

# 宿州地区农田灌溉浅层地下水水文化学特征与水质评价

束永列<sup>1,2</sup>, 许继影<sup>1\*</sup>, 高力<sup>1,2</sup>, 王晓悦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

<sup>2</sup>宿州全源地质技术服务有限公司, 安徽 宿州

收稿日期: 2022年7月29日; 录用日期: 2022年8月31日; 发布日期: 2022年9月9日

## 摘要

浅层地下水是宿州市周边农村农田灌溉的重要供水来源, 因此, 对该区域浅层地下水水文化学特征以及水质分析评价具有非常重要的意义。为查明宿州地区农田灌溉浅层地下水水文地球化学与特征, 本研究以皖北宿州周边农村30组农田灌溉浅层地下水为研究对象, 运用描述性统计法和因子分析法对地下水的化学特征及其成因进行了分析。综合运用数理统计、Piper图、Gibbs图等方法, 综合分析研究区的地下水化学特征及水岩作用, 研究结果表明, 宿州地区地下水中,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 含量较多, PH范围在6.7~7.4, 属于中性偏弱酸性水, TDS值范围在342~745 mg/L, 平均值为583.79 mg/L, 属于咸水, 阳离子质量浓度平均值由大到小依次为:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , 阴离子质量浓度平均值由大到小依次为  $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 。这些离子产生于岩盐溶解、硫酸盐岩溶解、碳酸盐岩溶解、硅酸盐岩风化等作用。综合分析, 研究区所有样品符合灌溉用水条件, 可以直接作为灌溉用水, 不会对土壤与农作物造成危害。

## 关键词

水文化学特征, 水岩作用, 水质评价

# Hydrochemical Characteristics and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater for Farmland Irrigation in Suzhou Area

Yonglie Shu<sup>1,2</sup>, Jiying Xu<sup>1\*</sup>, Li Gao<sup>1,2</sup>, Xiaoyue Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

<sup>2</sup>Suzhou Quanyuan Geological Technology Service Co., Ltd., Suzhou Anhui

\*通讯作者。

文章引用: 束永列, 许继影, 高力, 王晓悦. 宿州地区农田灌溉浅层地下水水文化学特征与水质评价[J]. 自然科学, 2022, 10(5): 677-685. DOI: 10.12677/ojns.2022.105079

## Abstract

Shallow groundwater is an important source of water supply for rural farmland irrigation around Suzhou City. Therefore, it is of great significance to analyze and evaluate the hydrochemical characteristics and water quality of shallow groundwater in this area. In order to find out the hydrogeochemistry and characteristics of shallow groundwater for farmland irrigation in Suzhou, this study took 30 groups of shallow groundwater for farmland irrigation around Suzhou in northern Anhui as the research object, and used descriptive statistics and factor analysis to analyze the chemical characteristics and its causes are analyzed. Comprehensive use of mathematical statistics, Piper diagram, Gibbs diagram and other methods to comprehensively analyze the chemical characteristics of groundwater and water-rock interaction in the study area. The research results show that the groundwater in Suzhou area contains the most  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^-$ . The pH range is 6.7~7.4, which belongs to neutral and weakly acidic water. The TDS value ranges from 342 to 745 mg/L, and the average value is 583.79 mg/L. It belongs to salt water.  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , the average anion mass concentration from large to small is  $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ . These ions are generated from the dissolution of rock salt, sulfate rock, carbonate rock, and silicate rock weathering. Comprehensive analysis shows that all samples in the study area meet the conditions of irrigation water and can be directly used as irrigation water without causing harm to soil and crops.

## Keywords

Hydrochemical Characteristics, Water-Rock Interaction, Water Quality Evaluation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

宿州位于淮北平原北部,处于我国南北气候的过渡带,为中国重要的商品粮基地,但水资源短缺,因此浅层地下水是宿州市农田灌溉重要的水资源[1]。地下水含有各类化学成分,这些化学成分来源于化地下水与地表水体、岩土体等周围介质的相互作用,在经过一系列溶滤、浓缩等作用所形成[2]。然而地下水水质容易收到外界感染因子影响[3],例如宿州矿区的不断开采,不仅造成了生态环境的破坏,还造成了地下水受到了氟化物[4]、重金属[5]等污染。通过对地下水水文化学特征以及水质的掌握,有利于改善地下水水质,便于更加科学有效的利用水资源。目前我国虽然对地下水资源的利用拥有一定的研究成果,但在地下水的开发利用中任然存在管理机制不够完善,专业基础知识淡薄等问题,从而导致在开发利用中,出现超采现象,以及对水资源产生污染[6]。本研究主要调查皖北地区浅层地下水水化学特征以及是否可用于农田灌溉。颜晓龙等对皖北地区浅层地下水水化学特征进行评价,得出皖北地区水化学特征类型主要为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型[7]。闵宁等对宿州市地下水化学成分及特征进行研究,得出宿州市地下水主要受碳酸盐、硅酸盐溶解风化的控制,同时蒸发浓缩也起到重要作用[1]。

因此本研究以 30 组皖北宿州某乡镇农田灌溉浅层地下水为研究对象,通过对样品采集与测试,再经数理统计得到地下水水化学指标,制作 Piper 三线图和 Gibbs 图,对水化学类型和水岩作用进行分析,查

明宿州地区农田灌溉浅层地下水水化学与特征,开展地下水水质评价,为该地区农田灌溉浅层地下水研究和水资源保护提供相应的基础资料。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

本次研究区为安徽省宿州市埇桥区周边农村(见图1),本研究区东北与宿迁和徐州相接,南边相临蚌埠,西部与西北和淮北、商丘以及菏泽相邻。该区位于暖温带半湿润季风农业气候区,夏季降水量大,冬季干旱少雨,降雨径流年际,变化大年内降雨分配不均匀。宿州市埇桥区近年平均降雨量为874.9 mm,地表水资源量为4.75亿 $m^3$ ,折合径流,深163.4 mm,浅层地下水资源量为4.66亿 $m^3$ ,水资源总量为8.19亿 $m^3$ ,地表水资源可利用量为1.652亿 $m^3$ ,浅层地下水可开采量为2.96亿 $m^3$ 。全区人均水资源占有量468 $m^3/a$  [8]。

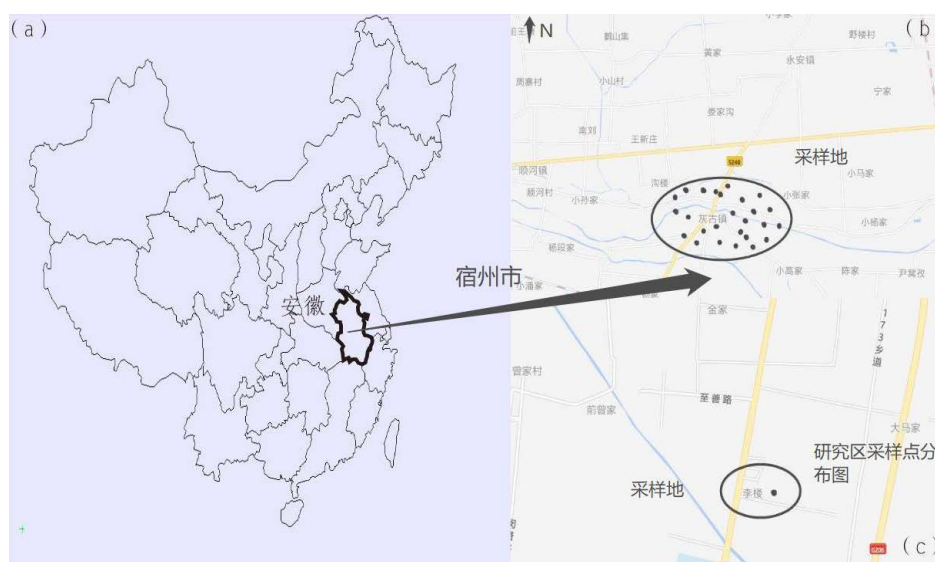


Figure 1. Distribution of sampling points in the study area  
图1. 研究区采样点分布图

### 2.2. 样品采集与处理

水样采集参照《地下水水质检测方法水样的采集和保存》(DZ/T0064.2-1993),采样工作于2022年4月开展,共采集地下水样品30组,取样深度在5~10 m范围内。当场测定pH、温度、总溶解固体(TDS)和电导率(EC)以及采样位置等一系列数据,使用500 mL聚乙烯瓶进行采样,采样前用待采集水样清洗3~4遍后装满、密封。样品于当天送至矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室进行测试。首先用0.45  $\mu m$ 滤膜过滤样品中杂质,过滤后用酸标准溶液滴定法测定 $CO_3^{2-}$ 和 $HCO_3^-$ ,随后使用ICS-900离子色谱仪测定水样中 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 。分析误差采用阴、阳离子浓度平衡法进行检测,测定误差在 $\pm 10\%$ 以内。

### 2.3. 数据分析方法

针对宿州地区农田灌溉浅层地下水现状,利用所得的水化学数据,运用数理统计法反映出各个参数之间相互联系的规律性、SPSS相关性分析反映出各个参数之间的相似相异性以及传统图解法(Piper图、

Gibbs 图、USSSL 图和 Wilcox 图)等方法进行水化学特征分析及水质评价[9]。其中,描述性统计由 Excel 完成,相关性分析由 SPSS 完成, Piper 图由 Origin2018 软件完成, Gibbs 图、USSSL 图和 Wilcox 图由 Excel 和 Coreldraw.2018 完成。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 描述性统计分析

地下水水化学指标描述性统计结果(见表 1)所示。pH 值在 6.7~7.4,属于偏弱酸性水,TDS 值在 342~745,属于偏弱酸性水,TDS 值在 342~745  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为 583.79  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,属于咸水,ORP 值为 85~157 mv,阳离子质量浓度平均值由大到小依次为:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$ ,表明阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  为主,  $\text{Mg}^{2+}$  质量浓度范围为 19.23~71.43  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}^{+}$  质量浓度范围相对较低,仅在 0.43~13.54  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,阴离子质量浓度平均值由大到小依次为  $\text{HCO}_3^{-} > \text{NO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{F}^{-}$ ,地下水样品阴离子  $\text{HCO}_3^{-}$  以为相对优势离子,研究区内的离散性较大, $\text{K}^{+}$  (变异系数 1.71)、 $\text{F}^{-}$  (变异系数 1.05)和  $\text{Cl}^{-}$  (变异系数 1.36)的变异系数高于 0.9,说明其空间变异性相对较大。 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$ 、 $\text{NO}_3^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、TDS 和 ORP 变异系数为 0.1~0.9,表明其空间变异性相对中等;pH 变异系数小于 0.1,表明其空间变异性相对较小,含量相对较为稳定。

**Table 1.** Statistical results of chemical composition of sample water

**表 1.** 样品水化学成分统计结果

测试项目	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数
$\text{Na}^{+}$	27.32	85.87	44.34	10.82	43.58	0.24
$\text{K}^{+}$	0.43	13.54	1.35	2.31	0.85	1.71
$\text{Mg}^{2+}$	19.23	71.43	35.94	12.28	31.53	0.39
$\text{Ca}^{2+}$	46.06	158.57	83.03	22.89	81.93	0.28
$\text{F}^{-}$	0.10	1.28	0.30	0.24	0.23	1.05
$\text{Cl}^{-}$	16.20	271.01	45.56	46.21	33.95	1.36
$\text{NO}_3^{-}$	6.60	263.03	100.33	66.43	89.91	0.74
$\text{HCO}_3^{-}$	426.27	675.94	541.76	66.14	526.74	0.13
$\text{SO}_4^{2-}$	23.32	132.52	79.02	27.66	72.89	0.38
TDS	342	745	583.79	95.16	619	0.15
PH	6.7	7.4	6.97	0.14	6.95	0.02
ORP	85	157	126.67	16.24	126.00	0.13

注: pH 值无量纲,其他单位为  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

#### 3.2. 水化学类型及水岩作用分析

Piper 三线图常被用于刻画区域水化学地球化学特征[10][11],可以看出(见图 2),水样当中的阳离子紧贴着  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  轴分布,显示地下水中的主要阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ;阴离子紧贴  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{-}$ - $\text{Cl}^{-}$  轴分布,显示主要阴离子为  $\text{HCO}_3^{-}$ 、 $\text{Cl}^{-}$ 。从菱形区域水样点的分布情况可以得出结论,研究区浅层地下水主要水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Mg-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$  型及  $\text{Cl-Ca-Mg}$  型。

Gibbs 图解法是揭示研究区水体来源机制分析与水化学形成作用的重要方法之一。Gibbs 在建立 TDS 与  $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 基础上, 依据世界湖泊、河流及主要海水常规组分含量分析, 将溶质来源的自然控制因素划分为三类, 即岩石风化型、大气降水控制型和蒸发浓缩型[12]。

研究区水样的 Gibbs 图(见图 3), 从 TDS 含量与  $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的关系判断, 研究区样品 TDS 含量在 100~1000 之间,  $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值没有明显变化, 主要集中在岩石风化区。从 TDS 与  $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 关系图可知,  $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值均小于 0.2, 且随 TDS 含量的增高,  $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值有变大的趋势但不明显。这表明研究区地下水水化学组成主要受岩石风化等水岩相互作用过程的控制, 受蒸发沉淀作用微弱且几乎不受大气降水控制[13]。

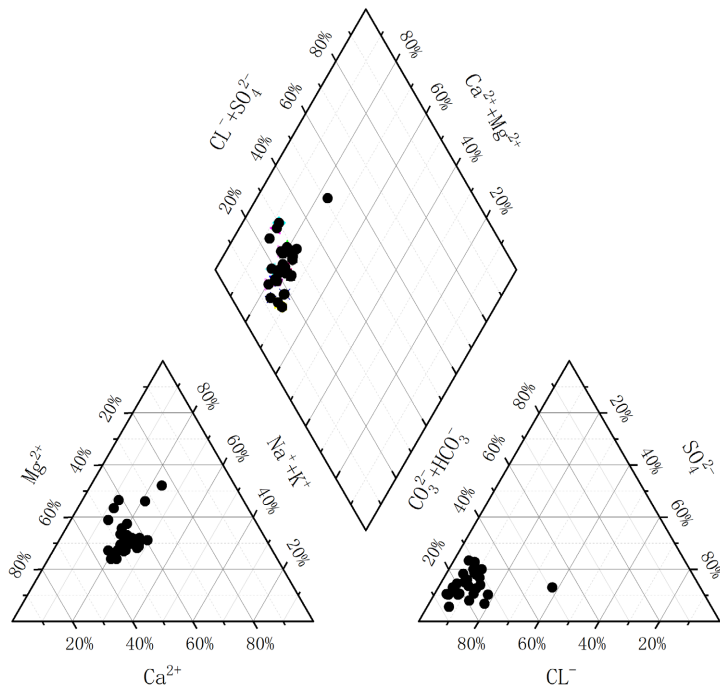


Figure 2. Piper three-line diagram  
图 2. Piper 三线图

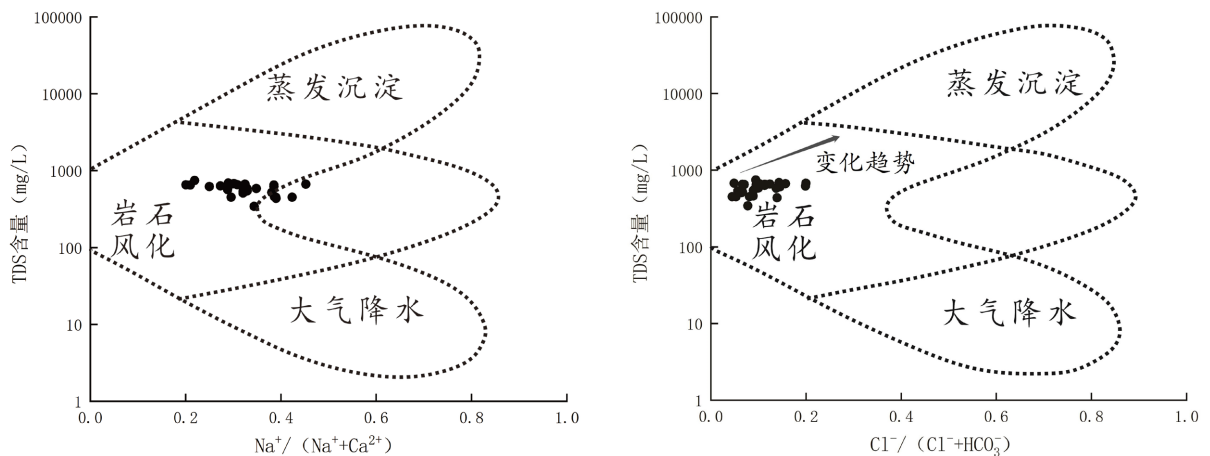


Figure 3. Gibbs diagram of the study area  
图 3. 研究区 Gibbs 图

### 3.3. 相关性分析

利用相关性分析处理地下水的水化学数据, 可以反映出各个参数之间的相似相异性, 还可以对地下水离子来源进行判断[14], 本次水样离子的相关性分析运用 SPSS 软件, 对  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、pH、EC 和 TDS 共 10 项指标进行相关性分析得出(见表 2)。

由表可知,  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、EC 与 TDS 的显著水平为 0.01, 表明它们有很强的正相关性。尤其 EC 与 TDS 的相关性非常明显, 相关系数在 0.900 以上, 表明研究区浅层地下水中 EC 对 TDS 起到主要影响作用。 $\text{Na}^+$ 和  $\text{Ca}^{2+}$ 之间的相关系数为 0.534, 呈现出 0.01 水平的显著性, 表明  $\text{Na}^+$ 和  $\text{Ca}^{2+}$ 之间有着显著的正相关关系。 $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 之间的相关系数为 0.606, 呈现出 0.05 水平的显著性, 说明  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 之间有着显著的正相关关系。二者可能共同来源于石膏的风化溶解。为确定地下水中离子形成原因, 在上文中运用 Gibbs 图对水化学形成作用进行了分析。

**Table 2.** Correlation analysis of water chemical parameters

**表 2.** 水化学参数相关性分析

	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	PH	EC	TDS
$\text{Na}^+$	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{K}^+$	0.044	1	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Ca}^{2+}$	0.534**	-0.211	1	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Mg}^{2+}$	0.097	0.461*	0.392*	1	-	-	-	-	-	-
$\text{HCO}_3^-$	0.336	0.361*	0.212	0.280	1	-	-	-	-	-
$\text{Cl}^-$	0.755**	0.204	0.689*	0.328	0.373*	1	-	-	-	-
$\text{SO}_4^{2-}$	0.345	0.254	0.606*	0.640**	0.172	0.327	1	-	-	-
PH	-0.601**	0.082	-0.451*	0.175	-0.442*	-0.392*	-0.283	1	-	-
EC	0.175	0.084	0.634**	0.529**	0.251	0.140	0.763**	-0.335	1	-
TDS	0.171	0.193	0.577**	0.564**	0.358	0.172	0.718**	-0.299	0.933**	1

注: \*表示显著性水平为 0.05; \*\*表示显著水平为 0.01。

## 4. 水质评价

### 4.1. 饮用水卫生评价

参照《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022) [15], 对研究区水资源卫生标准、对地下水中一般化学指标进行评价(见图 4)。研究区所有样品的氯化物、硫酸盐、pH 和 TDS 含量均在国家标准范围内, 由此表明本研究区水质卫生符合国家标准, 对人体无影响, 属于可饮用水。

### 4.2. 灌溉水评价

本研究根据美国岩土工程实验室提出的标准, 以美国农业部(USDA)评价方法的灌溉水水质分类结果为基础, 综合考虑 SAR(碱害)与 EC(盐害)的影响, 并对研究区灌溉水盐碱化程度进行评价。灌溉用水中  $\text{Na}^+$ 浓度较高, 会对土壤物理性质产生不利影响, 当大量  $\text{Na}^+$ 吸附到土壤颗粒上时, 会导致土壤颗粒分散 [16] [17]。可以看出(见图 5), 样品大都集中在 S1-C2、S1-C3 区域, 且 10%的样品处在中度盐害影响区, 90%处于高度盐害影响区, 二者都在低碱害影响区。说明研究区地下水灌溉并不会造成该地区土壤碱化,

但可能会提高该地区土壤盐化的风险。图 5 是基于 Wilcox 图解法对灌溉水水质分类的结果。可知(见图 5), 研究区样品落在极好与良好区, 二者均属于适宜灌溉区域, 综合分析, 研究区所有样品符合灌溉用水条件, 可直接作为灌溉用水, 不会对土壤与农作物造成危害[18]。

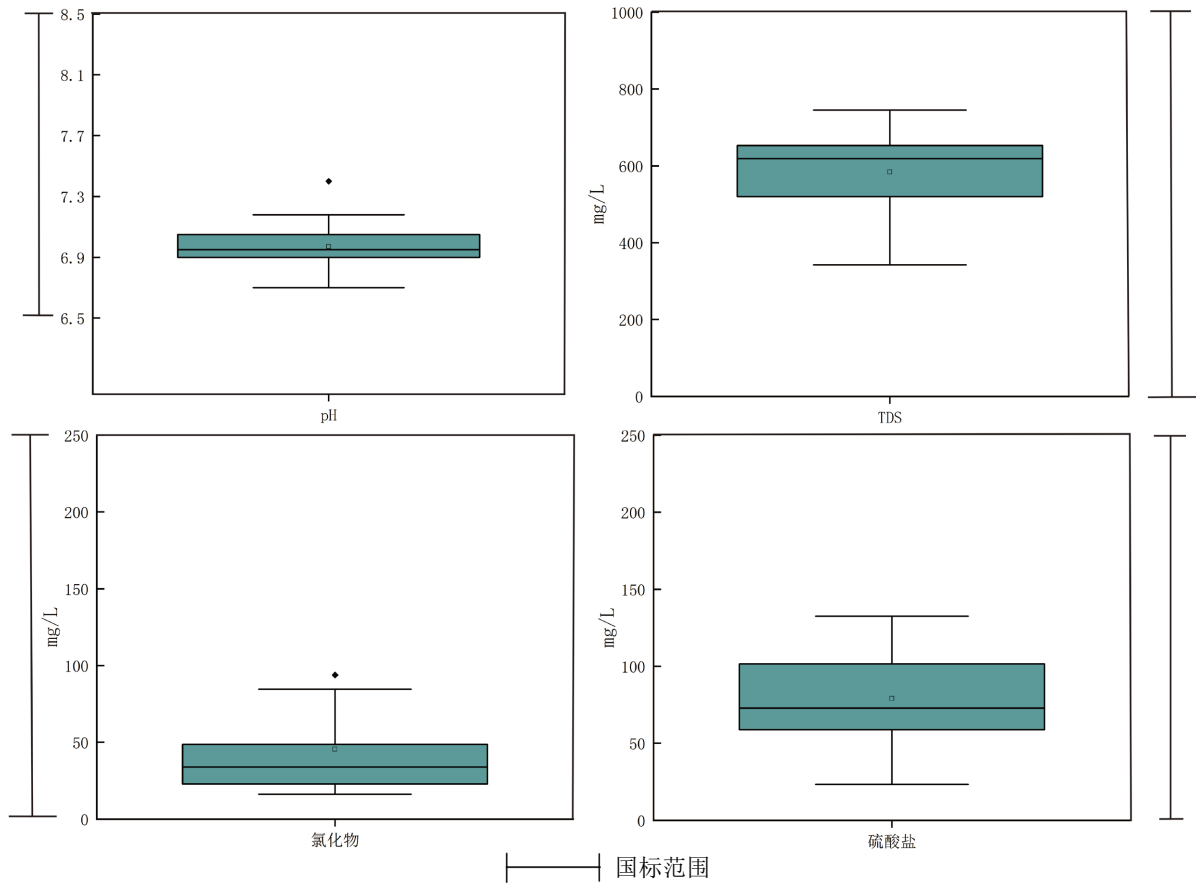


Figure 4. Drinking water hygiene standard index limit chart  
图 4. 饮用水卫生标准指数限度图

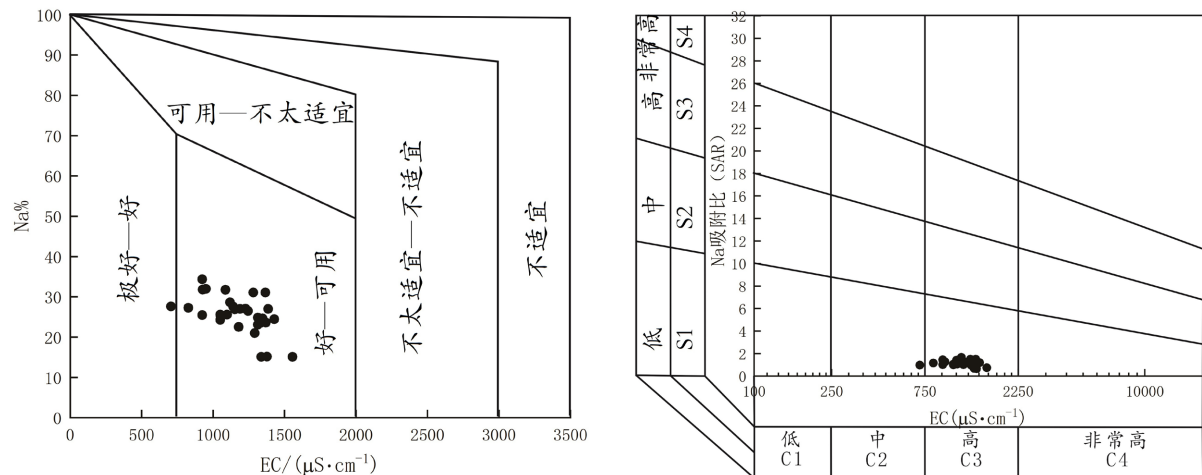


Figure 5. Classification of irrigation water quality and evaluation of irrigation water quality in the study area  
图 5. 研究区灌溉水水质分类情况及灌溉水水质评价

## 5. 结论

本研究以皖北宿州某农村 30 组农田灌溉浅层地下水为研究对象,运用数理统计、Piper 图、Gibbs 图等方法,综合分析研究区的地下水化学特征及水岩作用。得出以下三个结论。

1) 本研究区农田灌溉浅层地下水主要水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Mg-Ca}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$  型及  $\text{Cl-Ca-Mg}$  型,地下水水化学组分主要为,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 。

2) 本研究区农田灌溉浅层地下水水质整体偏弱酸性,水质相对较好,只有个别水样 TDS 超标。在各个指标中,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^+$ ,  $\text{K}^+$  的变异系数在 1 以上,在浅层地下水中具有较强的不稳定性,运用 Gibbs 图分析可以得出,研究区农田灌溉浅层地下水中的水化学组分主要控制因素是岩石风化。

3) 本研究区所有样品的氯化物、硫酸盐、pH 和 TDS 含量均在国家标准范围内,即研究区水质卫生符合国家标准,属于可饮用水。灌溉水中样品处于 S1-C2、S1-C3 区域,属于低碱害区域,表明研究区地下水灌溉并不会造成该地区土壤碱化,所以所有样品符合灌溉用水条件,可直接作为灌溉用水,不会对土壤与农作物造成危害。

## 致 谢

感谢国家煤矿防治技术中心提供实验条件。

## 基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目:宿州全源地质技术服务有限公司;省级大学生创新创业训练计划入选项目(S202110379188);校级大学生创新创业训练计划入选项目(ZCXM22-309、ZCXM22-308、ZCXM22-310)。

## 参考文献

- [1] 闵宁,任瑾,林曼利. 淮北平原区城市浅层地下水化学特征及成因分析——以宿州市为例[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2018, 33(1): 14-17.
- [2] 汪名鹏. 江苏泗阳城区浅层地下水化学特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2014, 28(6): 1329-1336.
- [3] 王秉顺,高宗军,蔡五田,等. 淇县地区地下水化学特征及其影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 42-45.
- [4] 赵宏海,沈传连. 宿州矿区浅层地下水中氟的分布及形成机理[J]. 中国煤田地质, 1999(3): 39-40+43.
- [5] 李磊,秦福刚,陈敏虹. 宿州市地下水含铁量高浅析[J]. 地下水, 2004(4): 260-261.
- [6] 王双. 地下水资源管理现状与保护策略研究[J]. 清洗世界, 2022, 38(2): 91-92.
- [7] 颜晓龙,马杰,张玉洁,等. 皖北地区浅层地下水水化学特征及水质评价——以宿州市某乡镇为例[J]. 河南科技, 2022, 41(6): 111-116.
- [8] 王武,孙建华,蒋惟. 宿州市埇桥区水资源开发利用问题成因分析与对策建议[J]. 治淮, 2020(8): 18-20.
- [9] 张艳,吴勇,杨军,等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.
- [10] 周长松,邹胜章,冯启言,等. 岩溶关键带水文地球化学研究进展[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 37-50.
- [11] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察, 1983(6): 6-11.
- [12] Gibbs, R.J. (1970) Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science (New York, N.Y.)*, **170**, 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- [13] 侯庆秋,董少刚,张旻玮. 内蒙古四子王旗浅层地下水水化学特征及其成因[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 116-121.
- [14] 张智雄,许模,张强,等. 绵阳红层地区浅层地下水水化学特征、成因及水质分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 168-173.
- [15] 《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022)正式发布,2023年4月1日实施[J]. 给水排水, 2022, 58(4): 112.



- 
- [16] 季雨桐. 沙柳河流域河水和地下水水化学特征及水质评价研究[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海师范大学, 2021.
- [17] Li, P., Li, X., Meng, X., *et al.* (2016) Appraising Groundwater Quality and Health Risks from Contamination in a Semi-arid Region of Northwest China. *Exposure and Health*, **8**, 361-379. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0205-y>
- [18] 杨森, 李义连, 姜凤成, 等. 高店子幅水化学特征及水质评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 226-234.