, the groundwater chemical characteristics are analyzed and the change trend of water quality in Yunnan are predicted with data statistics, Piper trilinear diagrams and time series analyses of wavelet neural network. The simulation results of wavelet neural network show that nitrate ion concentration in Hole 152 of Kunming basin increased in a short term, but then slowed down and leveled off. The concentration of manganese ion in Hole 101 of Chuxiong showed an increasing trend, while the concentration of ammonium ion showed a gradual but continual increase in the recent 1 or 2

years after an initial decrease reached the bottom. The high fitting accuracy of wavelet neural network and the average percentage error (less than 10%) demonstrated a satisfactory prediction, which may provide reference for groundwater treatment, protection and prediction, and the building of an early warning platform.

It is found that the chemical types of groundwater are complex and diverse, mainly  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$  and  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ . The content of ammonia nitrogen, manganese, fluoride and nitrate ion exceeds permitted levels, which may mainly indicate the exceedance of an acceptable level of groundwater quality. Over the past six years, the rates of exceeding permitted levels of pore water quality remained stable at about 70%. The components exceeding permitted levels were mainly pH value, total hardness, iodine ion, nitrate, ammonia nitrogen, etc. As for fissure water quality, its rates of exceeding permitted levels were basically unchanged, but the proportion of Class V water was on the rise, mainly in Kunming, Chuxiong and Yuxi. During 2017 and 2019, the rates of exceeding permitted levels were relatively low, but the fissure water quality was deteriorating. The components exceeding permitted levels were mainly manganese ions, pH values, fluorides, etc. The rates of exceeding permitted levels in terms of karst water quality gradually decreased, and in dry season the rate for Class II and Class III water decreased from 23.91% to 15.22%. Components were mainly manganese ions, arsenic ions, ammonia nitrogen, etc. Different indicators show different pollution causes. Pore water may be polluted with infiltration and recharge brought by atmospheric precipitation in pore aquifer. It may also be polluted when laterally recharged by surface water and by agricultural irrigation. Consequently, the deterioration of pore water is closely connected with the discharge of urban domestic sewage, industrial “three wastes” emissions, the use of chemical fertilizer and pesticide, agricultural irrigation and others. Compared with pore water, fissure water was less affected by pollution. Its pollution was mainly caused by the high background values of red beds and metamorphic rocks. Karst water may pollute karst aquifers through low-lying karst fissures, sinkholes and groundwater drainage. According to the statistical results, the water quality in the main basins of Yunnan Plateau shows a stable trend on the whole, which can provide a scientific basis for local economic and social development, territorial space planning, and rational exploitation and effective protection of groundwater resources.

**Key words** water environment, groundwater quality, groundwater monitoring, pollution index, plateau basin

(编辑 张玲 杨杨)