

ENVIRONMENTAL SCIENCE

## 第 45 卷 第 3 期 2024 年 3 月 15 日

目 次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	(1233) (1243) (1254) (1255) (1274) (1285) (1293) (1293) (1304) (1315) (1328) (1337)
·····································	(1349) (1361) (1371) (1382) (1392) (1402)
<ul> <li>崔志谋,史小红,赵胜男,卢俊平,张昊,刘莹慧,郭鑫,王彦隽</li> <li>重庆市长寿湖水库表层水体重金属时空分布及风险评价</li> <li>张瑞淏,刘娅君,罗泳楠,李杰芹,李彩霞,李佳佳,张成长江流域微塑料污染特征及生态风险评价</li> <li>"丁爽,李卫明,张续同,刘子健,高雅坤,李映成,王芳炜</li> <li>"江水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估</li> <li>"丁夏人黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价</li> <li>"新南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价</li> <li>都阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析</li> </ul>	(1415) (1428) (1439) (1448) (1457) (1468) (1468) (1480) (1492)
杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测 不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例 ······代孟均,张兵,杜倩倩,孙季珲,田蕾,王义东 长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素 ····································	(1502) (1512) (1525) (1539) (1553) (1553) (1561) (1577) (1586)
基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析 ————————————————————————————————————	(1530) (1598) (1598) (1615) (1629) (1644) (1655) (1665) (1674)
<ul> <li>一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、一、</li></ul>	(1684) (1692) (1702) (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	(1724) (1739) (1749) (1760) (1760) (1769) (1781) (1793) (1803) (1812) (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制 ····································	(1821) (1830) (1840) (1849) (1859)

## 长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素

刘海1, 宋阳1, 李迎春1, 魏伟2\*, 赵国红1, 王旭东1, 黄健敏1

(1. 安徽省公益性地质调查管理中心,合肥 230091; 2. 四川农业大学建筑与城乡规划学院,成都 611830)

**摘要:** 浅层地下水为安庆市居民生活用水和工农业生产用水的主要水源,是维持社会经济可持续发展和区域生态环境的重要基础保障.为深入研究安庆市浅层地下水的水化学特征及控制因素,采集了196组浅层地下水水样,综合运用Piper三线图、Gibbs 图、离子比值和数理统计方法对安庆市地下水的水化学特征及控制因素进行研究,定量评估不同来源对地下水水化学组分的贡献.结果表明,安庆市浅层地下水呈弱碱性,pH值在5.84~8.38,均值为7.21; ρ(TDS)介于47~1620 mg·L<sup>-1</sup>,均值为324.21 mg·L<sup>-1</sup>,阴阳离子主要以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 Ca<sup>2+</sup>为主,水化学类型为HCO<sub>3</sub>-Ca型.地下水水化学组分受岩石风化溶滤作用、阳离子交替吸附作用、矿物溶解和沉淀以及人类活动综合影响.Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化溶解作用,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>受工业活动和生活污水的排放、K<sup>+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>受农业活动的影响.APCS-MLR受体模型分析进一步揭示地下水水化学组分主要有地质因子、工业因子、农业因子和未知源这4种来源,其贡献率分别为45.35%、14.19%、25.38%和15.08%.地质因子是浅层地下水水化学组分的重要来源,人类活动则加剧了地下水水化学的演变.

关键词:浅层地下水;水化学特征;水岩作用;控制因素;安庆市

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1525-14 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202304087

## Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin

LIU Hai<sup>1</sup>, SONG Yang<sup>1</sup>, LI Ying-chun<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>2\*</sup>, ZHAO Guo-hong<sup>1</sup>, WANG Xu-dong<sup>1</sup>, HUANG Jian-min<sup>1</sup>

(1. Public Geological Survey Management Center in Anhui Province, Hefei 230091, China; 2. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611830, China)

Abstract: Shallow groundwater is the main source of water for living and industrial and agricultural production in Anqing City, which is an important basic guarantee to maintain the sustainable development of the social economy and regional ecological environment. In order to further study the water chemical characteristics and controlling factors of shallow groundwater in Anqing City, 196 groups of shallow groundwater samples were collected. A Piper diagram graph, Gibbs chart, ion ratio, and mathematical statistics were comprehensively used to study the water chemical characteristics and controlling factors of groundwater in Anqing City, and the contribution of different sources to the water chemical characteristics and controlling factors of groundwater in Anqing City was weakly alkaline, with pH values ranging from 5. 84 to 8.38, with an average value of 7.21. The TDS ranged from 47 to 1 620 mg  $L^{-1}$ , with an average of 324. 21 mg  $L^{-1}$ . HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Ca<sup>2+</sup> were the main anions, and the water chemical type was HCO<sub>3</sub>-Ca type. The chemical components of groundwater were affected by rock weathering leaching, cation alternating adsorption, mineral dissolution and precipitation, and human activities. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> were affected by industrial activities and domestic sewage discharge; and K<sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were affected by agricultural activities. The APCS-MLR receptor model analysis further revealed that the chemical components of groundwater were mainly geological factors, industrial factors, agricultural factors, and unknown sources, and their contribution rates were 45.35%, 14.19%, 25.38%, and 15.08%, respectively. Geological factors were important sources of hydrochemical components of shallow groundwater, and human activities aggravated the evolution of groundwater hydrochemistry.

Key words: shallow groundwater; hydrogeochemical characteristics; water-rock interaction; control factors; Anqing City

地下水是人类生存和发展不可或缺的重要基础 资源,是维持社会可持续发展和生态环境系统稳定 的基本要素<sup>[1]</sup>.随着工业化和城市化进程的高速推 进,地下水资源遭受了严重的不合理开发利用和人 类生产生活的污染,导致水资源和水环境问题日益 凸显<sup>[2]</sup>.自然条件下地下水水化学特征受溶滤、脱硫 酸/碳酸和阳离子交替吸附等水岩相互作用控制,而 剧烈的人类活动则改变地下水中的化学组分及演化 规律<sup>[3]</sup>.如工矿业活动导致 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>浓度的升高<sup>[4,5]</sup>,生活 污水和农业活动则影响 Cl<sup>-</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度<sup>[5,6]</sup>,不合理的 农业灌溉增加地下水中盐分浓度<sup>[7]</sup>.当前,地下水成 因机制研究是水文地质学和水文地球化学研究的热 点和难点问题,因此,查明地下水水化学特征及控制因素对于地下水的污染防治、开发利用和保护具有 重要的现实意义.

当前,地下水水化学特征及形成的研究方法主要包括:Piper三线图<sup>[8]</sup>、Gibbs图<sup>[9]</sup>、离子比值和水文地球化学模拟<sup>[10]</sup>等经典水文地球研究方法<sup>[1,11]</sup>,相关性分析<sup>[12]</sup>、聚类分析<sup>[13]</sup>和因子分析<sup>[14,15]</sup>等数理统计分析进一步拓展地下水水化学研究手段.受地下水

- 基金项目: 安徽省自然资源厅公益性地质调查项目(2022-g-1-16)
- 作者简介:刘海(1984~),男,博士,工程师,主要研究方向为地下水 环境,E-mail: 103304365@qq.com
  - \* 通信作者,E-mail: jpwflz@sicau.edu.cn

收稿日期: 2023-04-11;修订日期: 2023-05-29

形成的复杂性制约,传统的水化学方法或数理统计 方法往往难以得到可靠的研究结果.因此,综合多方 法分析是当前地下水水化学研究的趋势<sup>[1]</sup>.如Hu 等<sup>[16]</sup>基于主成分分析、水文地球化学模拟和辅助化 学方法,指出长江中游地区地下水化学成分主要受 人为活动和地质背景的控制;刘元晴等<sup>[2]</sup>综合利用相 关性分析和主成分分析、Piper三线图、Gibbs 图和离 子比值等方法研究了牟汶河中上游孔隙水化学特征 及控制因素,认为地下水化学演化过程主要受岩石 风化、阳离子交替吸附和人类活动影响.在评价地 下水水化学特征演化的同时,地下水水化学来源及 污染源的识别也逐渐成为目前研究的热点.

如同位素示踪技术<sup>[17]</sup>、主成分分析<sup>[18]</sup>、PMF受体模型<sup>[19]</sup>和APCS-MLR受体模型<sup>[20-22]</sup>已成为研究地下水水化学来源及污染源的主要手段.主成分分析方法在一定程度上能解析污染来源,但仅限于定性的判定;PMF受体模型虽然可以定量解析污染源贡献率,但是需要确定数据矩阵中使用实验性的不确定值;而APCS-MLR受体模型是基于主成分分析法获得因子得分,在对原始数据标准化的基础上,确定因子的绝对真实得分(APCS),再利用多元线性回归模型确定公因子对地下水指标的贡献率<sup>[21]</sup>.APCS-MLR受体模型能够定量解析自然或人为源对每个变量的贡献<sup>[22]</sup>,已成为地下水源识别和源解析的常用工具.

目前,相关学者在长江中上游地区和下游地区 展开了地下水水化学特征的研究<sup>[23-25]</sup>.如李状等<sup>[26]</sup> 运用多元统计分析、水化学图件、离子比值和反向 水文地球化学模拟等方法对马鞍山市当涂地区浅层 地下水水化学演化进行分析,指出水岩相互作用是 该区地下水形成的主要控制作用.安庆市位于安徽 省西南部、长江中下游北岸,是长江中下游重要的 综合交通枢纽;长江中下游商贸物流中心;重要的旅 游服务基地;石化、轻纺和装备制造业为主的产业 基地.工矿企业"三废"不合理排放及农田农药化肥 的不当使用,改变了安庆市地下水水化学特征<sup>[27]</sup>, 导致地下水环境遭受不同程度的污染<sup>[28]</sup>.目前关于 安庆市地区的地下水研究关注的是污染及水质评 价,而对于地下水水化学的控制因素及污染源识别 方面的研究不足,鉴于此,本文综合采用 Piper 三线 图、Gibbs 图、离子比值和数理统计方法对安庆市地 下水的水化学特征及控制因素进行研究,基于 APCS-MLR受体模型定量评估地下水化学来源,以 期为安庆市地下水污染防治及合理开发利用提供 依据.

#### 1 研究区概况

研究区地处长江中下游北岸,东经116°44′04" ~117°14′42",北纬30°12′04"~30°46′16",为安庆 市市区规划范围(图1),总面积901 km².研究区地势 自北西向南东倾斜,呈阶梯状地貌,西北部为低山丘 陵区,东南部为沿江平原区,海拔高度7.7 m(长江河 漫滩)~690.0 m(三县尖).区内土地类型主要包括 农业用地、建设用地和林业用地[图1(a)],区内河渠 纵横交错,湖泊、池塘星罗棋布,地表水系发育,均属 长江水系.流经区内的主干河流为长江和皖河.主 要泊湖有菜子湖、破罡湖、石塘湖、七里湖、八里湖 和石门湖等,湖泊均有河汊与长江相通.区内多年平 均降雨量为1428.18 mm,多年平均蒸发量为 1300.77 mm,多年平均气温为16.82℃,多年平均日



Fig. 1 Land use map and hydrogeological of the study area

照时数1672h.

研究区位于下扬子地块中的沿江拱断带,区域地 层区划属扬子地层区下扬子地层分区安庆地层小区. 以山口~集贤关~杨桥一线为界,西北部为基岩大量 出露,除缺失下中统泥盆系外,从奥陶系至第三系均 发育,侵入岩为燕山期的中酸性岩体.东南部仅在大 观凤凰山和迎江区余桥~老峰一带有少量基岩出露, 其余均为厚约20~70m的第四系松散层所覆盖.

研究区地下水类型以松散岩类孔隙水、碎屑岩 (红层)孔隙裂隙水、碳酸盐类裂隙溶洞水、基岩裂隙 水为主[图1(b)和图2].其中松散岩类孔隙水含水岩 组以第四系(Q<sub>hw</sub>、Q<sub>px</sub>、Q<sub>pq</sub>)和新近系(N)松散沉积为 主,岩性有粉质黏土、粉细砂、中粗砂、砾卵石、黏 土、泥砾和砂砾石;碎屑岩(红层)孔隙裂隙水主要出 露在西部的十里乡、山口乡,含水岩组以白垩系宣南 组(K<sub>2</sub>x)构成,岩性包括泥岩、泥质粉细砂岩和砂砾 岩,此外局部地段由泥盆系上统五通组(D<sub>3</sub>w)、志留 系上统茅山组(S<sub>3</sub>m)、志留系中统茅山组(S<sub>2</sub>f)志留系 下统高家边组(S<sub>1</sub>g)石英砂岩、石英粉细砂岩和岩屑 石英砂岩组成.



碳酸盐类裂隙溶洞水主要分布在杨桥镇、大龙 山镇南部及山口乡的丘陵区.含水岩组为三叠系下 统东南陵湖组(T<sub>n</sub>)、二叠系栖霞组(P<sub>1</sub>q)、石炭系船 山(C<sub>2</sub>c)和黄龙组(C<sub>2</sub>h)、奥陶系仑山组(O<sub>1</sub>l)等地层, 以三叠系南陵湖组分布最广,岩性主要为灰岩和白 云质灰岩,岩溶较发育.基岩裂隙水主要分布在北部 大龙山、小龙山至花山一带以及五横至罗岭一带,由 燕山期侵入岩组成,呈岩株和岩脉产出.岩性主要为 花岗闪长岩、钾长花岗岩和石英正长岩等.降水是 本区地下水主要补给来源,长江沿岸以及较大支流 河谷的漫滩地带,地表水网也是平原地区地下水补 给来源之一.

#### 2 材料与方法

#### 2.1 样品采集与测试

根据研究区土地利用现状和水文地质分区进行 采样点布设,共采集了196组水样,其中建设用地区 106组,农业用地区69组,林业用地区21组(图1).地 下水样品取自区内饮用供水井和农田灌溉井等.

pH和溶解性固体总量等参数在采集现场使用 SD150型便携式多参数水质测试仪测定.SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>和 NO3<sup>-</sup>使用 Dionex-2500 型离子色谱仪测定, K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>等采用 ICAP 6300Duo 型电感耦合等离子 体光谱仪测定; HCO3<sup>-</sup>采用滴定法测定. 阴阳离子的 测定误差一般低于 0.1%. 所有测试均在安徽省地质 实验研究所完成.

#### 2.2 数据处理方法

采用 ArcGIS 10.8绘制土地利用现状图、水文地 质略图和采样分布图.基于 ArcGIS 10.8采用反距离 加权插值法(IDW)绘制水化学组分的空间分布图. Piper 三线图、Gibbs 图和离子比值相关图等基于 Origin 2021绘制.SPSS 26.0用于地下水水化学指标 统计、相关性分析和主成分分析等,采用 APCS-MLR 受体模型估算不同来源对地下水水化学组分的贡献 率<sup>[21]</sup>, APCS-MLR受体模型具体的计算方法与步骤见 文献[21].

地下水矿物饱和指数采用PHREEQC3.7软件进行计算.矿物饱和指数(SI)是水文地球化学研究的一个重要指标,反映地下水水化学组分的存在形态,常用来识别各种矿物的溶解和沉淀过程,其定义为<sup>[10]</sup>:

$$SI = \lg \frac{IAP}{K}$$
(1)

式中,IAP为矿物溶解反应中相关离子的活度积;K为 矿物在某温度下溶解反应的平衡常数.当SI=0时,矿 物处于平衡状态;SI>0时,矿物处于过饱和状态,具有 沉淀趋势;SI<0时,矿物处于非饱和状态,具有溶解 趋势.

#### 3 结果与讨论

#### 3.1 地下水化学特征

研究区浅层地下水水化学指标统计结果如表1 所示.区内建设用地、农业用地和林业用地浅层地 下水 pH平均值为7.25、7.15和7.23,总体上呈弱碱 性.ρ[总硬度(TH)]平均值分别为239.77、220.56和 170.90 mg·L<sup>-1</sup>,呈现建设用地>农业用地>林业用地 的特征.ρ(TDS)平均值为341.35、317.76和258.88 mg·L<sup>-1</sup>,呈现建设用地>农业用地>林业用地的特征. 从这3个指标的变异系数来看,林业用地浅层地下水 的空间变异性明显大于建设用地和农业用地,林业 用地中有一个样品的TDS浓度为所有样品中的最高 值(1620 mg·L<sup>-1</sup>),几乎为农业用地和建设用地地下 水的2倍.采样调查时发现,该井位于石门湖北部, 且位于化工园区周边区域,受周边污染影响较大,说 明林业用地地下水可能受点源污染较为严重,从而 导致林业用地地下水TDS异常变异.而建设用地和 农业用地地下水主要用于生活生产和农田灌溉用 水,TDS值总体变化不大,总体变异不大.

建设用地浅层地下水中阳离子以 $Ca^{2+}$ 和 $Na^{+}$ 为 主,呈 $Ca^{2+}>Na^{+}>Mg^{2+}>K^{+}$ 特征,阴离子以 $HCO_{3}^{-}$ 为主, 呈 $HCO_{3}^{-}>SO_{4}^{2-}>C\Gamma>NO_{3}^{-}$ 特征.农业用地地下水中阳 离子以 $Ca^{2+}$ 和 $Na^{+}$ 为主,呈 $Ca^{2+}>Na^{+}>Mg^{2+}>K^{+}$ 特征,阴 离子以 $HCO_{3}^{-}$ 为主,呈 $HCO_{3}^{-}>SO_{4}^{2-}>NO_{3}^{-}>C\Gamma$ 特征.林 业用地地下水中阳离子以 $Ca^{2+}$ 和 $Na^{+}$ 为主,呈 $Ca^{2+}>$  $Na^{+}>Mg^{2+}>K^{+}$ 特征,阴离子以 $HCO_{3}^{-}$ 为主,呈 $HCO_{3}^{-}>$  $SO_{4}^{2-}>C\Gamma>NO_{3}^{-}$ 特征.与建设用地和农业用地浅层地 下水相比较,林业用地具有较低的 $HCO_{3}^{-}$ 含量(P<0.05).农业用地与建设用地和林业用地比较,呈现 较高的 $NO_{3}$ 含量(P<0.01).

表1 研究区不同土地利用下地下水水化学特征统计<sup>1)</sup> Table 1 Statistical summary of hydrochemical data for different land uses in the study are

	<u></u>	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		6				1	V 'A	N 19		and the second second	
土地类型	项目	pН	TDS	ТН	K A	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	Cl⁻	$SO_4^{2-}$	HCO3	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
建设用地 (n=106)	最大值	8.38	889.00	661.56	53.99	70.17	205.00	66.71	307.55	322.30	817.06	60.23	59.12
	最小值	5.84	47.00	22.20	0.29	2.52	5.66	1.96	2.52	0.10	22.88	0.20	0.68
	平均值	7.25	341.35	239.77	5.16	22.30	70.12	15.73	27.38	56.65	219.14	13.46	20.94
	标准差	0.30	160.93	133.40	8.13	14.81	38.93	10.91	34.66	45.05	146.71	14.22	10.85
Ce VI	变异系数	4.17	47.14	55.64	157.61	66.42	55.52	69.38	126.59	79.52	66.95	105.65	51.84
7.7	最大值	8.21	791.00	701.07	27.74	60.51	214.20	52.19	110.87	198.10	735.35	105.95	66.16
	最小值	6.10	92.00	52.61	0.32	3.00	13.39	3.21	2.52	0.10	11.34	0.20	3.32
农业用地 (n=69)	平均值	7.15	317.76	220.56	5.37	19.22	60.64	16.79	19.12	38.08	212.85	24.51	26.96
(n-09)	标准差	0.36	152.08	140.95	5.55	11.74	40.79	11.64	16.96	34.18	182.51	25.75	12.99
	变异系数	5.06	47.86	63.91	103.20	61.06	67.27	69.30	88.66	89.77	85.75	105.04	48.18
林业用地 (n=21)	最大值	8.01	1 620.00	868.43	7.39	202.15	274.90	44.20	503.47	412.10	584.26	43.90	30.51
	最小值	6.50	65.00	14.33	0.41	2.21	3.83	1.16	2.52	5.58	3.27	0.20	8.86
	平均值	7.23	258.88	170.90	2.28	18.77	51.81	10.19	32.95	50.71	109.16	9.94	19.29
	标准差	0.31	344.69	212.50	1.99	41.16	67.37	11.69	105.62	93.64	135.39	11.04	6.43
	变异系数	4.24	133.15	124.34	87.53	219.34	130.03	114.73	320.53	184.67	124.02	111.09	33.35

1)pH无量纲,变异系数单位为%,其余数值的单位为mg·L<sup>-1</sup>

从地下水的变异系数来看,建设用地浅层地下 水中K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>变异系数超过了100%,呈现出极 强的空间变异性.农业用地中K<sup>+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>变异系数超 过了100%,其余离子呈中度程度的空间变异性.林 业用地中除K<sup>+</sup>离子外,其余离子均超过100%,其中 Cl<sup>-</sup>变异系数达320.53%,除K<sup>+</sup>外,其余离子具有极强 的空间变异性.

研究区浅层地下水中TDS、TH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>具有相对一致的空间分布(图3),由北至南大 致呈递增趋势,其浓度高值区主要位于长江北岸一 带,沿地下水流向均呈增大趋势,在安庆市区高值区 尤为集中.低值区主要位于研究区北部低山丘陵区. 表明上述离子可能具有一致的来源.CF和SO4<sup>2</sup>空间 分布规律大体一致,由安庆市区向四周呈递减趋势, 局部呈点状分布更为明显(图3).表明CF和SO4<sup>2</sup>可 能受到人类活动的影响.Na\*浓度高值区位于研究区 西南部农业用地区、东北部农业用地区和中部安庆 市区周边建设用地区,北部农业用地区呈点状高值 区分布.K\*浓度高值区主要分布在研究区北部农业 用地~中南部建设用地一带,表明K\*的来源较为复 杂,可能受农业活动和工矿企业活动的影响.NO3<sup>-</sup>高 值区主要分布在北部农业用地区,局部地区呈点状 分布,大致呈由南到北递增趋势(图3).表明NO3<sup>-</sup>来 源可能受农业活动的外源输入.此外,H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>大致呈 由东向西呈递增趋势,而pH分布规律不明显,呈点 状分布.



Piper 三线图可以直观地表征地下水水化学组成 及演化特征<sup>[29]</sup>.研究区地下水分布相对较为集中,绝 大部分样品分布在阳离子图和阴离子图的左下部 分,指示地下水水化学形成Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub>-占主导地位, 表明研究区浅层地下水水化学类型主要以HCO<sub>3</sub>-Ca 型为主(图4).

根据舒卡列夫分类法对研究区浅层地下水进行 水化学类型划分.区内建设用地区浅层地下水水化 学主要以HCO<sub>3</sub>-Ca型为主,占37.74%,其次为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca型和HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型,分别占17.92%和 15.09%.农业用地区水化学类型主要以HCO<sub>3</sub>-Ca型 为主,占37.68%,其次为HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型,占21.74%. 林业用地区水化学类型以HCO<sub>3</sub>-Ca型为主,占 33.33%,其次为HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型,占28.57%.综上表 明研究区地下水化学类型主要以HCO<sub>3</sub>-Ca型为主,其 次为HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型.

从水化学类型空间分布来看,研究区西北部一 带出露碳酸盐岩、碎屑岩和侵入岩等岩体,地势 高,地下水径流通畅,地下水交替迅速,水化学类型以HCO<sub>3</sub>-Ca型为主.在研究区中部,受工矿企业等影响,地下水中硫酸根离子增多,形成HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca和SO<sub>4</sub>-Ca型水.南部低丘平原区覆盖第四系松散层,地势较低,地下水径流缓慢,水交替速度较慢,水化学类型以HCO<sub>3</sub>-Ca、HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型为主.

3.3 离子来源分析

3.3.1 相关性分析

相关性分析可以判断地下水水化学组分中的离子是否为同一来源<sup>[30,31]</sup>.建设用地、农业用地和林业 用地浅层地下水中离子具有较为一致的相关性.pH 与离子组分基本呈负相关关系.TDS、TH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>两两之间具有极显著的相关性,其相关系数 大于0.70(P<0.01),最大达0.98(P<0.01)(图5),且 TDS、TH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>具有相对一致的空间分 布(图3).表明上述离子组分可能具有相对一致的来 源,说明 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来源于碳酸盐岩 溶滤<sup>[4]</sup>.



(a)建筑用地,(b)农业用地,(c)林业用地,(d)研究区;\*表示相关系数在0.05水平上显著,\*\*表示相关系数在0.01水平上显著;椭圆长轴方向 表示相关系数的正负,右上-左下方向对应正值,左上-右下方向对应负值,椭圆越扁,对应绝对值较大的相关系数,反之越小;色带表示相关系 数的范围



Fig. 5 Pearson correlation matrix among physicochemical parameters in groundwater

Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 Na<sup>+</sup>两两之间具有明显的相关性, 其相关系数大于 0.50(*P*<0.01)(图 5),最大达 0.80 (*P*<0.01)(图 5),且其空间分布具有一定的相似 性,高值区分布在建设用地和农业用地(图 3).表 明 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 Na<sup>+</sup>可能具有一致的来源,其可能来 源于蒸发岩的溶解或受人类活动影响<sup>[32]</sup>.K<sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与其他组分相关性不明显,K<sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与其余组分具 有不一致的来源,且其高值区位于建设用地和农业 用地(图3),表明 K<sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>来源主要受人类活动 影响<sup>[33]</sup>.

#### 3.3.2 溶滤作用

地下水水化学组分的来源可以通过离子比值关系来确定<sup>[4,34]</sup>. 一般情况下 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>来源于蒸发盐岩溶解、硅酸盐岩溶解、阳离子交换作用和人类

活动输入等<sup>[35]</sup>.利用 N(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)/N(Cl<sup>-</sup>)关系判断地下 水中的 Na<sup>+</sup>与 K<sup>+</sup>的主要来源.当N(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)/N(Cl<sup>-</sup>)=1 时,主要受蒸发盐溶解影响.N(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)/N(Cl<sup>-</sup>)>1 时,可能受硅酸盐溶解和阳离子交换作用影响. N(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)/N(Cl<sup>-</sup>)<1时,可能受人类活动输入导致 Cl<sup>-</sup>增加<sup>[4]</sup>.由研究区浅层地下水N(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)/N(Cl<sup>-</sup>)关 系可知[图6(a)],绝大部分样点位于1:1直线下方, 说明地下水中 Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>除受盐岩溶解外,还受硅酸盐 溶解和阳离子交换作用.此外,建设用地和农业用地 中有部分样点位于1:1直线上方,表明建设用地和农业用地地下水受人类活动影响.

利用 N(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/N(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)关系判断地下水中 Ca<sup>2+</sup>与 Mg<sup>2+</sup>的来源.由研究区浅层地下水 N(Ca<sup>2+</sup>+ Mg<sup>2+</sup>)/N(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)关系可知[图6(b)],绝大部分样点位 于1:1直线下方,说明浅层地下水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>主要 来源于碳酸盐岩溶滤,农业用地和建设用地中有部 分样点处于1:1直线上方,需要 Na<sup>+</sup>来平衡,指示在农 业用地和建设用地部分地下水受硅酸盐岩控制.



利用 N(Ca<sup>2+</sup>)/N(Mg<sup>2+</sup>)关系可确定碳酸盐岩矿物 主要是由白云石还是方解石风化溶解贡献<sup>[33,36]</sup>.由研 究区浅层地下水 N(Ca<sup>2+</sup>)/N(Mg<sup>2+</sup>)关系可知[图6 (c)],几乎所有样点分布在1:1直线与2:1直线之间 以及2:1直线下方,说明浅层地下水中Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>主 要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩溶解,而碳酸盐岩溶 解主要来源于白云石和方解石.研究区几乎所有样 点位于 N(Ca<sup>2+</sup>)/N(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)=1的直线下方[图6(d)],且 无明显的相关性,说明浅层地下水中Ca<sup>2+</sup>受蒸发盐岩 溶解作用不大.

根据N(Cl<sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)/N(HCO<sub>3</sub>)离子当量浓度比值 可识别碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩对地下水化 学组分的贡献率<sup>[4,32]</sup>.由浅层地下水N(Cl<sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)/ N(HCO<sub>3</sub>)关系可知[图6(e)],绝大部分样点落在1:1 直线上方,进一步表明研究区地下水离子组分受蒸 发盐岩溶解作用较小,但仍有少量样点受蒸发盐岩 溶解控制. 利用 N(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/N(HCO<sub>3</sub><sup>-+</sup>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)离子当量浓度 比值可以判断地下水中离子组分是否由蒸发盐岩和 碳酸盐岩控制<sup>[37]</sup>.由浅层地下水 N(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/N (HCO<sub>3</sub><sup>-+</sup>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)关系可知[图6(f)].研究区样点基本落 在1:1直线附近,具有明显的相关性,表明研究区地下 水水化学组分同时受碳酸盐岩和蒸发盐岩溶解控制. **3.4** 控制因素分析

## 3.4.1 控制因素识别

地下水与周围介质之间的水岩相互作用,导致 地下水化学组分发生变化<sup>[10]</sup>,水岩相互作用可以揭 示水化学演化机制<sup>[38,39]</sup>. Gibbs 图可以用来定性判断 大气降雨、岩石风化和蒸发浓缩作用对地下水水化 学组分控制<sup>[40,41]</sup>. 研究区浅层地下水绝大部分样点落 在岩石风化控制区域(图7),说明浅层地下水水化学 组分主要受岩石风化溶解控制,同时建设用地和农 业用地有部分样点向蒸发-浓缩控制区域迁移,说明 浅层地下水组分除受岩石风化溶解控制外,还受到

蒸发浓缩控制.所有地下水取样点均远离降雨控制 区,表明降雨对地下水溶质影响有限.绝大部分水样 点的 $\rho(Na^+)/\rho(Na^++Ca^{2+})$ 和 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^-+HCO_3)$ 小于 0.5(图7),说明研究区浅层地下水中的Ca<sup>2+</sup>相对于 Na<sup>+</sup>、HCO<sub>5</sub>相对于Cl<sup>-</sup>占优势.部分水样点落在

 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3)$ 值大于 0.5 区域,说明浅层地下水可能是受人类活动影响[2].另 外随着 $\rho(Na^+)/\rho(Na^++Ca^{2+})$ 和 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^-+HCO_3)$ 值 的增大,而TDS含量无明显差异,这说明浅层地下水 中存在阳离子交换作用[42].



图中[图8(a)],研究区水样点整体上分布在硅酸

用有关[4].





#### 3.4.2 矿物溶解平衡

用[43].

研究区浅层地下水方解石和白云石的饱和指数 具有显著的相关性,除林业用地有一个样点的方解 石和白云石的饱和指数小于0外,其余样点的饱和指 数均大于0[图9(a)],研究区方解石和白云石基本处

于平衡或饱和状态.这为浅层地下水中阳离子交替 吸附作用提供了条件[5]. 浅层地下水中岩盐的饱和指 数均小于0,说明岩盐处于不饱和状态,仍有溶解的 趋势.大部分地下水的石膏饱和指数大于0,处于饱 和状态,但农业用地和林业用地地下水中具有少量





样点石膏的饱和指数小于0,处于不饱和状态,仍有 溶解的趋势[图9(b)].

硅酸盐和铝硅酸盐是地下水系统中主要含水层 矿物,矿物的溶解-沉淀是控制地下水水化学特征重 要的水文地球化学过程[10].地下水取样井多数为区 内饮用供水井和农田灌溉井,水位埋深小于50m.为 研究地下水系统内硅酸盐和铝硅酸盐矿物间的溶解-沉淀平衡状态,绘制了25℃下硅酸盐体系稳定场 图[44]. 绝大部分样品点落在蒙脱石和高岭土的稳定 线,而远未达到非晶质硅饱和线,表明硅酸盐矿物发 生非全 等溶解 可能发生 长石

和云母等含水介质溶解,水解为高岭石和蒙脱石等 黏土矿物.原生岩石矿物在地下水中未达到饱和,仍 具有溶解能力,可形成次生矿物.在地下水径流过程 中除可水解为高岭石、蒙脱石等黏土矿物外,还同时 产生 K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>和 HCO<sup>-</sup><sub>3</sub>等离子<sup>[10]</sup>. 其反应过 程如下:





#### 3.4.3 阳离子交换作用

阳离子交替吸附作用是指在一定条件下,颗粒 将吸附某些阳离子,而将其原来吸附的部分阳离子 释放到水中,从而改变天然水的水化学组分[45]. 阳离 子交替吸附作用在含水层中广泛地进行,并且深刻 改变地下水的演变过程.离子吸附交替作用通常采 用 N  $\left[ (Na^+ + K^+) - Cl^- \right] 与 N \left[ (Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^2 + Hg^{2+}) \right]$ HCO;)]的毫克当量浓度比值来表征,若发生阳离子 交换作用,则两者的比值一般在-1左右[4].研究区大 部分样品点均表现出负相关性,其相关系数为0.67, 且斜率为-0.98接近-1[图11(a)]. 表明研究区地下 水普遍存在阳离子交替吸附作用.

氯碱指数(CAI-1和CAI-2)可以检验水体中阳离 子交换反应的类型和强度,具体的计算方法见文献 [2]. 若水中 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>置换含水介质中的 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>, 则指数为正值,反之为负值.另外,CAI-1和CAI-2绝





对值越大,阳离子交替吸附作用越易发生<sup>[5]</sup>.研究区 浅层地下水绝大部分样点的CAI-1和CAI-2值小于0 [图11(b)],建设用地和林业用地中部分样点大于0. 表明研究区地下水中的Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>离子置换岩土体 中的Na<sup>+</sup>离子.推测可能为受到了SO<sup>4-</sup>的影响,硫酸 溶解碳酸盐岩使水中Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>浓度增加,使其趋于 饱和,而多余的SO<sup>4-</sup>也需要更多阳离子来平衡,从而 导致Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>不断置换Na<sup>+</sup>离子,这也是Na<sup>+</sup>与SO<sup>4-</sup> 呈正相关关系的原因(图5).且正向阳离子交换作用 主要体现在建设用地长江冲积平原中,从山前倾斜 平原到冲积平原,地层中岩土颗粒逐渐变细,离子交 换越强烈,这也是建设用地区形成高TDS高Na<sup>+</sup>型水 的原因之一.

3.4.4 人类活动作用

人类活动制约着地下水和地表水的水化学演 变,主要表现为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>等离子组分及 浓度含量的变化.SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主要源于矿业活动,Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup>则受到农业活动、生活污水等的影响<sup>[2,12]</sup>. N(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)/N(Ca<sup>2+</sup>)与 N(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)/N(Ca<sup>2+</sup>)的比值关系可以 识别不同人类活动对地下水的影响<sup>[2,12]</sup>,一般情况 下,农业活动则具有较高的 N(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)/N(Ca<sup>2+</sup>)值,而矿 业活动具有较高的 N(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)/N(Ca<sup>2+</sup>)值<sup>[2,30]</sup>. 另外,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup>可作为反映人类活动的特征离子,故常用 N (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)/N(Na<sup>+</sup>)与 N(Cl<sup>-</sup>)/N(Na<sup>+</sup>)来表征人类活动对地 下水硝酸盐组分的影响<sup>[31]</sup>.

根据研究区浅层地下水N(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)/N(Ca<sup>2+</sup>)与 N(NO<sub>3</sub>)/N(Ca<sup>2+</sup>)的关系可知[图12(a)],农业用地浅 层地下水具有较高的N(NO<sub>3</sub>)/N(Ca<sup>2+</sup>)值,指示农业活 动在人类活动中占主导地位,而建设用地浅层地下 水则具有较高的N(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)/N(Ca<sup>2+</sup>)值,表明工矿业活 动在人类活动中占主导地位.从N(NO<sub>3</sub>)/N(Na<sup>+</sup>)与 N(Cl<sup>-</sup>)/N(Na<sup>+</sup>)的关系可见[图12(b)],研究区浅层地 下水样点有向农业活动区域迁移的趋势,表明研究 区地下水同样受农业活动影响制约.



图 12 研究区  $N(SO_4^{-})/N(Ca^+) \subseteq N(NO_3^{-})/N(Ca^+) \oplus N(NO_3^{-})/N(Na^+) \subseteq N(C\Gamma)/N(Na^+) \notin S$ Fig. 12 Relationships of  $N(SO_4^{-})/N(Ca^{2+})$  vs.  $N(NO_3^{-})/N(Ca^{2+})$  and  $N(NO_3^{-})/N(Na^+)$  vs.  $N(C\Gamma)/N(Na^+)$  in the study area

3.5.1 影响因子识别

因子分析在不损失原始数据主要信息的前提下

对数据进行降维,最大限度提高分析结论的准确 性<sup>[46]</sup>.考虑到pH与其他指标相关性较低(图5),故选 取11项水化学指标(TDS、TH、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、

<sup>3.5</sup> 地下水水化学组分来源定量评估

Cl、SO<sub>4</sub><sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub>、NO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)进行因子分析.对数 据进行了KMO-Bartlett球形检验,其显著性水平接近 0,数据满足因子分析的检验标准.根据公共因子特 征值大于1进行提取筛选,旋转方法采用最大方差发 法,计算得到3个主成分因子(F1、F2和F3),累计方 差贡献率达76.579%(表2),基本解释了研究区地下 水水化学的大部分信息.

表 2 研究区水样旋转成分矩阵 Table 2 Rotational composition matrix of water samples

iı	n the study a	rea	
指标	F1	F2	F3
TDS	0.789	0.600	0.096
TH	0.918	0.373	-0.044
$K^{+}$	-0.215	0.203	0.301
$Na^+$	0.259	0.787	0.240
Ca <sup>2+</sup>	0.867	0.395	-0.114
$Mg^{2+}$	0.865	0.252	0.129
Cl	0.173	0.874	0.134
$SO_4^{2-}$	0.269	0.811	-0.157
HCO3	0.960	-0.076	-0.051
NO <sub>3</sub>	-0.064	0.207	0.697
$H_2SiO_3$	0.221	-0.239	0.804
特征值	5.413	1.698	1.313
贡献率/%	37.747	26.409	12.422
累计方差贡献率/%	37.747	64.156	76.579

主成分因子 F1 作为研究区浅层地下水的主控 因素,其因子贡献率为 37.747%,主要载荷为 TDS、 TH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub>.研究区浅层地下水 TDS、 TH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub>具有相似的空间分布(图3), 离子相关关系显示其主要载荷指标两两之间具有极 显著的相关性(图4),说明具有一致的来源.由离子 来源分析可知(图6),地下水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub>主 要来源于碳酸盐岩的风化溶解作用.故 F1 主要反 映了水岩相互作用对地下水化学的影响,可定为地 质因子.

主成分因子 F2的贡献率为26.409%,主要载荷为 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 研究区浅层地下水 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>具

有相似的空间分布,且高值区主要位于安庆市区周边 (图3),且离子变异系数大.Na<sup>+</sup>、CF和SO<sup>2-</sup>两两之间 具有显著的相关性(图4),离子来源分析表明其主要 来源于人类活动(图6).相关研究也表明SO<sup>2-</sup>主要来 自于工业活动、大气沉降以及硫化物(石膏)的溶 解<sup>[20,47]</sup>.研究区为安徽省石化、轻纺和装备制造业等 产业的主要基地,故推测F2主要反映了工业活动下蒸 发盐岩的溶解和阳离子交换作用,可定为工业因子.

主成分因子 F3的贡献率为 12.422%,主要载荷 为 K\*、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.研究区浅层地下水 K<sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的 空间分布大致相似,其高值区主要位于农业用地区 域(图 3).SO<sub>4</sub><sup>2</sup>/Ca<sup>2+</sup>与 NO<sub>3</sub>/Ca<sup>2+</sup>的关系显示农业用地区 浅层地下水受农业活动影响主导.安庆市为典型的 长江冲积平原农业种植区,农田农药化肥的过量施 用将改变浅层地下水水化学组分.相关研究也表明 K<sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub> 主要来源为农业活动中农业和化肥的过量 施用<sup>[4-6]</sup>.另外 K<sup>+</sup>和 H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>也是硅酸盐岩溶解的主要 产物<sup>[5]</sup>.故推测 F3 主要反映了农业活动下硅酸盐溶 滤作用,可定为农业因子.

#### 3.5.2 地下水来源贡献解析

在主成分分析的基础上,利用 APCS-MLR 受体 模型分析各因子对研究区浅层地下水主要离子的贡 献率<sup>[5,21]</sup>.根据 APCS-MLR 受体模型分析结果,建立 了浅层地下水主要离子实测结果与预测结果的线性 函数关系,选取 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>\*</sup>和 HCO<sub>3</sub>绘制了拟合曲线(图 13).线性拟合结果显示除受人类活动影响严重的 K<sup>\*</sup> 和 NO<sub>3</sub> 外,其余指标的 R<sup>2</sup> 值在 0.75 以上,最大可达 0.99(TDS),各水样点的实测值与预测值比值接近 1, 表明 APCS-MLR 受体模型分析研究区浅层地下水水 化学来源的结果可信<sup>[21]</sup>.

根据 APCS-MLR 受体模型计算各因子对研究 区浅层地下水各指标的贡献率结果显示(表 3 和图 14),地质因子(ACPS1)对 TDS、TH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub>的贡献率分别为 68.34%、81.69%、69.36%、



Fig. 13 Relationship between predicted concentration and measured concentration of shallow groundwater in the study area

67.74% 和 89.44%. 对其他指标的贡献较小. 显示 出碳酸盐岩风化溶解水岩相互作用是研究区地下 水形成的主要控制因素. 工业因子(ACPS2)对 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的贡献率分别为30.89%、33.85% 和 25.96%, 对其他指标的贡献率较小. 农业因子 (ACPS3)对K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>的贡献率分别为 37.70%、32.89%、69.38% 和 62.32%, 对其他指标 的贡献较小.

此外, 未知源对 K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>仍有较高的贡献, 其贡献率分别为 31. 32%、 14. 29%、27. 50%、30. 12%、19. 12% 和 17. 35%. 研究

3.03

31.32

5.16

区碳酸盐岩出露较多,部分地下水分布在岩溶地层 中,推测未知源主要为岩溶对研究区浅层地下水的 补给和贡献<sup>[5]</sup>.

整体上,地质因子、工业因子、农业因子和未知 源对研究区浅层地下水的贡献率分别为45.35%、 14.19%、25.38%和15.08%(图14).地质因子主要 是自然因素,故矿物溶滤和水岩相互作用是研究区 地下水形成的主要来源.工业因子和农业因子可视 为人类活动影响因素,两者的贡献率为39.57%,仅次 于水岩相作用影响,说明人类活动也是研究区浅层 地下水水化学演变的驱动因素.

Table 3 Contribution rate of different solute sources of shallow groundwater in the study area/%											
来源	TDS	TH	$K^+$	$Na^+$	Ca <sup>2+</sup>	${\rm Mg}^{2+}$	Cl	$\mathrm{SO}_4^{2-}$	HCO3	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$H_2SiO_3$
地质因子	68.34	81.69	23.69	31.07	69.36	67.74	20.54	26.34	89.44	5.60	15.03
工业因子	16.95	10.84	7.29	30.89	10.31	6.44	33.85	25.96	2.31	5.91	5.31
农业因子	9.47	4.44	37.70	32.89	10.39	11.54	18.11	17.58	5.41	69.38	62.32

9.95

14.29

表3 研究区浅层地下水不同溶质来源贡献率/%



图 14 不同来源对浅层地下水主要离子贡献率



#### 4 结论

未知源

5.23

(1)安庆市浅层地下水 pH 值在 5.84~8.38,均 值为 7.21;ρ(TDS)介于 47~1 620 mg·L<sup>-1</sup>,均值为 324.21 mg·L<sup>-1</sup>.地下水中阳离子以 Ca<sup>2+</sup>和 Na<sup>+</sup>为主,阴 离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主.地下水水化学类型主要以 HCO<sub>3</sub>-Ca型为主,其次为 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型和 SO<sub>4</sub>-Ca型.离子 空间分布异质性较为明显,安庆市区和农田耕作区 域为浓度高值区.

(2)安庆市地下水水化学组分受岩石风化溶滤 作用、阳离子交替吸附作用、矿物溶解和沉淀以及 人类活动综合影响.Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub>-主要来源于碳 酸盐岩和硅酸盐的风化溶解作用,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主 要来源于工业活动和生活污水的影响,K<sup>+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>则主 要受农业活动的影响.建设用地和农业用地区地下 水受人类活动影响更为严重.

(3) APCS-MLR 受体模型分析结果表明, 研究区 浅层地下水水化学组分主要有地质因子、工业因子、 农业因子和未知源这4种来源, 对浅层地下水的贡献 率分别为45.35%、14.19%、25.38%和15.08%. 矿 物溶滤和水岩相互作用是地下水形成的主要来源, 人类活动加剧了浅层地下水水化学的演变.

#### 参考文献:

[1] 魏善明,丁冠涛,袁国霞,等.山东省东汶河沂南地区地下水水化学特征及形成机理[J].地质学报,2021,95(6):

1973-198.

Wei S M, Ding G T, Yuan G X, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yi'nan, East Wenhe River Basin in Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, **95**(6): 1973-1983.

- [2] 刘元晴,周乐,吕琳,等. 牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1429-1439.
  Liu Y Q, Zhou L, Lü L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of pore-water in the middle and upper reaches of Muwen River[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1429-1439.
- [3] 孟舒然,吕敦玉,王翠玲,等.郑州市中牟县地下水水化学特 征及控制因素[J].环境化学,2022,41(3):977-986.
  Meng S R, Lv D Y, Wang C L, et al. Research of groundwater chemical characteristics and controlling factors in Zhongmu County, Zhengzhou City[J]. Environmental Chemistry, 2022,41 (3):977-986.
- [4] 范祖金,魏兴,李佳文,等.重庆市万州区浅层地下水化学特 征及控制因素[J].环境化学,2023,42(1):113-124.
  Fan Z J, Wei X, LI J W, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of shallow groundwater in Wanzhou District, Chongqing [J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (1): 113-124.
- [5] 涂春霖,杨润柏,马一奇,等.黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素[J].环境科学,2023,44(2):740-751.
  Tu C L, Yang R B, Ma Y Q, *et al.* Characteristics and driving factors of hydrochemical evolution in Tuochangiang River Basin, Western Guizhou Province[J]. Environmental Science, 2023, 44 (2): 740-751.
- [6]杨芬,高柏、葛勤,等.信江流域地下水水化学特征及形成机制[J].科学技术与工程,2021,21(9):3505-3512.
  Yang F, Gao B, Ge Q, et al. Hydro-chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Xinfiang River Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(9):3505-3512.
  [7] 崔佳琪,李仙岳,史海滨,等.河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J].环境科学,2020,41(9):4011-4020. Cui J Q, Li X Y, Shi H B, et al. Chemical evolution and formation

mechanism of groundwater in Hetao irrigation area [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4011-4020.

- [8] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. Transactions, American Geophysical Union, 1944, 25(6): 914-928.
- [9] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [10] 刘海,康博,沈军辉.基于反向地球化学模拟的地下水形成作用:以安徽省泗县为例[J].现代地质,2019,33(2): 440-450.

Liu H, Kang B, Shen J H. Formation of groundwater based on inverse geochemical modeling: a case study from the Sixian County, Anhui Province [J]. Geoscience, 2019, **33** (2) : 440-450.

- [11] 刘鑫,向伟,马小军,等.黄土高原中部浅层地下水化学特征 及影响因素[J].中国环境科学,2021,41(11):5201-5209.
  Liu X, Xiang W, Ma X J, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of shallow groundwater in the Chinese Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2021,41(11):5201-5209.
- [12] 李书鉴,韩晓,王文辉,等.无定河流域地表水地下水的水化
   学特征及控制因素[J].环境科学,2022,43(1):220-229.
   LiSJ, Han X, Wang WH, et al. Hydrochemical characteristics

and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River Basin[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 220-229.

- [13] Chen X Q, Zhang H T, Cai Y J. Hydrochemical characteristics and processes of groundwater in the Cenozoic pore aquifer under coal mining [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(12): 33334-33348.
- [14] 丁启振,周金龙,季彦桢,等.石河子-昌吉地区地下水水质 时空变化及污染源解析[J].环境科学,2023,44(3):1440-1451.
   Ding Q Z, Zhou J L, Ji Y Z, et al. Spatial-temporal variation in

groundwater quality and the contamination source analysis in Shihezi-Changji Area[J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1440-1451.

- [15] Qu S, Liang X Y, Liao F, et al. Geochemical fingerprint and spatial pattern of mine water quality in the Shaanxi-Inner Mongolia coal mine base, Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 854, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2022. 158812.
- [16] Hu M Y, Zhou P J, Chen C Q. Hydro-geochemical evolution of groundwater in the central Yangtze River Basin, China [J]. Carbonates and Evaporites, 2023, 38(2), doi: 10.1007/s13146-023-00852-2.
- [17] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋 淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, 39 (6): 2624-2631.
  Kong X L, Wang S Q, Ding F, et al. Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake Area based on hydrochemical and stable isotopes [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2624-2631.
- [18] Chang F J, Huang C W, Cheng S T, et al. Conservation of groundwater from over-exploitation-scientific analyses for groundwater resources management [J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 828-838.
- [19] Zhang H, Cheng S Q, Li H F, et al. Groundwater pollution source identification and apportionment using PMF and PCA-APCA-MLR receptor models in a typical mixed land-use area in Southwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 741, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 140383.
- [20] Cheng G W, Wang M J, Chen Y, et al. Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS -MLR [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42 (11): 3795-3810.
- [21] 后希康,张凯,段平洲,等. 基于 APCS-MLR 模型的沱河流域 污染来源解析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(10): 2350-2357.
  Hou X K, Zhang K, Duan P Z, et al. Pollution source apportionment of Tuohe River based on absolute principal component score-multiple linear regression [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(10): 2350-2357.
- [22] 付蓉洁,辛存林,于奭,等.石期河西南子流域地下水重金属 来源解析及健康风险评价[J].环境科学,2023,44(2): 796-806.
  Fu R J, Xin C L, Yu S, *et al.* Analysis of heavy metal sources in groundwater and assessment of health risks: an example from the southwest sub-basin of the Shiqi River [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 796-806.
- [23] Tao Y Q, Deng Y M, Du Y, et al. Sources and enrichment of phosphorus in groundwater of the central Yangtze River Basin [J].
   Science of the Total Environment, 2020, 737, doi: 10.1016/j. scitotenv. 2020. 139837.
- [24] Zhou J, Du Y, Deng Y M, et al. Source identification of

groundwater phosphorus under different geological settings in the central Yangtze River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2022, **612**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128169.

- [25] Lu T T, Li R Z, Ferrer A S N, et al. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater in Yangtze River Delta of Eastern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(38): 57215-57231.
- [26] 李状,苏晶文,董长春,等.安徽马鞍山市当涂地区地下水水 化学特征及演化机制[J].中国地质,2022,49(5):1509-1526.

Li Z, Su J W, Dong C C, *et al.* Hydrochemistry characteristics and evolution mechanisms of the groundwater in Dangtu Area, Ma'anshan City, Anhui Province[J]. Geology in China, 2022, **49** (5): 1509-1526.

 [27] 郑世达,苏小四,车巧慧,等.长江沿江平原(安庆段)高砷地 下水化学特征与演化研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):796-804.
 Zheng S D, Su X S, Che Q H, et al. Hydrochemistry and evolution

of high arsenic groundwater in the plain along the Changjiang River (Anqing reach)[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, **56**(6): 796-804.

 [28] 侯香梦.安庆市地下水质量评价研究[J].浙江水利水电学院 学报,2016,28(5):34-38.
 Hou X M. Evaluation of shallow groundwater quality in Anqing

[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2016, **28**(5): 34-38.

- [29] 孙厚云, 王晨昇, 卫晓锋, 等. 大兴安岭南段巴音高勒流域水 化学特征及驱动因子[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2507-2519.
   Sun H Y, Wang C S, Wei X F, et al. Hydrochemical characteristics and driving factors in the water of the Bayingaole Basin, southern Great Xing'an range [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(9): 2507-2519.
- [30] 何锦,张幼宽,赵雨晴,等.鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素[J].环境科学,2019,40(3):1236-1244.
   He J, Zhang Y K, Zhao Y Q, et al. Hydrochemical characteristics
  - and possible controls of groundwater in the Xialatuo Basin section of the Xianshui River [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1236-1244.
- [31] Wang S, Chen J, Zhang S X, et al. Hydrochemical evolution characteristics, controlling factors, and high nitrate hazards of shallow groundwater in a typical agricultural area of Nansi Lake Basin, North China [J]. Environmental Research, 2023, 223, doi: 10.1016/j. envres. 2023. 115430.
- [32] 邹嘉文,刘飞,张靖坤.南水北调典型受水区浅层地下水水 化学特征及成因[J].中国环境科学,2022,42(5):2260-2268.

Zou J W, Liu F, Zhang J K. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in typical waterreceiving areas of the South-to-North Water Diversion Project[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(5): 2260-2268.

- [33] 唐金平,张强,胡漾,等. 湔江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3089-3098.
  Tang J P, Zhang Q, Hu Y, et al. Groundwater chemical characteristics and analysis of their controlling factors in an alluvial fan of Jianjiang River[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3089-3098.
- [34] 林聪业, 孙占学, 高柏, 等. 拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(5): 49-58. Lin C Y, Sun Z X, Gao B, *et al.* Hydrochemical characteristics

and formation mechanism of groundwater in Lhasa Area, China [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(5): 49-58.

- [35] 何明霞,张兵,夏文雪,等.天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析[J].环境科学,2021,42(2):776-785.
  He M X, Zhang B, Xia W X, et al. Hydrochemical characteristics and analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin [J]. Environmental Science, 2021,42(2):776-785.
- [36] Guo Y L, Zhang C, Xiao Q, et al. Hydrogeochemical characteristics of a closed karst groundwater basin in North China
   [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, 325 (2): 365-379.
- [37] 刘敏,赵良元,李青云,等.长江源区主要河流水化学特征、 主要离子来源[J].中国环境科学,2021,41(3):1243-1254.
  Liu M, Zhao L Y, Li Q Y, *et al.* Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River
  [J]. China Environmental Science, 2021, 41(3): 1243-1254.
- [38] 魏兴,周金龙,乃尉华,等.新疆喀什三角洲地下水化学特征 及演化规律[J].环境科学,2019,40(9):4042-4051.
  Wei X, Zhou J L, Nai W H, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang
  [J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4042-4051.
- [39] Qu S, Duan L M, Shi Z M, et al. Hydrochemical assessments and driving forces of groundwater quality and potential health risks of sulfate in a coalfield, northern Ordos Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 835, doi: 10.1016/j, scitotenv. 2022.155519.
- [40] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, et al. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 685-697.
- [41] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs diagram[J]. Applied Geochemistry, 2018, 97: 209-212.
- [42] 张春潮、侯新伟,李向全,等.三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制[J].水文地质工程地质,2021,48(3):62-71.
  Zhang C C, Hou X W, Li X Q, et al. Hydrogeochemical

chang C C, Hou X W, Li X Q, et al. Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 62-71.

- [43] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159(1-4): 3-30.
- [44] Tardy Y. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs[J]. Chemical Geology, 1971, 7(4): 253-271.
- [45] Wu Y, Luo Z H, Luo W, et al. Multiple isotope geochemistry and hydrochemical monitoring of karst water in a rapidly urbanized region[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, 218: 44-58.
- [46] 李俊霞,苏春利,谢先军,等. 多元统计方法在地下水环境研究中的应用——以山西大同盆地为例[J]. 地质科技情报,2010,29(6):94-100.
  Li J X, Su C L, Xie X J, et al. Application of multivariate statistical analysis to research the environment of groundwater: a case study at Datong Basin, Northern China [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6):94-100.
- [47] 刘宜鑫,商佳涛,钱会,等.西安主城区地下水化学特征及水质评价[J].环境化学,2022,41(6):1976-1987.
  Liu Y X, Shang J T, Qian H, et al. Groundwater chemical characteristics and water quality evaluation in the main urban area of Xi'an [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(6): 1976-1987.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

### CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, et al.     Life CycleREN Xiao-song, LI Zhao-rui     Hebei Region     SHAO Ying-chao     SHAO Ying-chao	(1233) (1243) (1254)
Assessment of CO <sub>2</sub> Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, et al.	(1265) (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Mediu	m- and Long-term Study ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i>	(1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ver	(1293)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomerations on the 1	IANG Zheng, ZHOU Img-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> Northern Slope of Tianshan Mountains	(1304)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, et al.	(1313)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> in Huaxi District, Guiyang	·····GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, et al.	(1337)
Found on characteristics ; source Apportonment, and meteorological response of water source round in $m_{2.5}$ in Amazag, North China Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM, $\epsilon$ and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	U Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, et al.	(1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	·······PAN Jin-xiu, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, et al.	(1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, et al.	(1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, et al.	(1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the	Middle Keaches of the Yangtze Kiver	(1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Metals in Surface Sediments in Surface Sediment	del	(1402)
	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, et al.	(1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing …	·····ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, et al.	(1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, et al.	(1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Lanal of Tichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Au-tong, et al.	(1448) (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the	Yellow River of Ningxia	(1457)
	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, et al.	(1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	······ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, et al.	(1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, et al.	(1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	ANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, et al.	(1502)
Effects of Land Use Types on water Quality at Different Burler Scales; Hanjin Section of the Haine River Basin as an Example	DAI meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, et al.	(1512) (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	····ZHANG Jin, CHEN Ming-ving, HAO Zhi-neng, et al.	(1529)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie	(1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, et al.	(1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	·······HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, et al.	(1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on	Improved Remote Sensing Ecological Index	(1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	······································	(1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle a	nd Lower Reaches of the Yangtze River	
	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, et al.	(1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	····LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, et al.	(1629)
Effects of Continuous Annual Crop Kotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, et al.	(1644)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages		(1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	G Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, et al.	(1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut	Field	
	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, et al.	(1684)
Effects of Straw Returning and blochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Mitrate Mitrogen Soli After riooding in Rice-ve	getable Rotation System in Tropical China HII Tian-vi, CHE Iia-vue, HII Yu-iie, et al.	(1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	······CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, et al.	(1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, et al.	(1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, et al.	(1724)
Characteristics of Cd Fluxe in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	······YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, et al.	(1739)
Forential Ecological Risk Assessment of Son Heavy Metals in Fengdong New District Dased on Information Dilution Model	XIAO Kai-gi XII Hong-gen GAN lie et al	(1749)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil ···	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, et al.	(1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, et al.	(1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	······YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, et al.	(1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	·····LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing	(1803)
DIOCKING LHCUS OF FOHAT CONDITIONERS ON CAOMIUM, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farm	uanu ·······XIAO Bing, WANG Oiu-shi GAO Pei-nei <i>et al</i>	(1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Mingin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, et al.	(1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, et al.	(1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, et al.	(1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamya aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, et al.	(1849)
biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebratish (1	Janio rerio J Embryos	(1850)
	init Luch nua, Linaito I all, DAU Au-flui, el al.	(1037)