

宿州市采煤区域地下水和地表水水化学特征及其成因研究

杨红旗¹, 桂和荣², 余浩^{2,3*}, 李致春^{2,3}, 张伟杰¹, 张彬¹, 王志¹, 彭位华²

¹宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

²宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

³国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 安徽 宿州

收稿日期: 2022年8月29日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘要

为探究采煤矿活动影响下, 矿区浅层地下水和地表水水文地球化学特征及其成因, 以中国华北地区典型隐伏型煤矿区(宿县矿区)地下水和地表水为研究对象, 并通过Piper三线图、Gibbs图、自组织神经网络对研究区地下水和地表水的水化学特征及其成因进行探究。研究结果表明: 1) 浅层地下水和地表水中阳离子含量变化为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 阴离子含量变化为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$; 浅层地下水和地表水的水质类型分别为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型; Gibbs图表明岩石风化作用是影响研究区浅层地下水和地表水水化学特征的主要因素; 2) 相关性研究表明: Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 之间存在正相关, 说明这些离子可能来源于碳酸盐矿物的溶解; F^- 与 Ca^{2+} 存在负相关性, 表明 F^- 可能来源于萤石等含 F 矿物; 3) 自组织神经网络识别出自然作用、农业面源污染和人类活动干扰是影响研究区水体水化学特征成因的因素。

关键词

地下水, 地表水, 水化学特征, 成因分析

Hydro-Chemical Characteristics and Genesis Analysis of Groundwater and Surface Water in Coal Mining Area of Suzhou City

Hongqi Yang¹, Herong Gui², Hao Yu^{2,3*}, Zhichun Li^{2,3}, Weijie Zhang¹, Bin Zhang¹, Zhi Wang¹, Weihua Peng²

¹College of Environmental and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

³National Coal Mine Water Damage Prevention and Control Engineering Technology Research Center, Suzhou Anhui

作者简介: 杨红旗, 安徽淮南人, 出生于2001年2月, 学历: 本科在读。Email: 1551775278@qq.com

*通讯作者 Email: yuhaohc@ahszu.edu.cn

文章引用: 杨红旗, 桂和荣, 余浩, 李致春, 张伟杰, 张彬, 王志, 彭位华. 宿州市采煤区域地下水和地表水水化学特征及其成因研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(5): 468-477. DOI: 10.12677/jwrr.2022.115051

Received: Aug. 29th, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

In order to explore the hydrogeochemical characteristics and causes of groundwater and surface water in the mining area under the influence of coal mining activities. Taking the groundwater and surface water of the typical hidden coal field (Suxian mining area) in North China as the research object, the hydro-chemical characteristics and causes of the groundwater and surface water in the research area are explored through the Piper diagrams, Gibbs diagrams, and self-organizing map. The results show that: 1) The change of cation content in shallow groundwater and surface water is $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, and the change of anion content is $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$; the water quality types of shallow groundwater and surface water were $\text{HCO}_3^- \text{Ca-Na}$ type and $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ type respectively; Gibbs diagram shows that rock weathering was the main factor affecting the hydro-chemical characteristics of shallow groundwater and surface water; 2) the correlation study shows that there was a positive correlation between Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , which indicates that these ions may come from the dissolution of carbonate minerals. There was a negative correlation between F^- and Ca^{2+} , which indicates that F^- may come from F^- containing minerals such as fluorite; 3) The self-organizing map identified that natural action, agricultural non-point source pollution and human activities are the factors which affect the water chemical characteristics in the study area.

Keywords

Groundwater, Surface Water, Hydro-Chemical Characteristics, Cause Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭资源占世界一次性能源消费 25%左右,但是在煤矿开采的过程中会对周边水环境产生影响[1] [2]。对于中国华北地区的隐伏型煤矿(宿县矿区)而言,因其煤炭资源埋藏于第四纪厚松散层之下,在煤炭资源开发利用时势必会改变地下水的径流条件,同时采煤活动过程中排出的矿井废水、煤矸石等潜在污染源会对矿区水环境质量造成不可逆转的损害[3] [4] [5]。然而地下水和地表水是工业发展、农业生产和日常生活中不可或缺的重要资源[6] [7]。而对水体的水文地球化学特征进行研究,有利于识别出自然因素和人为因素所产生的影响[8]。因此研究在采矿活动影响下地表水和地下水的水文地球化学成因将有利于合理地利用和管理水资源[6]。

目前,国内外研究人员对水体的水文地球化学成因已经进行了大量的研究。例如,王义海等[9]通过对刘桥一矿矿井各含水层水文地球化学特征进行分析,得出各个含水层系统的水质模型。高力等[10]根据 Gibbs 图及水化学参数相关性分析研究得出,岩石风化作用是影响浅层地下水水化学组分的主要因素。Wang *et al.* [11]分析了淮北煤田太原组灰岩水的水化学离子组分来源,发现蒸发岩和硅酸盐溶解是其化学组分的主要来源。S.M. *et al.* [12]研究了 Patuakhali 地区沿海含水层地下水水文地球化学特征,发现该区地下水为弱碱性、离子交换和海水入侵是影响其水化学特征的重要因素。Chen *et al.* [13]系统地研究了淮北平原浅层地下水主要离子的含量及来源,发现农业面源污染和自然源是影响其主要离子含量的两大主要来源。可知,目前的研究多使用经典的水文地球化学评估方法及可视化技术,但是这些传统的评估方法和可视化技术存在类别之间没有明确的边界及突出了高浓度样品等缺点[14]。而自组织神经网络可以实现对样品进行分类,而且不破坏数据原有的拓扑结构,目前被广

泛应用于处理地下水水化学数据、重金属数据的可视化中[14] [15] [16]。

而且目前的研究多关于采矿活动影响下地下水的起源、水岩作用机理和流场的演变[2] [3] [5]。然而采矿活动不仅会对地下水产生影响，而且还会对地表水质量产生损害。因此本研究将采矿活动影响下的地表水和地下水共同作为一个系统进行研究，并利用自组织神经网络、多元统计分析探究研究区地表水和地下水的水化学特征。本次研究的目的是：1) 理清研究地表水和地下水的水化学特征及成因；2) 利用自组织神经网络对研究区地下水和地表水进行分类。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

宿县矿区位于中国安徽省北部(图 1(b))，其开采历史悠久。该地区属温带季风气候，有夏季湿热、冬季寒冷干燥四个季节分明的气候，年平均气温 14℃~14.5℃，年无霜期约 210 天，年降雨量大约为 1000 mm。研究区水系属淮河水系，主要包括新汴河、浍河、沱河、运粮河、小黄河，河流主要功能为农业灌溉、行洪排涝和水上航运。

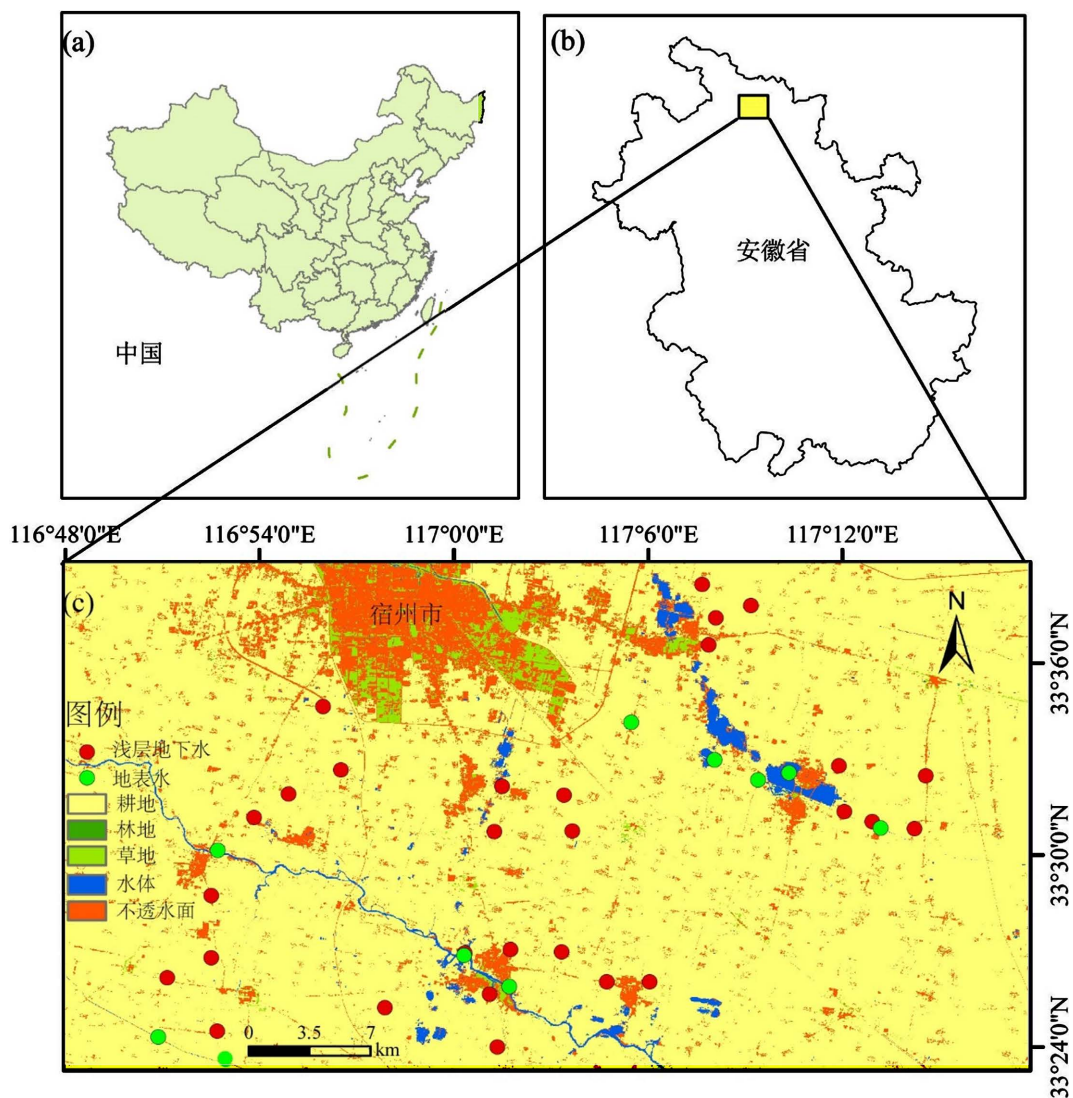


Figure 1. Geographical location and sampling point map of the study area
图 1. 研究区地理位置及采样点图

2.2. 样品的采集与测试

于 2019 年 3 月在研究区采集了 29 个地下水样品和 10 个地表水样品(河流和塌陷塘)。水样置于事先用超纯水清洗后聚乙烯瓶中(1 L)。使用便携式设备在现场立即测量电导率(EC)、pH 和总溶解固体(TDS)。采用离子色谱仪(ICS-600-900)测定水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 F^- 的含量。 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 含量通过酸碱中和滴定法测定。

3. 结果与讨论

3.1. 水化学含量特征

研究区浅层地下水和地表水 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS、EC、pH 含量特征值如表 1 所示。

Table 1. Statistical analysis of hydro-chemical parameters of shallow groundwater and surface water in Sunan mining area
表 1. 宿南矿区浅层地下水和地表水水化学参数统计与分析

参数	单位	浅层地下水				地表水				III 类
		最小值	最大值	均值	CV	最小值	最大值	均值	CV	
Na^+	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17.83	290.44	75.57	0.80	80.21	231.31	142.82	0.40	200
K^+	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.23	0.81	0.47	0.26	1.85	14.41	5.56	0.68	-
Mg^{2+}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17.31	82.20	34.79	0.46	16.33	44.40	35.05	0.31	-
Ca^{2+}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	22.87	167.95	55.27	0.59	25.92	71.03	47.36	0.35	-
F^-	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.29	1.86	1.11	0.38	1.02	1.69	1.30	0.19	1.0
Cl^-	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.59	195.55	36.58	1.30	26.12	147.56	78.42	0.51	250
SO_4^{2-}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.80	339.87	37.98	1.67	31.73	292.86	154.68	0.63	250
HCO_3^-	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	246.02	854.92	470.39	0.31	274.55	399.99	329.20	0.13	-
TDS	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	109	485	212.72	0.43	170.00	437.00	283.80	0.34	1000
EC	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	500	1965	878.34	0.42	685.00	1805.00	1185.60	0.36	-
pH	-	7.66	8.68	8.18	0.03	8.84	9.49	9.20	0.02	6.5~8.5

从表 1 可以看出, 浅层地下水中 Cl^- 与 TDS 浓度变化范围为 3.60~195.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 109~485 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值分别为 36.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 212.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其浓度均处于《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)所规定 III 类水的限制标准之内; 地表水中 Cl^- 与 TDS 浓度变化范围为 26.12~147.56 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 170~437 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值分别为 78.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 283.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其浓度同样处于《地表水环境质量标准》(GB/3838-2002)所规定的限值之内。

氟化物作为人体必需的微量元素, 但如果长期接触高氟水会严重影响人体健康并导致慢性氟中毒[17]。数据中显示, 浅层地下水 F^- 浓度范围为 0.29~1.86 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 1.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 存在部分水样的 F^- 浓度超出《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)的规定限值(1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。地表水 F^- 浓度范围为 1.02~1.69 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 1.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 全部水样的 F^- 浓度超出了《地表水环境质量标准》(GB/3838-2002)的规定限值(1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

浅层地下水中 SO_4^{2-} 的浓度分布为 3.79~339.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 37.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 地表水中 SO_4^{2-} 的浓度为 31.73~292.86 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 154.68 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据数据分析, 浅层地下水与地表水均存在部分水样 SO_4^{2-} 浓度超出饮用标准浓度(250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。 SO_4^{2-} 高浓度情况可能与农业生产、污水排放有关。

研究区浅层地下水中 HCO_3^- 值在 246.02~854.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化, 平均含量为 470.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。地表水中

HCO_3^- 值在 $274.55\sim 399.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化, 平均含量为 $329.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两者浓度差距较大, 可能由于地下水 HCO_3^- 浓度受到岩石风化影响较大, 而地表水的 HCO_3^- 浓度受大气沉降影响较小。

3.2. 水化学类型

派珀三线图能够分析水体水化学特征及其演化过程[18], 利用 Origin 2022b 软件绘制派珀三线图(图 2)。从图 2 中的阳离子分布可以看出, 浅层地下水水样多为混合型, 分别为 Ca 型和 Na 型, 这表明研究区浅层地下水和地表水类型不仅受碳酸岩溶解的影响, 而且同时受硅酸盐矿物溶解及离子交换作用的影响[19]; 地表水水样主要为 Na 型。从图 2 阴离子分布来看, 研究区浅层地下水和地表水, 主要分布在左下角, 即 HCO_3^- 占主导地位, 为 HCO_3^- 型。硫酸盐矿物溶解可能是控制浅层地下水和地表水化学特征的最重要因素, 碳酸盐矿物和蒸发盐矿物溶解存在一定影响[11]。在宿南矿区浅层地下水水样中, 水质类型为 HCO_3^- -Ca-Na 型, 而地表水水质类型均为 HCO_3^- -Na 型。

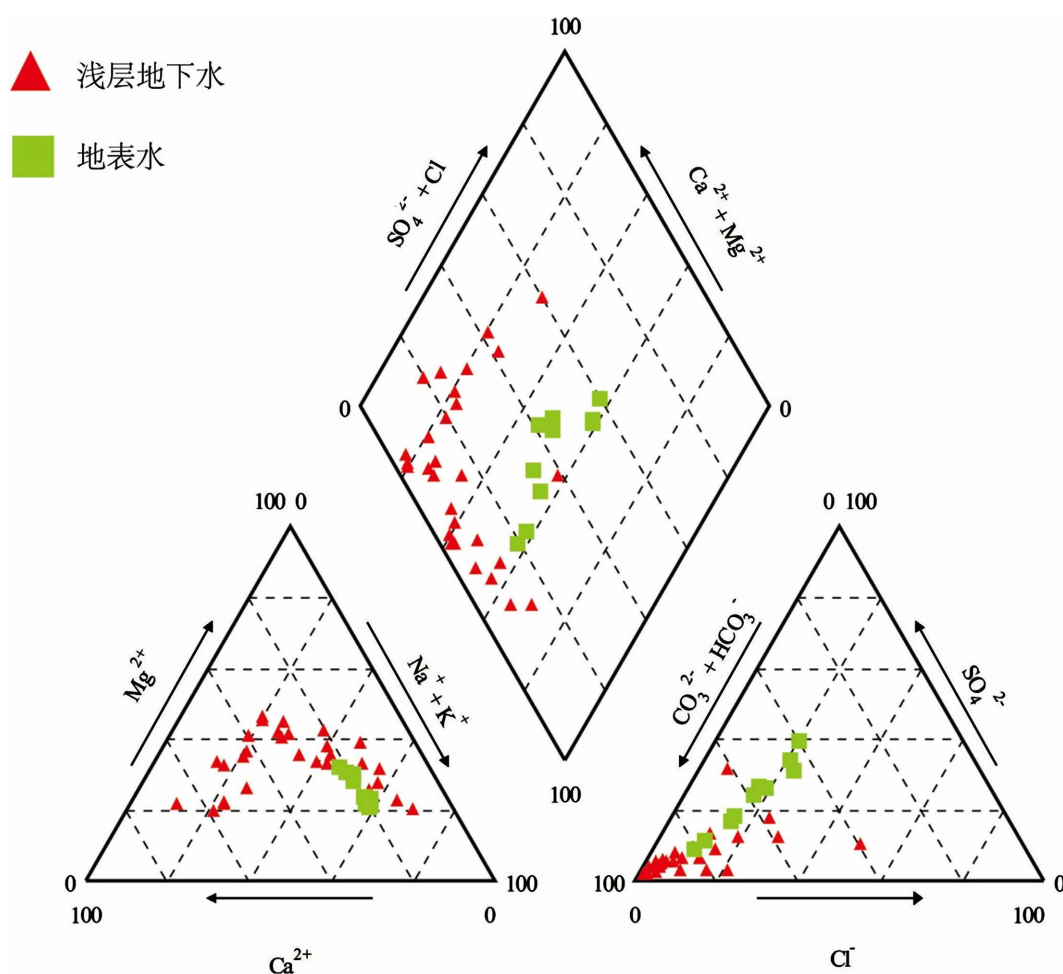


Figure 2. Piper diagram of ion content in shallow groundwater and surface water
图 2. 浅层地下水和地表水中离子含量的派珀图

3.3. 主要离子来源

3.3.1. 水岩作用机理分析

吉布斯(Gibbs)图能够直观的体现出降雨、蒸发和岩石风化对水体水化学特征的影响, 因此 Gibbs 图被广泛

的应用于研究地下水及地表水的自然形成过程[20]。

本次分析利用 Gibbs 半对数坐标了解研究区浅层地下水和地表水的水化学形成作用(图 3), 其纵坐标为 TDS (取对数); 横坐标为 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 。

根据图 3 显示, 浅层地下水与地表水 TDS 值处于 100~1000 mg/L 之间, 大部分样本位于 Gibbs 图的岩石风化控制区, 表明岩石风化作用是影响地下水化学成分的主要因素[19]。图 3(a)中, 样品大部分集中在横坐标 0 值附近, 说明 HCO_3^- 占据主导地位。图 3(b)中, 样品 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值大于 0.5 的地下水样品占 50% 以上, 这说明存在阳离子交换作用的影响[21]。没有水样点落在降雨区和蒸发区, 表面研究区浅层地下水和地表水水化学特征自然成因受蒸发作用和降雨作用影响较小。由于研究区各水样点数据分布不同, 说明这些水样点受蒸发盐溶解以及硅酸盐风化影响程度不同。根据离子含量间的比值, Na^+ 含量高于 Cl^- , 说明岩盐溶解不是 Na^+ 的唯一来源[22], Na^+ 还有其他来源, 如钠长石等矿物的溶解作用等[23]; HCO_3^- 含量高于 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, 说明碳酸盐溶解是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的主要来源, 如石灰岩、白云岩、泥灰岩[18]。

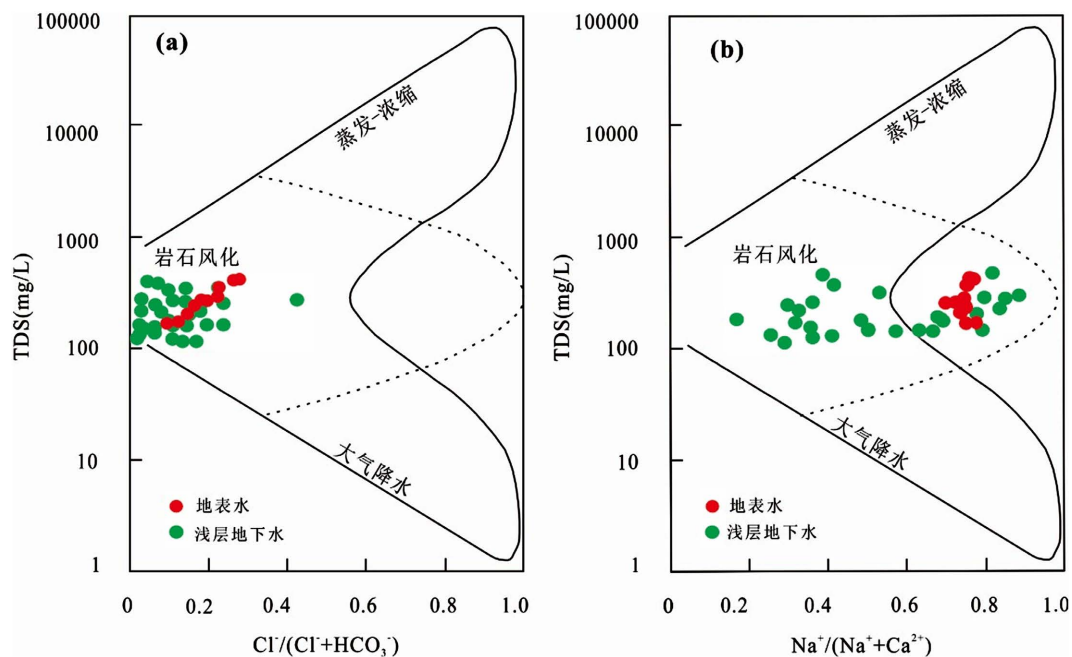


Figure 3. Gibbs map of shallow groundwater and surface water in Sunan mining area
图 3. 宿南矿区浅层地下水、地表水吉布斯图

3.3.2. 相关性分析

应用相关系数矩阵来分析浅层地下水与地表水中离子存在的相互关系。从图 4 可以看出, Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、EC 与 TDS 浓度相关系数较大, 呈显著正相关, 这可能是由于水体溶解矿石导致; EC 与 TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 呈显著正相关, 同时 EC 也与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 呈正相关, 这说明电导率与这些离子溶解存在一定的关系; Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 之间存在正相关, 说明这些离子可能来源相同, 可能来源于石膏、高镁方解石、钠长石的溶解, 其中 HCO_3^- 来自方解石的溶解[24]; F^- 与 Ca^{2+} 、 Cl^- 存在负相关性。

3.3.3. 自组织神经网络分析

为了进一步刻画研究区地表水和地下水的水文地球化学特征, 利用了自组织神经网络 K-平均值(SOM 聚类)聚类图(图 6)对研究区地下水和地表水进行分类。SOM 能够通过模仿大脑的生物学过程, 对数据进行降维、深度处理和规则汇总[25]。考虑到 SOM 有助于处理复杂的推理、判别和分类问题, 因此很多的科研人员将其用于

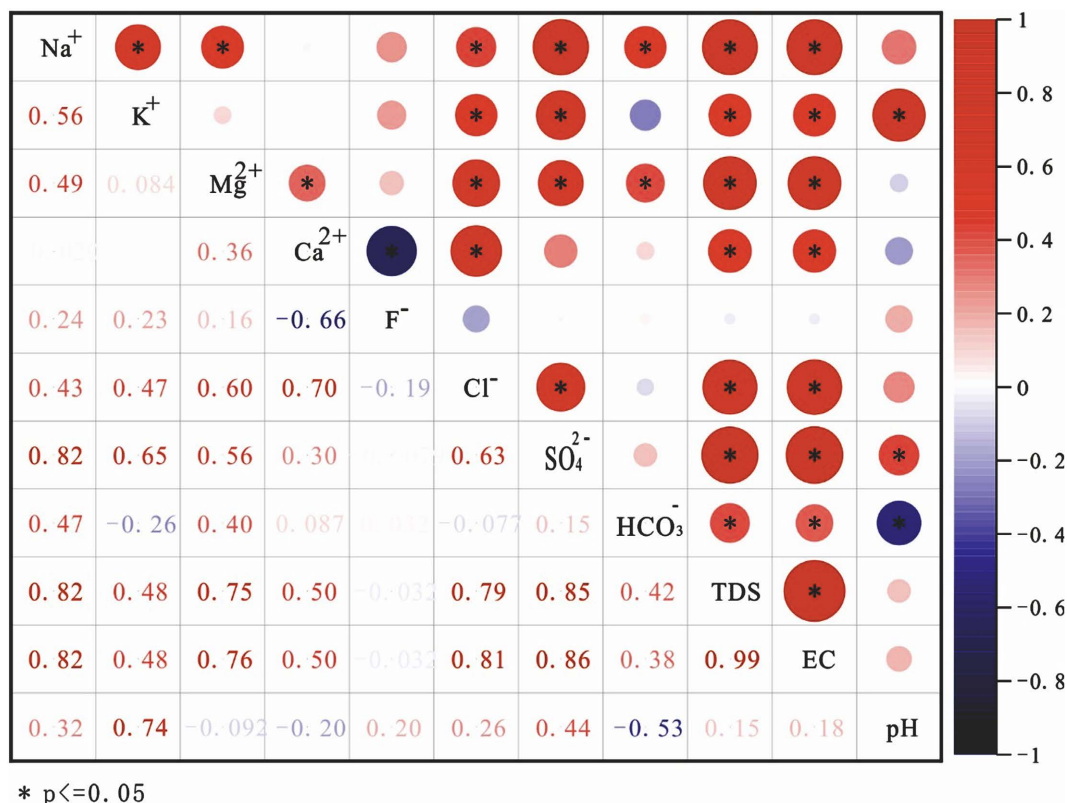


Figure 4. Correlation coefficients between various hydrogeochemical indexes of groundwater samples in the study area
图 4. 研究区地下水各水文地球化学指标的相关系数

水文、环境等相关领域的分区研究[23]。SOM 计算中涉及的地下水化学指标有 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、F⁻、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Eh、pH、TDS。这些参数被输入到基于 SOM 的分区计算模型中, 经过竞争、合作、自适应和 K-means 聚类后, 分别得到图 5 和图 6。图 5 为水化学参数 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、F⁻、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、EC、pH 和 TDS 经 SOM 降维之后得到的模型图。

在图 5 中, 具有高值的神经元以红色显示, 而具有低值的神经元以蓝色显示。根据不同颜色梯度变化, 能够直观的看出水质参数之间的内在联系。图 5 中 Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、TDS、EC 这 5 个组分颜色变化梯度类似, 说明这些组分具有显著的正相关性; F⁻ 和 Ca²⁺ 的颜色变化梯度相反, F⁻ 的右上角为红色而 Ca²⁺ 的右上角为蓝色, 说明它们具有显著负相关性。Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 颜色变化梯度相同, 可能为同一来源。这一计算结果与图 4 中相关性分析结果一致。

SOMK-平均值聚类结果如图 6 所示, 得到 4 组水文地球化学特征相似的分类。即每组中包含的水样可能具有最相似的水化学特征和来源。结合图 6 可知, 分组 1 (Group 1) 多分布在 (Na、K、Mg、Cl、SO、HCO、TDS、EC 和 pH) 的蓝色区域, 表明组 1 这些水样中 (Na、K、Mg、Cl、SO、HCO、TDS、EC 和 pH) 的含量相对较低, 然而组 1 的部分区域 F⁻ 和 Ca²⁺ 模型图中, 部分神经元为红色, 表明组 1 具有含量相对较高的 F⁻。由此推断组 1 水化学特征主要受岩石风化等自然因素的影响。组 2 中取样点均位于开发历史时间较长的芦岭矿, 具有代表性的离子为 HCO₃⁻、Ca²⁺ 和 F⁻, 表明该区域地下水主要受碳酸盐溶解的影响。组 3 为研究区沱河、濉河和塌陷塘水样, 代表性的水质参数有 pH、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 F⁻, 而且组 3 所有水样中 F⁻ 的含量均大于 1.0 mg/L。Jiang Yaqi [26] 等研究该地区河流水位地球化学特征, 认为 F⁻ 与农业面源污染有关。因此组 3 主要受农业面源的影响。组分 5 和组分 4, 因其几乎所有水化学参数的值均位于红色区域, 而且组 5 中三个水样采自浍河(其两岸及上游分布煤矿约 5 个, 并且两岸均为大片农业用地), 因此将组分 5 与组分 4 定义为受人类活动影响的组分。

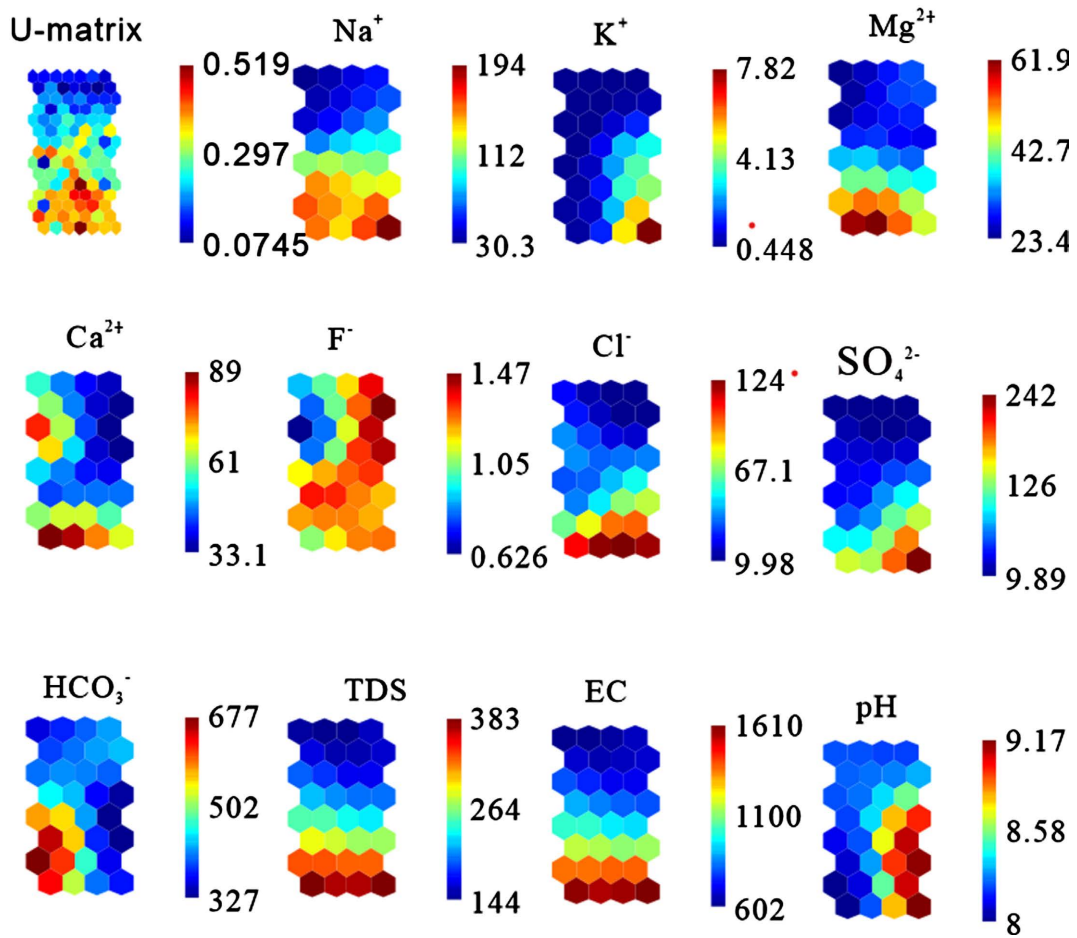


Figure 5. Component surface diagram of self-organizing neural network
图 5. 自组织神经网络组分面图



Figure 6. K-means (SOM clustering) clustering graph based on self-organizing neural network
图 6. 基于自组织神经网络 K-平均值(SOM 聚类) 聚类图

4. 结论

1) 研究区浅层地下水和地表水中阳离子含量变化为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 浅层地下水和地表水中阴离子含量变化为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 。研究区浅层地下水水质类型为显示 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型, 地表水水样所反应的水质类型均为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。Gibbs 图分析得出岩石风化作用是影响研究区浅层地下水和地表水水化学特征的主要因素。

2) 相关 S 性分析结果表明: Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、EC 与 TDS 之间呈一定正相关性; Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 之间存在正相关, 说明这些离子可能来源于碳酸盐矿物的溶解; F^- 与 Ca^{2+} 存在负相关性, 表明 F^- 可能来源于萤石等含 F 矿物。

3) SOM 的计算结果表明: Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、TDS、EC 这 5 个组分具有显著的正相关性; F^- 和 Ca^{2+} 具有显著负相关; Cl^- 和 SO_4^{2-} 可能为同一来源。SOMK-平均值聚类图分析结果表明: 组 1 水化学特征主要受岩石风化等自然因素的影响; 组 2 主要受碳酸盐溶解的影响; 组 3 主要受农业面源的影响; 组 4、组 5 受人类活动影响为主。

基金项目

本研究得到宿州学院第十六届大学生科研项目立项(编号: KYLXYBXM22-033)、宿州学院第十六届大学生科研项目立项(编号: KYLXYBXM22-022)、安徽省煤矿勘察工程技术中心科研平台开放课题(编号: 2022ykf11)、国家自然科学基金项目(编号: 42107280)和宿州学院博士科研启动基金(编号: 2019jb26)的支持。

参考文献

- [1] LIN, M. L., PENG, W. H., GUI, H. R., *et al.* Hydrochemical characteristics and quality assessment of deep groundwater from the coal-bearing aquifer of the Linhuan coal-mining district, Northern Anhui Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(4): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5199-1>
- [2] QU, S., SHI, Z., LIANG, X., WANG, G., HAN, J., *et al.* Multiple factors control groundwater chemistry and quality of multi-layer groundwater system in northwest China coalfield—Using self-organizing maps (SOM). *Journal of Geochemical Exploration: Journal of the Association of Exploration Geochemists*, 2021, 227(1-4): 106795. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106795>
- [3] ZHANG, J., CHEN, L., HOU, X., LIN, M., REN, X., LI, J., ZHANG, M., ZHENG, X., *et al.* Multi-isotopes and hydrochemistry combined to reveal the major factors affecting carboniferous groundwater evolution in the Huaibei coalfield, North China. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148420>
- [4] YU, H., GUI, H., ZHAO, H., *et al.* Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of shallow groundwater in Suxian mining area, Huaibei coalfield, China. *International Journal of Coal Science Technology*, 2020, 7(4): 825-835. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00365-6>
- [5] ZHANG, J., CHEN, L., HOU, X., LI, J., REN, X., LIN, M., ZHANG, M., WANG, Y. and TIAN, Y. Effects of multi-factors on the spatiotemporal variations of deep confined groundwater in coal mining regions, North China. *Science of the Total Environment*, 2022, 823(1): 153741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153741>
- [6] XIAO, J., WANG, L., CHAI, N., *et al.* Groundwater hydrochemistry, source identification and pollution assessment in intensive industrial areas, eastern Chinese Loess Plateau. *Environmental Pollution*, 2021, 278: 116930. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116930>
- [7] QIU, H., GUI, H., XU, H., CUI, L. and WANG, C. Hydrochemical characteristics and hydraulic connection of shallow water and mid-layer water in typical mining area: A case study from Sulin mining area in northern Anhui, China. *Water Supply*, 2022, 22(5): 5149-5160. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.146>
- [8] AN, S., JIANG, C., ZHANG, W., *et al.* Influencing factors of the hydrochemical characteristics of surface water and shallow groundwater in the subsidence area of the Huainan coalfield. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(4): 191. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5140-3>
- [9] 王义海, 胡宏伟, 刘桥一矿水文地球化学特征分析[J]. *地球科学前沿*, 2020, 10(6): 453-459. <https://doi.org/10.12677/AG.2020.106041>
WANG Yihai, HU Hongwei. Analysis of hydrogeochemical characteristics of Liuqiao No. 1 mine. *Frontier of Earth Science*, 2020, 10(6): 453-459. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/AG.2020.106041>

- [10] 高力, 许继影, 束永列, 王晓悦. 宿州市农村地区浅层地下水水文地球化学特征及水质评价[J]. 自然科学, 2022, 10(5): 614-622. <https://doi.org/10.12677/OJNS.2022.105073>
GAO Li, XU Jiying, SHU Yonglie and WANG Xiaoyue. Hydrogeochemical characteristics and water quality evaluation of shallow groundwater in rural areas of Suzhou City. *Natural Science*, 2022, 10(5): 614-622. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/OJNS.2022.105073>
- [11] WANG, M., GUI, H., HU, R., ZHAO, H., LI, J., YU, H. and FANG, H. Hydrogeochemical characteristics and water quality evaluation of carboniferous Taiyuan formation limestone water in Sulin mining area in northern Anhui, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(14): 2512. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142512>
- [12] DIDAR-UL ISLAM, S. M., MAJUMDER, R. K., UDDIN, M. J., KHALIL, M. I. and ALAM, M. F. Hydrochemical characteristics and quality assessment of groundwater in Patuakhali district, southern coastal region of Bangladesh. *Exposure and Health*, 2017, 9: 43-60. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0221-y>
- [13] CHEN, K., LIU, Q., PENG, W. and LIU, X. Source apportionment and natural background levels of major ions in shallow groundwater using multivariate statistical method: A case study in Huaibei plain, China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113806. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113806>
- [14] HASELBECK, V., KORDILLA, J., KRAUSE, F. and SAUTER, M. Self-organizing maps for the identification of groundwater salinity sources based on hydrochemical data. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 610-619. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.053>
- [15] MAO, H., WANG, G., RAO, Z., LIAO, F., SHI, Z., HUANG, X., CHEN, X. and YANG, Y. Deciphering spatial pattern of groundwater chemistry and nitrogen pollution in Poyang Lake basin (Eastern China) using self-organizing map and multivariate statistics. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 329: 129697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129697>
- [16] YIN, Z., LUO, Q., WU, J., XU, S. and WU, J. Identification of the long-term variations of groundwater and their governing factors based on hydrochemical and isotopic data in a river basin. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125604>
- [17] WU, C., WU, X., QIAN, C., *et al.* Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China. *Applied Geochemistry*, 2018, 98: 404-417. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.10.016>
- [18] 孙乃波, 陈学群, 李倩, 管清花, 冯婧怡, 徐征和. 威海市地下水水化学特征及成因分析[J]. 节水灌溉, 2022(7): 85-90.
SUN Naibo, CHEN Xuequn, LI Qian, GUAN Qinghua, FENG Jingyi and XU Zhenghe. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in Weihai. *Water Saving Irrigation*, 2022(7): 85-90. (in Chinese)
- [19] 纪媛媛. 新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021(3): 551-560.
JI Yuanyuan. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in plain area of Changji City, Xinjiang. *South to North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology*, 2021(3): 551-560. (in Chinese)
- [20] 张七道, 刘振南, 尹林虎. 深变质岩区地热流体化学特征及成因——以滇西陇川盆地温泉为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1838-1852.
ZHANG Qidao, LIU Zhennan and YIN Linhu. Chemical characteristics and genesis of geothermal fluids in deep metamorphic rock areas—Taking hot springs in Longchuan basin in western Yunnan as an example. *Journal of Jilin University (Geoscience Edition)*, 2021, 51(6): 1838-1852. (in Chinese)
- [21] ADIMALLA, N., QIAN, H. Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 176: 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.066>
- [22] MEYBECK, M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Sciences*, 1987, 287: 401-428. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.5.401>
- [23] TIWARI, A. K., SINGH, P. K. and MAHATO, M. K. Environmental geochemistry and a quality assessment of mine water of the west Bokaro coalfield, India. *Mine Water and the Environment*, 2016, 35(4): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10230-015-0382-0>
- [24] 寇永朝, 华琨, 李洲, 李志. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3142-3149.
KOU Yongchao, HUA Kun, LI Zhou and LI Zhi. Hydrochemical characteristics and control factors of surface water and groundwater in tributaries of Jinghe River. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3142-3149. (in Chinese)
- [25] ZHU, G., WU, X., GE, J., *et al.* Influence of mining activities on groundwater hydrochemistry and heavy metal migration using a self-organizing map (SOM). *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120664>
- [26] JIANG, Y., GUI, H., YU, H., *et al.* Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of rivers in different regions of cities: A case study of Suzhou city in northern Anhui province, China. *Water*, 2020, 12(4): 950. <https://doi.org/10.3390/w12040950>