

# 淮北平原蔬菜种植区浅层地下水水质评价与农业灌溉适宜性分析

刘志鹏<sup>1</sup>, 冯松宝<sup>1</sup>, 余浩<sup>2</sup>, 鲁振宇<sup>1</sup>, 刘雅群<sup>1</sup>, 李鑫奇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

<sup>2</sup>宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月9日

## 摘要

为了评估淮北平原区宿州市周边蔬菜种植区地下水水化学特征及其农业灌溉适宜性, 本研究于2025年在安徽省宿州市埇桥区采集25个浅层地下水样品, 对其水化学参数并进行统计分析。结果表明: 地下水pH值介于7.14~7.67, 呈弱碱性; 总溶解固体(TDS)平均值为857.68 mg/L, 属于中等矿化度水; 水化学类型以  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Mg型为主,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和  $\text{HCO}_3^-$  为优势离子, 反映碳酸盐岩风化溶解的主导作用。Gibbs图分析显示, 水化学组成主要受岩石风化控制, 部分受蒸发浓缩影响。硝酸盐浓度平均为235.89 mg/L, 空间变异性高, 超标率达30%以上, 表明农业施肥等人为活动对水质影响非常明显。灌溉适宜性评价显示, 研究区地下水主要受硝酸盐污染和局部高矿化度的影响, 存在土壤次生盐渍化与作物健康风险。为此, 建议加强地下水动态监测, 推广生态农业与精准灌溉技术, 实施源头减排与水质修复, 以保障区域农业用水安全与水资源的可持续利用。

## 关键词

浅层地下水, 水质评价, 灌溉适宜性, 水化学特征, 硝酸盐污染

# Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Analysis of Agricultural Irrigation Suitability in the Vegetable Planting Area of the Huaibei Plain

Zhipeng Liu<sup>1</sup>, Songbao Feng<sup>1</sup>, Hao Yu<sup>2</sup>, Zhenyu Lu<sup>1</sup>, Yaqun Liu<sup>1</sup>, Xinqi Li<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

文章引用: 刘志鹏, 冯松宝, 余浩, 鲁振宇, 刘雅群, 李鑫奇. 淮北平原蔬菜种植区浅层地下水水质评价与农业灌溉适宜性分析[J]. 自然科学, 2026, 14(2): 187-196. DOI: 10.12677/ojns.2026.142021

## Abstract

In order to evaluate the hydrochemical characteristics and agricultural irrigation suitability of the groundwater in the vegetable planting areas around Suzhou City in the Huaibei Plain, 25 shallow groundwater samples were collected in Yongqiao District, Suzhou City, Anhui Province in 2025. Hydrochemical parameters of the samples were analyzed and statistically processed. The results indicate that the groundwater pH was found to range from 7.14 to 7.67, indicating weakly alkaline conditions. The average value of total dissolved solids (TDS) was determined to be 857.68 mg/L, classifying the water as medium-salinity type. The dominant hydrochemical type was identified as  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Mg, with  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{HCO}_3^-$  being the predominant ions, reflecting the controlling role of carbonate rock weathering and dissolution. Analysis using the Gibbs diagram showed that the hydrochemical composition is primarily controlled by rock weathering, with some influence from evaporation-concentration processes. The average nitrate concentration was measured as 235.89 mg/L, exhibiting high spatial variability, and the exceedance rate was found to be over 30%, indicating a significant impact from anthropogenic activities such as agricultural fertilization on water quality. The irrigation suitability assessment revealed that the groundwater in the study area is mainly affected by nitrate pollution and localized high salinity, posing potential risks of soil secondary salinization and crop health hazards. Therefore, it is recommended that groundwater dynamic monitoring be strengthened, ecological agriculture and precision irrigation technologies be promoted, and source reduction coupled with water quality restoration measures be implemented to ensure regional agricultural water security and the sustainable utilization of water resources.

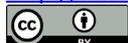
## Keywords

Shallow Groundwater, Water Quality Assessment, Irrigation Suitability, Hydrochemical Characteristics, Nitrate Pollution

Copyright © 2026 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

地下水作为人类生存与农业发展不可或缺的淡水资源，其质量状况不仅直接关系到饮用水安全，更是维系农业可持续生产、保障生态系统健康的关键因子。在全球范围内，地下水支撑了约三分之一人口的用水需求，并在缓解干旱威胁、提升雨养农业区气候韧性方面发挥着不可替代的作用。我国淮北平原作为重要的粮食与蔬菜产区，农业活动密集，地下水是当地灌溉用水的主要来源。然而，随着农业集约化程度的不断提高，化肥、农药的过量施用以及不合理的灌溉管理，已对浅层地下水水质构成了显著威胁，尤其是硝酸盐污染、盐分(总溶解固体)升高等问题日益凸显。这些水质问题不仅可能通过灌溉在作物中富集，影响农产品安全，长期使用还可能引发土壤次生盐渍化、破坏土壤结构，进而危及区域农业生产的根基与生态安全。因此，科学评估该区域地下水的水化学特征，系统分析其农业灌溉适宜性，深入揭示污染物的来源、空间变异规律及其主导成因，已成为实现水资源精准管理、推动农业绿色转型的迫

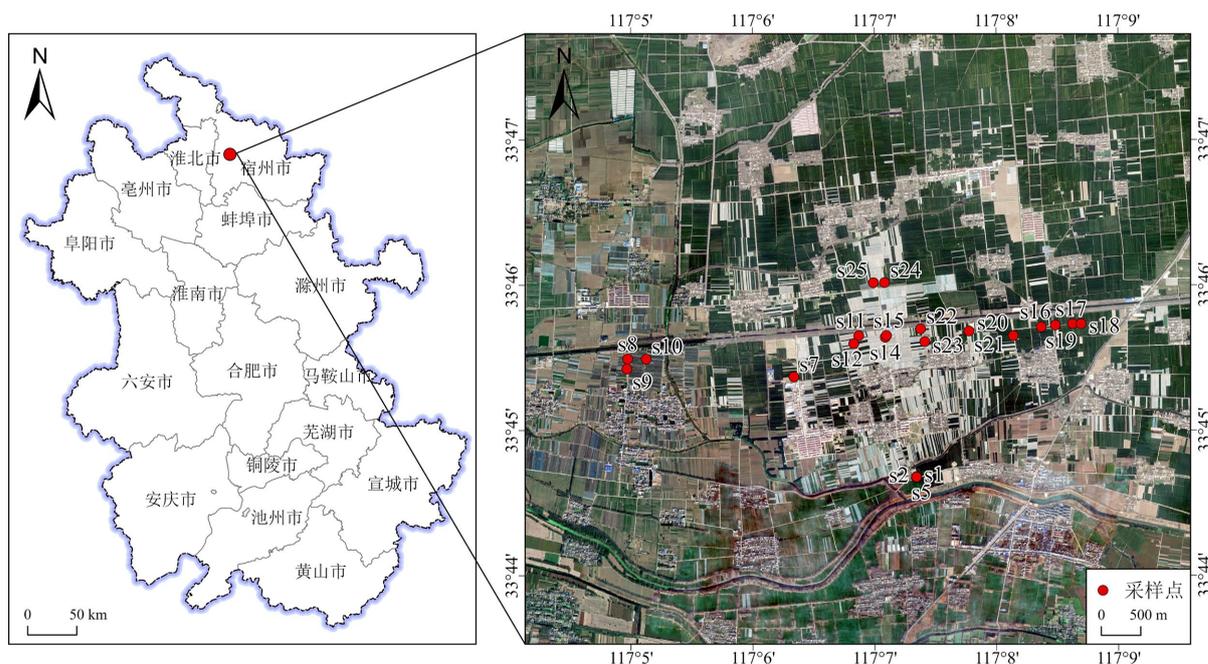
切需求。本研究旨在通过对淮北平原典型蔬菜种植区浅层地下水的系统采样与分析,明确其水质现状与主要风险,以期为制定有针对性的源头减排策略、推广生态农业与精准灌溉技术、保障区域水安全与农业可持续发展提供坚实的科学依据。

## 2. 区域水文地质概况

该研究区域位于安徽省宿州市埇桥区东南部(坐标范围:北纬 33.74°~33.77°,东经 117.08°~117.14°),地处淮北平原中部,属褚兰镇、曹村镇以南至夹沟镇东部的农田与水网交错带。该区为典型的暖温带半湿润季风气候,四季分明、雨热同期,年平均气温 14℃~15℃,年降水量 800~900 mm,其中 60%以上集中在 6~8 月。降水季节分布极不均衡,夏季易涝、春季常旱,形成“集中补给-长期消耗”的地下水动态特征,农业灌溉高度依赖地下水资源。气候的交替性与降水的年际波动性,直接影响着地下水补给效率和农业用水安全,突显了在该区域开展地下水动态监测与适应性管理的必要性与紧迫性[1]。

## 3. 材料与方法

### 3.1. 样品采集与处理



**Figure 1.** Sampling point distribution map  
**图 1.** 采样点分布图(GS(2023)2767 审图号)

于 2025 年在研究区内均匀布设 25 个地下水采样点(图 1),采样点涵盖蔬菜大棚区、露天菜地及周边村庄。使用一次性贝勒管采集潜水井水样,采样前对井进行充分抽水,以确保水样代表地下水现状。现场使用便携式多功能水质分析仪测定水温、pH、电导率(EC)、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)。用于阴、阳离子分析的水样,分别用预先洗净的聚乙烯瓶采集,所有样品低温避光保存,并于 24 小时内送至实验室分析。

### 3.2. 分析项目与方法

实验室分析主要离子含量。阳离子( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Li^+$ )采用电感耦合等离子体发射光谱法[2]测

定; 阴离子( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ )采用离子色谱法测定;  $HCO_3^-$  和  $CO_3^{2-}$  采用现场测定。所有分析均插入标准样品和空白样进行质量控制, 分析精度误差小于 5%。

### 3.3. 数据分析标准

采用描述性统计(最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数)分析各水化学参数的基本特征。利用 Piper 三线图分析水化学类型[1]。通过 Gibbs 图, 以  $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$  和  $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$  为横坐标, TDS 为纵坐标, 半对数投点, 定性判断大气降水、岩石风化和蒸发浓缩三大自然作用对水化学组成的控制强度。最后, 依据《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)和《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)对地下水进行灌溉适宜性评价。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 水化学参数统计特征

研究区地下水主要理化参数统计结果见表 1。

**Table 1.** Statistical characteristics of groundwater chemical parameters in the study area

**表 1.** 研究区地下水化学参数统计特征

参数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	样品数/件
TDS/(mg/L)	1109.00	583.00	857.68	143.45	0.167	25
pH	7.67	7.14	7.32	0.15	0.020	25
EC/( $\mu$ s/cm)	1824.00	897.00	1426.68	229.16	0.161	25
$Li^+$ /(mg/L)	0.0587	0.0500	0.0525	0.0020	0.038	25
$Na^+$ /(mg/L)	71.6976	28.8721	53.9989	9.7528	0.181	25
$K^+$ /(mg/L)	1.7665	0.2939	0.6736	0.3751	0.557	25
$Mg^{2+}$ /(mg/L)	78.2917	28.6333	48.4967	10.7153	0.221	25
$Ca^{2+}$ /(mg/L)	273.1952	99.3768	194.3243	39.9356	0.205	25
$F^-$ /(mg/L)	0.6548	0.1736	0.3668	0.1251	0.341	25
$Cl^-$ /(mg/L)	124.3041	20.8784	52.6647	25.2988	0.480	25
$NO_3^-$ /(mg/L)	470.8277	11.9180	235.8927	120.6608	0.512	25
$SO_4^{2-}$ /(mg/L)	227.6422	47.3784	141.5144	50.7518	0.359	25
$HCO_3^-$ /(mg/L)	636.4084	397.2213	501.3428	63.9359	0.128	25
DO/(mg/L)	4.7300	0.2700	1.2952	1.2699	0.980	25

由表 1 可知: pH 与矿化度: 地下水 pH 值介于 7.14~7.67 之间, 平均 7.32, 整体呈弱碱性。TDS 变化范围为 583~1109 mg/L, 平均 857.68 mg/L, 根据分类标准, 属中等矿化度水。电导率(EC)与 TDS 变化趋势一致, 平均为 1426.68  $\mu$ s/cm, 反映了水中离子总量较高。

主要离子含量: 阳离子以  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  绝对主导, 平均浓度分别为 194.32 mg/L 和 48.50 mg/L, 两者之和占阳离子总量的 80%以上(表 1), 这与区域富钙镁碳酸盐岩的地质背景相符。 $Na^+$ 、 $K^+$  含量相对较低。阴离子以  $HCO_3^-$  和  $NO_3^-$  为主, 平均浓度分别为 501.34 mg/L 和 235.89 mg/L,  $HCO_3^-$  的高含量是碳酸盐岩溶解的典型标志, 而  $NO_3^-$  的异常高值则指向强烈的人为输入。 $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$  平均浓度分别为 141.51 mg/L 和 52.66 mg/L。

参数变异性: 各参数变异系数(CV)差异明显。 $K^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  的 CV 值均大于 0.4, 属于高度变异,

尤其是  $\text{NO}_3^-$  的 CV 高达 0.512, 表明其空间分布极不均匀, 受局部点源或面源(如施肥不均、粪污排放)影响显著[3]。而 pH、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Li}^+$  等参数 CV 值较小( $<0.2$ ), 属弱变异, 反映了其受区域地质背景控制的相对稳定性[4]。

#### 4.2. 水化学类型与水化学特征

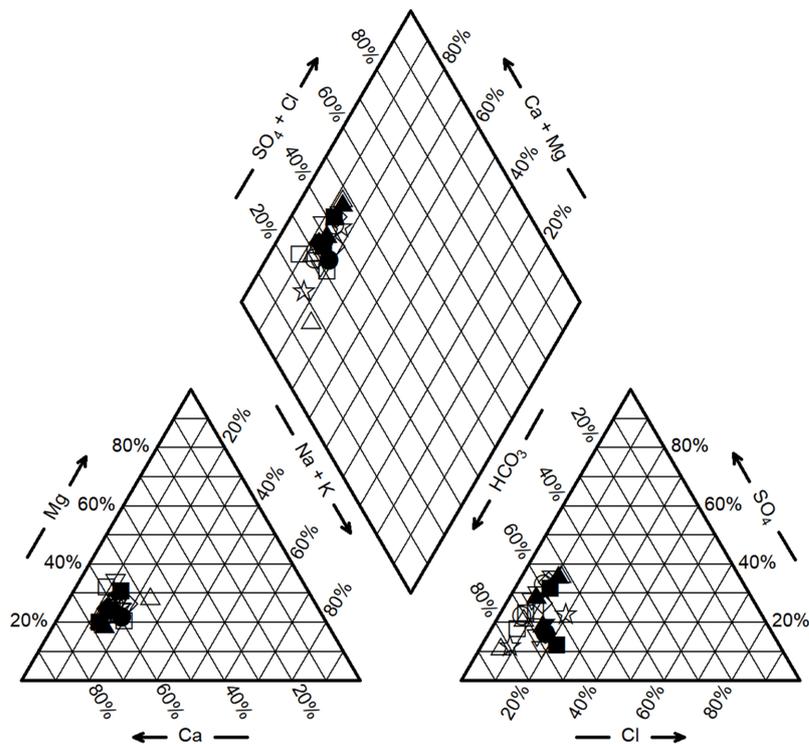


Figure 2. Piper diagram of groundwater chemistry in the vegetable planting area

图 2. 蔬菜种植区地下水化学 Piper 图

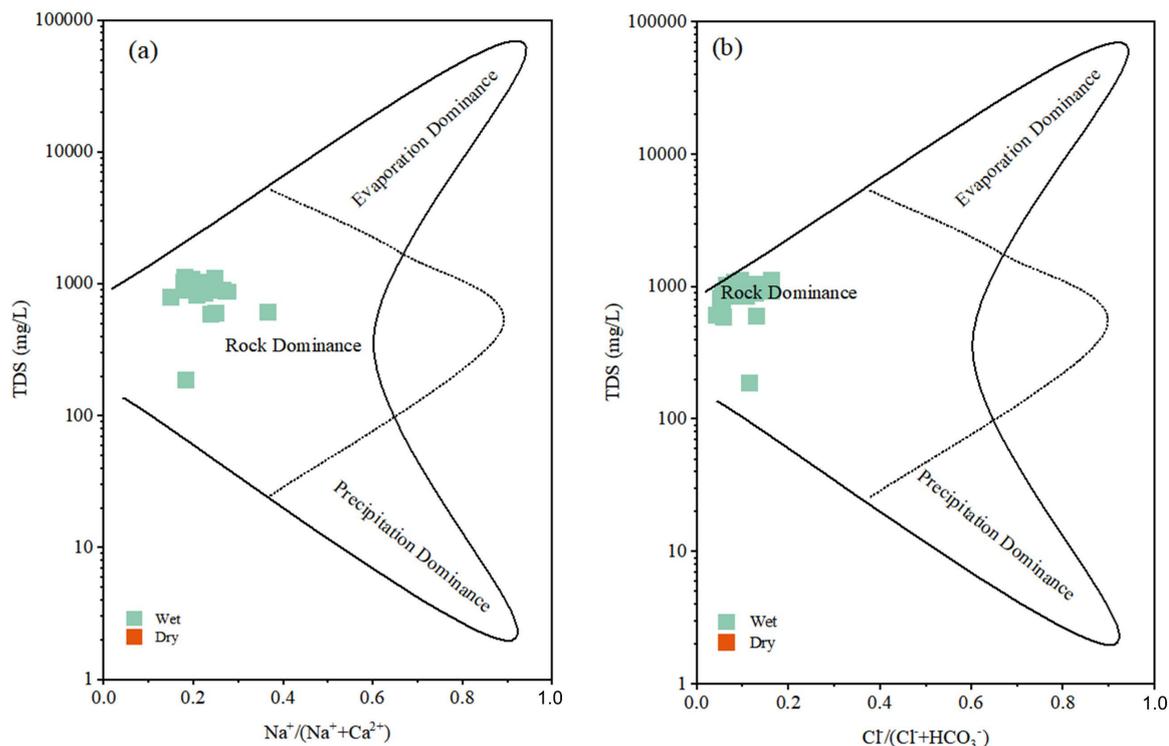
Piper 三线图常用于反映水化学主离子的相对丰度和分布特征。不同图例(实心点、空心三角等)通常代表不同采样时间或不同深度的水样, 它能直观反映蔬菜种植区地下水的化学类型和离子分布特征。是分析水化学成分演化规律的水化学类型图示方法[4]。基于离子含量测试结果, 绘制地下水 Piper 图(图 2), 研究区地下水阳离子三角图中, 水样点沿  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  边线分布,  $\text{Ca}^{2+}$  为优势阳离子; 阴离子主要沿阴离子三角图  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} - \text{Cl}^-$  边线分布, 表明阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主,  $\text{HCO}_3^-$  占主导优势。根据舒卡列夫分类, 研究区地下水样品水化学类型以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型为主。

根据图 2 分析, 研究区地下水样品点主要聚集在菱形区域的左下方。样品点的集中分布也反映出该研究区地下水化学组成的空间均一性, 说明区域内水文地球化学过程的主导作用相对一致。阳离子三角图中, 所有点均落在  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  端元; 阴离子三角图中, 点群主要分布在  $\text{HCO}_3^-$  端元, 部分向  $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  端元延伸。综合判定, 研究区地下水化学类型以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型为主, 少数为  $\text{HCO}_3\text{-NO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型或  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型。这种类型特征再次印证了碳酸盐岩溶解的主导作用和农业活动[4](硝酸盐、硫酸盐输入)的叠加影响。

对研究区采集的 25 件水样水化学指标进行统计分析, 研究区地下水中阳离子主要以  $\text{Ca}^{2+}$  为主, 其离子质量浓度占阳离子总量的 65.31%, 平均浓度为 192.17 mg/L, 阳离子平均质量浓度呈现  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ >$

$Mg^{2+} > K^+$ 的关系；阴离子主要以  $HCO_3^-$  为主，其离子质量浓度占阴离子总量的 53.53%，占主导地位，平均浓度为 498.34 mg/L，阴离子呈现  $HCO_3^- > NO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > F^-$  的关系。地下水 pH 值范围 7.16~7.67，平均值 7.33，呈弱碱性。TDS 含量介于 185~1109 mg/L 之间，平均值为 877.6 mg/L，整体来看，研究区地下水 TDS 值较小，水质一般，结合离子含量来看，属于中等矿化度水。

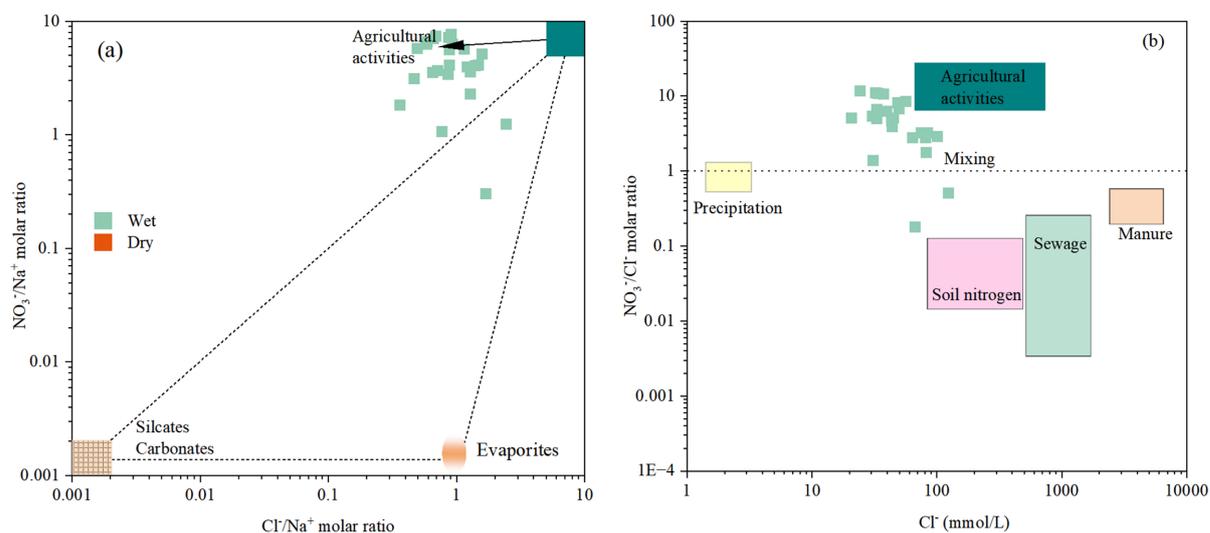
### 4.3. 水化学成因机制



**Figure 3.** Gibbs diagram of groundwater chemistry in the vegetable planting area  
**图 3.** 蔬菜种植区地下水化学 Gibbs 图

Gibbs 图是识别水体离子来源控制作用(大气降水、岩石风化、蒸发浓缩)的有效工具[4]。将本研究数据投于 Gibbs 图中(图 3)，结果显示：在阳离子比值图( $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  vs. TDS)中，绝大多数样本点落在“岩石风化控制区”内，表明地下水中的离子主要来源于含水层介质(如石灰岩、白云岩)的溶解[5]。在阴离子比值图( $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  vs. TDS)中，样本点主要分布在“岩石风化控制区”，但部分点向“蒸发浓缩控制区”方向偏移。这表明，尽管岩石风化是控制水化学组成的最主要过程，但在研究区旱季蒸发强烈、灌溉回水等作用下，蒸发浓缩过程对  $Cl^-$  等保守离子的富集起到了一定增强作用。值得注意的是，未发现样本点落在“大气降水控制区”，说明直接的大气降水输入对地下水化学组成影响微弱[6]。

为深化硝酸盐污染来源解析，在无法获取氮氧同位素数据的条件下，进一步挖掘了离子比值关系。通过分析  $NO_3^- / Cl^-$  与  $Cl^-$  浓度的关系图(或  $SO_4^{2-} / Cl^-$  比值)，发现部分高硝酸盐样品点具有较高的  $NO_3^- / Cl^-$  比值，这与化肥施用(特别是硝酸铵、尿素等)导致硝酸盐单独富集的特征相符；而部分  $NO_3^-$  与  $Cl^-$  同步升高的样品，则可能指示了生活污水或畜禽粪便的综合影响。此外，将采样点按蔬菜种植类型(如叶菜类、果菜类大棚区与露天菜地)进行归类，对比其硝酸盐浓度均值，发现大棚种植区的  $NO_3^-$  平均值显著高于露天菜地，初步印证了集约化程度与施肥强度对地下水硝酸盐含量的正向影响。



**Figure 4.** Scatter plot for source identification of groundwater chemical ions in the study area  
**图 4.** 研究区地下水化学离子来源解析散点图

这张水文地球化学图(图 4)通过双对数坐标,揭示了地下水中氯离子( $\text{Cl}^-$ )浓度与硝酸根/钠离子摩尔比( $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ )之间的变化关系,并以此有效区分了不同的水体化学形成过程与污染来源。

从离子分布特征来看,图 4 的数据点呈现出明显的分区聚集趋势。在高氯离子区域( $\text{Cl}^- > 100 \text{ mmol/L}$ ),通常伴随着较高的  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  比值,这明确指向了强烈的人类活动影响,特别是农业活动和污水排放。农业活动区的特征是硝酸盐富集[7],反映了化肥施用或动物粪便渗滤的影响;而污水影响区则通常具有极高的氯离子浓度,来源于生活废水中的氯化物[3]。在图的左下角,低氯离子和低  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  比值区域( $\text{Cl}^- < 0.1 \text{ mmol/L}$ )与降水区吻合,代表了大气的初始补给水,其离子含量最低,成分最接近自然背景。介于二者之间的广阔区域,则受到自然地质过程的支配,如硅酸盐溶解区和碳酸盐溶解区,其化学组成主要由含水层矿物风化控制,硝酸盐含量通常很低。

此外,图 4 箭头指示了关键的地球化学过程方向。“混合作用”箭头指向氯离子升高而  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  比值降低的趋势,暗示了高氯离子盐水(如污水或咸水)与低矿化度淡水(如降水或土壤水)的混合过程。“矿物溶解”过程则导致氯离子增长相对缓慢,硝酸盐并未显著增加。

综上所述,该图通过  $\text{Cl}^-$  与  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  这两个关键指标[8],清晰构建了一个诊断框架:低值端代表天然的大气输入和岩石风化作用,高值端则强烈指示农业与生活污染,而中间广泛的过渡区域则揭示了各种水-岩相互作用及不同水源的混合机制。这为快速判断地下水主要离子来源(是天然背景、地质成因还是人为污染)提供了直观有效的工具。

#### 4.4. 水化学特征形成的影响因素

**地质背景的基础性控制:** 淮北平原广泛分布的寒武-奥陶系碳酸盐岩及第四系含钙镁沉积物,为地下水提供了丰富的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  来源。Gibbs 图清晰地显示岩石风化是主导机制,这与区域地质背景完全吻合[6]。

**气候与水文条件的调制作用:** 半湿润季风气候下降水集中和强烈蒸发的特点,导致地下水经历周期性的“稀释-浓缩”过程。这解释了 TDS 和  $\text{Cl}^-$  含量偏高以及部分样品在 Gibbs 图中向蒸发端偏移的现象。灌溉水的反复抽取与回渗,加速了水分蒸发和盐分累积。

**农业活动的显著人为叠加:** 研究区高强度的蔬菜种植是导致水化学异常(特别是  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )的关键

人为因素。氮肥(如尿素、铵态氮肥)的过量施用和粗放管理,使得未被作物吸收的氮素以硝酸盐形式淋失至地下水。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的高浓度和高空间变异性,正是这种面源污染直接且不均匀的体现。此外,含硫肥料的使用也可能贡献了部分SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。

区域对比视角下的独特性与共性问题[9]:将本研究结果与豫北平原其他典型集约化农业区进行对比。共性在于,高强度农业施肥均导致浅层地下水硝酸盐普遍超标,且水化学类型受碳酸盐岩风化主导。本研究区域的独特性体现在:受淮北平原特定的气候-水文地质条件(如降水集中、蒸发较强、含水层岩性)影响,地下水的TDS均值相对较高,蒸发浓缩作用的信号更为明显;同时,蔬菜种植结构(大棚比例高)可能使硝酸盐污染的空间异质性更强。这种对比不仅验证了农业面源污染的广泛性,也强调了针对本地水文地质与农业模式制定差异化管控措施的必要性。

#### 4.5. 水质风险与生态管理启示

高硝酸盐地下水灌溉形成了一种“污染-暴露”链,不仅加大农产品质量安全风险,也使得地下水本身功能退化。同时,较高的TDS长期灌溉可能改变土壤盐分平衡,影响土壤结构和微生物活性,最终降低土地生产力。因此,对研究区而言,水资源管理必须从单纯的数量保障转向“水量-水质-土壤”协同保护的质量管理。治理的重点必须放在减少农业氮源流失和控制地下水矿化度上升上。

#### 4.6. 农业灌溉适宜性评价

Table 2. Statistical indicators of groundwater irrigation water quality in the study area

表 2. 研究区地下水灌溉水质指标统计

指标	最小值	最大值	风险评价
SAR	0.66	0.98	全部属于低钠水(S1级)。
%Na	13.6%	14.7%	整体处于安全范围。
RSC (meq/L)	-9.64	≈-0.81	全部为负值,无残余碳酸钠风险。
MH	29%	32%	均低于50%,镁危害风险低。

根据《农田灌溉水质标准》[10]-[13](GB 5084-2021)对研究区地下水进行评价:

(1) 基本项目:所有样品pH值均在5.5~8.5的适宜范围内。TDS平均值(857.68 mg/L)低于非盐碱土地区1000 mg/L的限值,但最大值(1109 mg/L)已轻微超标,长期灌溉存在导致土壤次生盐渍化的潜在风险。

(2) 有毒有害物质:硝酸盐氮(以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>计)问题最为严峻。标准限值为250 mg/L(旱作),而本研究有超过30%的样品超过此限值,最高浓度接近限值的2倍。高浓度硝酸盐灌溉不仅可能影响作物生长,更会通过蔬菜富集威胁人体健康,并加剧地下水污染。

(3) 其他离子:氯化物(Cl<sup>-</sup>)含量均未超标,但局部较高;钙镁离子含量高,硬度大,虽无直接毒害,但可能影响灌溉设施并导致土壤板结。

(4) 为进一步揭示潜在风险,如表2结果表明,研究区地下水钠吸附比(SAR)均值较低(<3),按USSL分类属于低钠水(S1级),直接钠害风险小。然而,钠百分比(%Na)有部分样品超过60%的警戒线,残余碳酸钠(RSC)亦有正值出现,提示存在一定的残余碱度,长期灌溉可能导致土壤碱化。镁危害(MH)比值较高,均值超过50%,可能在特定土壤条件下影响土壤结构。

总体而言,研究区地下水作为灌溉水源,其主要的制约因子是硝酸盐污染,次要风险是局部区域的高矿化度。

## 5. 结论

淮北平原埇桥区蔬菜种植区地下水呈弱碱性, TDS 平均 857.68 mg/L, 属中等矿化度水。水化学类型以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型为主,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和  $\text{HCO}_3^-$  是优势离子, 主要受碳酸盐岩风化溶解控制。

Gibbs 图解表明, 岩石风化作用是控制水化学组成的主要自然过程, 蒸发浓缩作用对  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  等离子的富集有增强效应。硝酸盐 ( $\text{NO}_3^-$ ) 浓度异常偏高(平均 235.89 mg/L, 超标率高)且空间变异大, 是农业施肥导致人为输入的直接证据, 成为最突出的水质问题。

当前地下水水质对农业灌溉的主要风险来自硝酸盐污染和局部的高矿化度。保障区域农业与水资源安全, 必须采取监测预警、源头减排(生态农业、精准灌溉)、工程修复与政策管理相结合的系统性治理策略。

综上, 保障研究区农业与水资源的可持续发展, 必须实施从“末端监控”到“源头-过程协同控制”的精准管理策略。建议核心包括: 推广水肥一体化与生态农业, 从源头削减氮盐投入; 建立以盐分与硝酸盐为核心指标的地下水与土壤联合监测预警网络; 依据水质空间分组(如高硝区、高盐区)制定差异化的灌溉定额与作物布局方案。本研究通过融合常规水质评价与多元统计分析及专业灌溉指标, 为同类农业区地下水的精准评价与风险管控提供了可借鉴的分析框架。

## 基金项目

安徽省大学生创新创业项目(淮北煤田浅层地下水的微生物特征, S202510379065); 安徽省现代产业学院项目(宿州学院地质勘查与智慧矿山产业学院, 2024xdcy023); 宿州学院新建专业质量提升项目(勘查技术与工程, szxy2023xjzj02); 宿州学院教学创新团队项目(资源勘查学教学创新团队, szxy2024cxt05)。

## 参考文献

- [1] 陈松, 桂和荣, 林曼利, 等. 淮北煤田河流水化学特征意义淮北煤田河流水化学特征及意义[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 414-421.
- [2] 祁泽学, 肖勇, 张永兴, 等. 柴达木盆地那棱格勒河流域地下水化学特征与形成机制研究[J/OL]. 岩矿测试. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vxt3\\_kKBHYOSrghOMx-clKz6U8IMBdERwG7G0rkCHv7NF1u9iN2uyibSMdbJxuEcRQvbBvY-qtuZ\\_Jtm8WvELI8l4QS5dht2NeM0dGrCby\\_dYTMIIcDfbNzcLv056zz-dBbH9vZELo0eBjkaZNnX9EbAkP-CIwMwnH\\_c-c3Po6Uo2jhlPIPnma4w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vxt3_kKBHYOSrghOMx-clKz6U8IMBdERwG7G0rkCHv7NF1u9iN2uyibSMdbJxuEcRQvbBvY-qtuZ_Jtm8WvELI8l4QS5dht2NeM0dGrCby_dYTMIIcDfbNzcLv056zz-dBbH9vZELo0eBjkaZNnX9EbAkP-CIwMwnH_c-c3Po6Uo2jhlPIPnma4w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS), 2026-01-13.
- [3] 朱春芳, 龚建师, 檀梦皎, 等. 淮北平原浅层地下水化学特征及水质动态研究[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 56-57.
- [4] 董秀玲, 曹卫兵, 师晶, 等. 煤炭资源型城市浅层地下水水化学特征与控制因素分析[J/OL]. 环境检测管理与技术. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vxt3\\_kKBHYOGbYJCJT8WxNEo\\_A5xFLViZlIGtvr-ZauH7c4YcYlZWDX0PNtVAI7CDgs28BtO07iV0Cz-UmpPu56dsPjtqNhLm1x5CYZ10KaBRKGitmSqihJg3AX6Cn6aSdnchRIFg\\_Tbi5\\_fSvZwdw-fuHl1sf6bB9VcGjniFJs22YJcd3KNIURUw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vxt3_kKBHYOGbYJCJT8WxNEo_A5xFLViZlIGtvr-ZauH7c4YcYlZWDX0PNtVAI7CDgs28BtO07iV0Cz-UmpPu56dsPjtqNhLm1x5CYZ10KaBRKGitmSqihJg3AX6Cn6aSdnchRIFg_Tbi5_fSvZwdw-fuHl1sf6bB9VcGjniFJs22YJcd3KNIURUw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS), 2025-12-15.
- [5] 武文静, 冯家宝, 余浩, 等. 淮北平原区农田地下水水化学特征影响因素及水质评价[J]. 能源环境, 2025(2): 138-142.
- [6] 刘永容, 叶天才, 崔金立, 等. 含砷地下水浇灌对菜田土壤和蔬菜砷的含量、赋存形态及其健康风险的影响[J]. 土壤通报, 2025, 56(5): 1423-1433.
- [7] 朴春香, 金东日, 刘发现. 延边蔬菜种植区地下水中硝酸盐污染分析[J]. 延边大学农学报, 2007(3): 201-203, 221.
- [8] 王琳, 李季, 宋效宗, 等. 集约化蔬菜种植区地下水中反硝化细菌的分离鉴定[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2078-2081.
- [9] 陈昊, 李艳利, 高振朋, 等. 豫北蔬菜种植区浅层地下水硝酸盐来源及对强降雨事件的影响[J]. 生态环境与农村

环境学报, 2004, 40(7): 943-953.

- [10] 黄聪灵, 黄健祥, 陈炎, 等. 蔬菜典型种植区豇豆农药残留特点及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 298-307.
- [11] 陈家玉, 桂和荣, 郭艳, 等. 淮北煤田深层地下水微生物群落特征及其水源示踪意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3503-3512.
- [12] 杨襍凡, 徐智敏, 陈歌, 等. 南方煤矿矿井水水化学特征及生物组合修复研究[J]. 能源与环保, 2025, 47(11): 42-50.
- [13] 石瑞卿, 鞠铁男, 谢银凤, 等. 典型蔬菜种植区及周边地下水硝酸盐分布现状和来源分析[J]. 环境监测管理与技术, 2025, 37(4): 54-60.