

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘煊武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析

李洲, 李晨曦, 华琨, 李志*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 地下水是黄土塬区的主要水源, 探讨其水化学特征及控制因素对于地下水合理利用和有效管理具有重要意义. 以洛川塬为研究区域, 通过该区 2015~2017 年采集的地下水的阴阳离子测定, 运用 Piper 图、Gibbs 图、相关性分析和正演模型等方法, 对地下水的水化学特征及其控制因素进行了分析. 结果表明: ①地下水为弱碱性低矿化度水, 水化学类型为 Ca-Mg-HCO₃ 型; ②地下水的离子浓度特别是 Na⁺、Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 离子有时空变异, 可能受降水淋溶土壤、阳离子交换和地下水的水平流动等因素影响. ③影响地下水离子浓度的主要因素为碳酸岩和硅酸盐岩风化作用, 其中碳酸盐岩风化平均贡献率介于 47%~85%, 硅酸盐岩风化的贡献率介于 6%~38%. 蒸发岩溶解、人类活动及大气输入的贡献非常小, 平均贡献率均小于 5%. 可见, 深厚的黄土为优质地下水的储存提供了良好的条件, 目前水质仍然受自然因素主导.

关键词: 洛川塬; 地下水; 水化学特征; 溶质来源; 控制因素

中图分类号: X142; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3559-09 DOI: 10.13227/j.hjxk.201809131

Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands

LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, LI Zhi*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Groundwater is of great importance to the loess area, and its hydrochemical characteristics and control factors are of great significance for the utilization and management of groundwater resources. In this study, groundwater hydrochemical characteristics and their controlling factors were analyzed using descriptive statistical analysis, Piper diagrams, Gibbs diagrams, forward derivation modeling, and correlation analysis. The results show that: ① Groundwater is weakly alkaline, has low salinity, and has the water chemical type Ca-Mg-HCO₃; the dominant anions and cations were HCO₃⁻ and Ca²⁺, which accounted for 58% to 59% of the anions and 40% to 80% of the cations, respectively; ② The ion content of the groundwater, particularly the dominant anions and cations, varied, which may have been affected by factors such as precipitation leaching of soil, cation exchange, and the horizontal flow of groundwater; ③ The main factors affecting the ion content of the groundwater are the weathering of carbonate and silicate rock, while the contribution of evaporite dissolution, human activity, and atmospheric input is very small. Carbonate weathering is a dominant source of ions in the groundwater, having an average contribution of 47%-85%, while the contribution of silicate rock weathering is between 6% and 38%. The dissolution of evaporite as a solute source was not important, contributing an average of 3%. Based on these results, it appears that the deep loess provides favorable conditions for the storage of high-quality groundwater, and the existing water quality is dominated by natural factors.

Key words: Luochuan loess tablelands; groundwater; hydro geochemical characteristics; solutes source; controlling factors

黄土高原属中温干旱到半湿润气候区, 由于植被贫乏、水资源短缺和水土流失等问题突出, 近些年来已成为备受关注的热点地区^[1,2]. 洛川塬是黄土高原黄土堆积中心之一, 塬区深厚的土层为地下水储存提供了良好的条件. 地下水是塬区生产和生活的主要水源, 其重要性不言而喻. 20 世纪 80 年代就开展了包气带水分的赋存与运移、潜水补给机制和水资源量等方面的研究工作^[3,4]. 但对水化学方面的研究较少, 尽管从黄土高原大尺度开展了水质的初步评价^[5], 远不能满足水资源管理的要求. 特别是近年来农地大范围转化为果园等, 导致施肥量增加^[6], 入渗可能影响水质; 同时, 开采量不断增加可能影响地下水化学. 因此, 全面有效地分析黄土塬区的水化学特征并甄别其影响因素, 是当前急需开展的工作.

为此, 本研究于 2015~2017 年采集黄土区典型塬区洛川塬不同地点的井水, 测定主要阴阳离子浓度后, 采用描述性统计分析、Piper 三线图、Gibbs 图、相关性分析和正演模型等方法分析其水化学特征的动态变化、影响因素及其溶质来源, 以为黄土塬区合理开发地下水资源提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洛川塬地处黄土高原中部, 是黄土高原黄土堆

收稿日期: 2018-09-16; 修订日期: 2019-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179161); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JZ4001); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放课题项目(K20180601)

作者简介: 李洲(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文学地球化学, E-mail: 15353547583@163.com

* 通信作者, E-mail: lizhibox@126.com

积中心之一,位于东经 $109^{\circ}13' \sim 109^{\circ}45'$, 北纬 $35^{\circ}26' \sim 36^{\circ}04'$, 面积为 $1\ 805\ \text{km}^2$ (图 1). 属于半干旱大陆性气候, 多年平均气温 $8.6 \sim 9.2^{\circ}\text{C}$, 年均降雨量 $600\ \text{mm}$ 左右, 降水集中于 $7 \sim 9$ 月, 占年降水量的 60% 左右, 且以暴雨为主. 洛川塬黄土地层完整, 被第四纪黄土覆盖, 总厚 $120 \sim 150\ \text{m}$, 包括上更新世(马兰黄土, Q_3)、中更新世(离石黄土, Q_2)、下更新世(午城黄土, Q_1)、红黏土(N_2)和中

生界碎屑岩层(T_3)^[7-9]. 黄土层中普遍赋存地下水, 属潜水性, 资源量可达 $3\ 141.8\ \text{m}^3$, 地下水流向从塬块中心部位向周边运动. 塬区黄土潜水水位埋深和富水性主要受塬面宽度控制, 一般在宽度大于 $1.5\ \text{km}$ 的塬块中部水位埋深 $40 \sim 50\ \text{m}$, 单井出水量多在 $100\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 以上, 它们是塬区黄土地下水相对富水地段. 塬区四周被沟谷切割, 塬块间无水力联系, 各自形成独立的水文地质单元^[10].

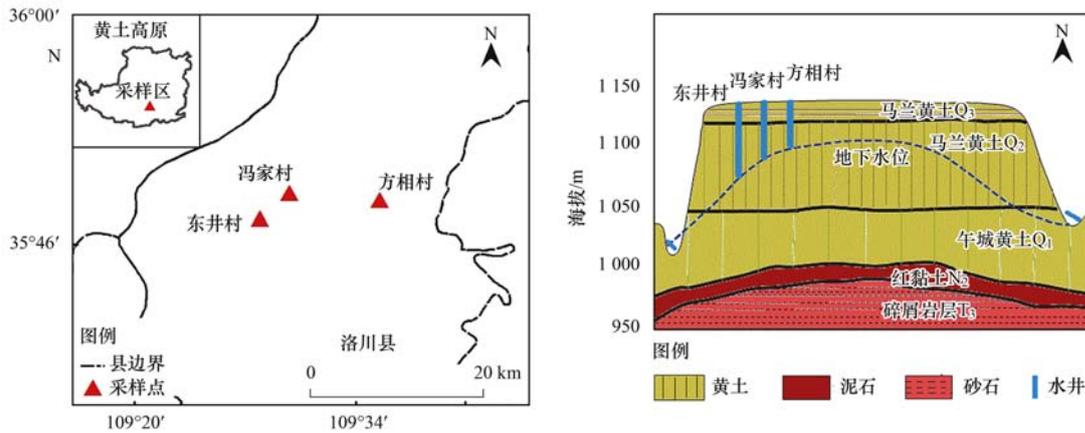


图 1 洛川塬区地理位置、采样点及水文地质剖面示意

Fig. 1 Location of the Luochuan loess-plain region, sampling sites, and the hydrogeological profile

1.2 样品采集与测试

为探究水化学特征的时间和空间差异, 初期对布置在洛川塬不同区域的 8 个井进行采样分析(均属于同一层地下水, 井深 $80 \sim 90\ \text{m}$), 前期的分析表明它们的水化学性质类似, 因此最终自东向西筛选了 3 个离洛川县城不同距离的井进行长期定点采样(2015 ~ 2017 年每月采集一次, 共收集水样 240 个), 分别位于东井村、冯家村和方相村(图 1). 样品瓶提前清洗干净并干燥, 采集水样时, 将取样瓶用水样至少清洗过 3 次. 取地下水时, 让泵运转抽取 $30\ \text{min}$ 才进行取样; 确保样品瓶不含气泡, 盖上盖子后用封口膜封紧. 取样后水样需过 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤膜并装于 $150\ \text{mL}$ 聚乙烯瓶中, 置于 $0 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 温度保存^[11]. 测定样品的阳离子时应提前加适量的超纯硝酸, 将水样酸化到 pH 小于 2, 阴离子直接过滤测定即可.

采用便携式多参数仪(SG78-FK-CN)现场测定水样电导率(EC)和总溶解固体(TDS). 使用等离子体发生光谱仪(ICAP-6300)测定阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}), 检测限为 $1\ \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 采用离子色谱仪(ICS-1100)测定阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-), 检测限为 $1\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 阴阳离子的测定误差一般低于 0.1% . $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 的浓度采用离子平衡法计算得出^[12-14].

1.3 数据分析方法

对地下水水化学参数进行描述性统计分析, 讨论研究区地下水的总体特征和时空分布特征. 基于 Piper 图阐明地下水化学组分的演化过程和水化学类型. 通过 Gibbs 图法^[15, 16]、端元图法^[17]、氯碱指数法和相关性分析^[18]等方法定性探讨影响地下水化学特征的因素, 基于正演模型^[19-21]量化各因素对地下水溶质浓度的贡献.

2 结果与分析

2.1 水化学特征

地下水 TDS 为 $36 \sim 348\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $194\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1). 东井村、冯家村、方相村这 3 个样点的 TDS 均值分别为 193、207 和 $185\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由此可知, 洛川塬区地下水 TDS 值大小: 冯家村 > 东井村 > 方相村. 地下水的总硬度 (TH) 的平均值为 $200\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由此可知, 塬区地下水属于软化淡水. 塬区内地下水的离子浓度均值都呈现 $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 说明塬区内地下水在主要离子浓度上具有一定的相似性. HCO_3^- 占阴离子总量范围为 $70\% \sim 98\%$, Ca^{2+} 占阳离子总量范围为 $40\% \sim 80\%$, 分别为地下水的优势阴、阳离子.

Piper 图表明塬区地下水的水化学类型大体相

表 1 洛川塬区水化学参数统计分析

Table 1 Statistics of groundwater hydrochemical parameters in the Luochuan tablelands

采样点	项目	TDS /mg·L ⁻¹	主要离子浓度/mg·L ⁻¹							
			Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻
东井村	平均值	193	5.7	8.3	5.1	54.7	0.6	16.5	11.5	134.6
	标准差	49	1.5	3.8	1.4	12.2	0.2	2.8	6.9	26.8
	变异系数	0.25	0.26	0.46	0.27	0.22	0.33	0.17	0.6	0.20
冯家村	平均值	207	4.6	9.5	27.6	50.5	0.9	17.7	24.5	141.3
	标准差	43	1.6	2.8	2.9	10.9	0.3	5.3	4.4	28.9
	变异系数	0.21	0.35	0.29	0.11	0.22	0.33	0.30	0.18	0.20
方相村	平均值	185	5.1	6.8	0.6	54.3	2.1	16.8	9.3	138.3
	标准差	58	2.2	4.4	0.2	22.1	2.9	6.0	6.3	56.0
	变异系数	0.31	0.43	0.65	0.33	0.41	1.38	0.36	0.68	0.40

似, 主要为 Ca-Mg-HCO₃ 型(图 2). 此外, 地下水离子分布的重叠性较好, 表明东井村、冯家村和方相村地下水可能受到相似因素的影响^[22].

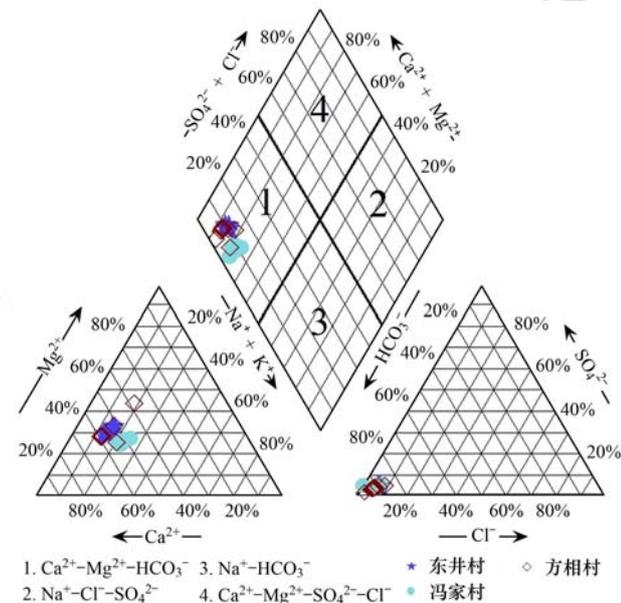


图 2 洛川塬区地下水 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram for the chemical composition of the groundwater in the Luochuan tablelands

2.2 水化学的时空变化特征

3 个监测点 2015 ~ 2017 年多数离子的浓度相对稳定(图 3), 但也有少数离子如 Na⁺、Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 有明显季节差异. 总体上呈汛期升高枯水期下降的趋势, 特别是方相村和冯家村 Na⁺ 浓度分别于 2015 年 12 月和 2017 年 1 月骤降, 同时方相村 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 浓度 2016 年 3 月明显降低, 但 2017 年 7 ~ 8 月 3 个监测点 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 浓度逐渐达到峰值. 空间分布上, 冯家村地下水中钠离子浓度明显高于另外两个监测点, 而其他离子浓度 3 个监测点大体相似.

3 讨论

3.1 水化学类型的主要控制作用

大部分水样都分布在 Gibbs 图内, 说明塬区地下水化学组分受到人为干扰因素较小(图 4). 水样总体上落在岩石风化区的数据较多, 表明岩石风化是水化学组成的主控因素, 而大气降水的直接作用和蒸发浓缩的贡献很小.

采用端元图法进一步探讨岩石风化对水化学的影响, 将水体中离子主要来源分为蒸发岩溶解、硅酸盐岩和碳酸盐岩的化学风化(图 5). 塬区地下水水样主要位于中部和右上角区域, 表明地下水主要受硅酸盐和碳酸盐风化影响.

3.2 离子间的相关性分析

为进一步分析岩石风化对地下水离子浓度的影响, 对各离子浓度进行相关性分析^[23]. 在没有人类活动干扰的情况下, 地下水 HCO₃⁻ 主要来自碳酸盐溶解, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 主要来自蒸发岩溶解, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要来自蒸发岩、碳酸盐和硅酸盐的溶解, 而 Na⁺ 和 K⁺ 主要是蒸发岩和硅酸盐的风化产物^[24].

由表 2 可知, Ca²⁺ 与 HCO₃⁻、Mg²⁺ 与 HCO₃⁻、Mg²⁺ 与 Ca²⁺ 显著相关, 且浓度比值 γ (Ca²⁺ + Mg²⁺)/ γ (SO₄²⁻ + HCO₃⁻) 大于 1 [图 6(b)], 说明碳酸盐岩的风化作用显著. 3 个监测点地下水中 Ca²⁺ 与 HCO₃⁻ 相关性(r 为 0.93 ~ 0.96, $P < 0.01$) 均大于 Mg²⁺ 与 HCO₃⁻ 的相关性(r 为 0.56 ~ 0.78, $P < 0.01$), 表明地下水中 Ca²⁺、Mg²⁺ 与 HCO₃⁻ 主要来自方解石的溶解, 其次为白云石. 相似条件下, 白云石的初始溶解速率只有方解石的 1/3 ~ 1/60, 因此地下水 Ca²⁺ 浓度大于 Mg²⁺ 浓度. 值得注意的是, 冯家村地下水中 TDS 与 Na⁺、K⁺ 均正相关(r 为 0.44 ~ 0.50, $P < 0.05$) 且 γ (K⁺ + Na⁺) 与 γ Cl⁻ 的比值均大于 1 [图 6(a)]; 当蒸发岩溶解是 Na⁺ 和

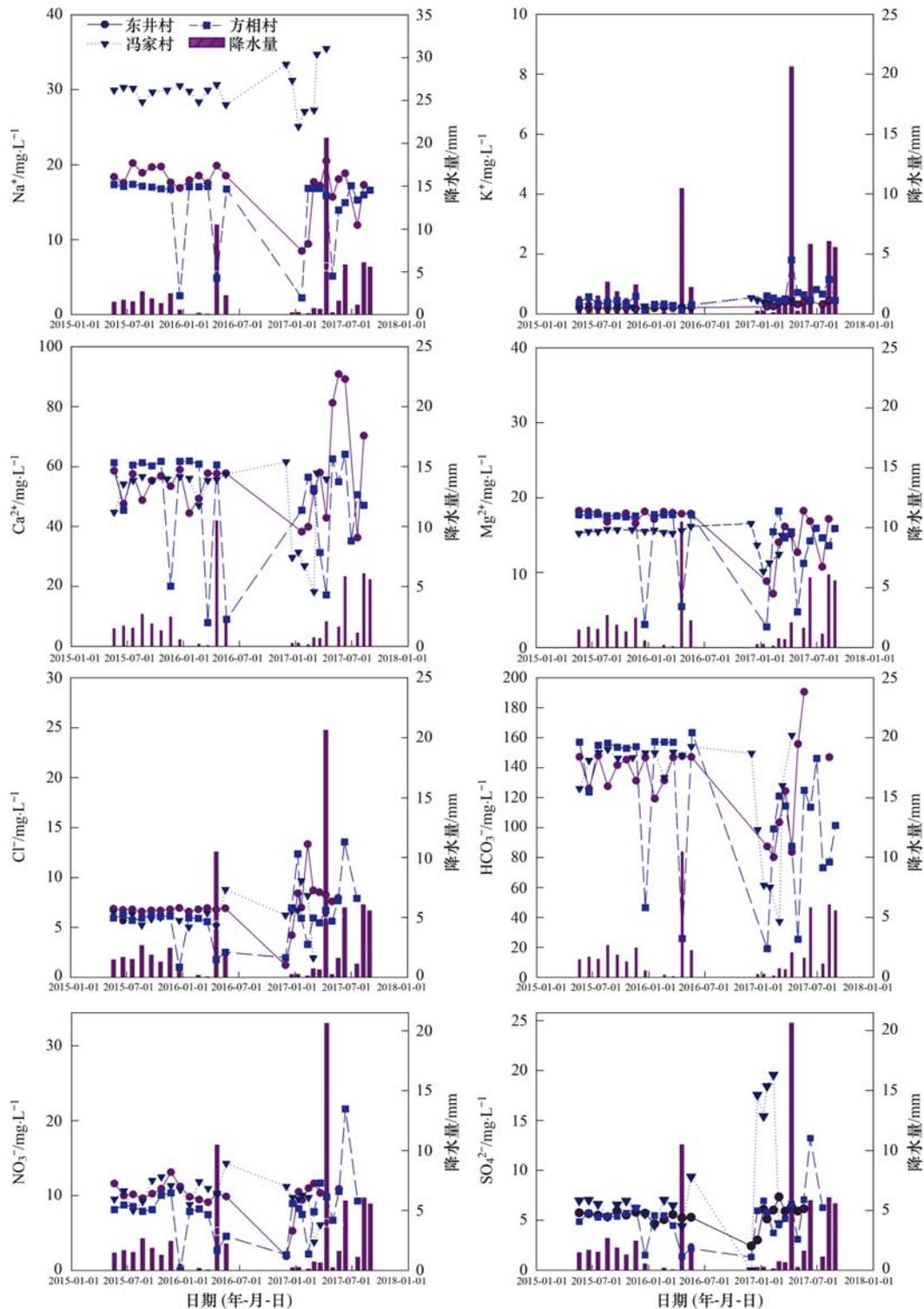


图3 洛川塬区地下水主要离子浓度时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal variations in groundwater hydrochemistry in the Luochuan tablelands

K^+ 的主要来源时, $(K^+ + Na^+)/Cl^-$ 应为 1:1, 可见, 蒸发岩溶解不是塬区地下水 K^+ 和 Na^+ 的主要来源^[25]. 但地下水中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 有一定相关性 (r 为 0.47~0.53, $P < 0.01$), 表明蒸发岩溶解对离子浓度有一定影响. 由于硅酸岩盐风化作用对冯家村地下水离子浓度影响显著, 水样 K^+ 和 Na^+ 可能来源于钠长石和钾硅酸盐岩的风化作用, 因此冯家村

地下水中的 Na^+ 在空间分布上存在一定的差异也就不足为奇.

3.3 不同因素贡献率的定量估算

为进一步量化岩石风化、大气输入和人类活动的贡献, 使用正向推演模型, 利用元素 X (Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+) 的质量守恒公式来计算各来源的贡献^[26~28], 公式如下:

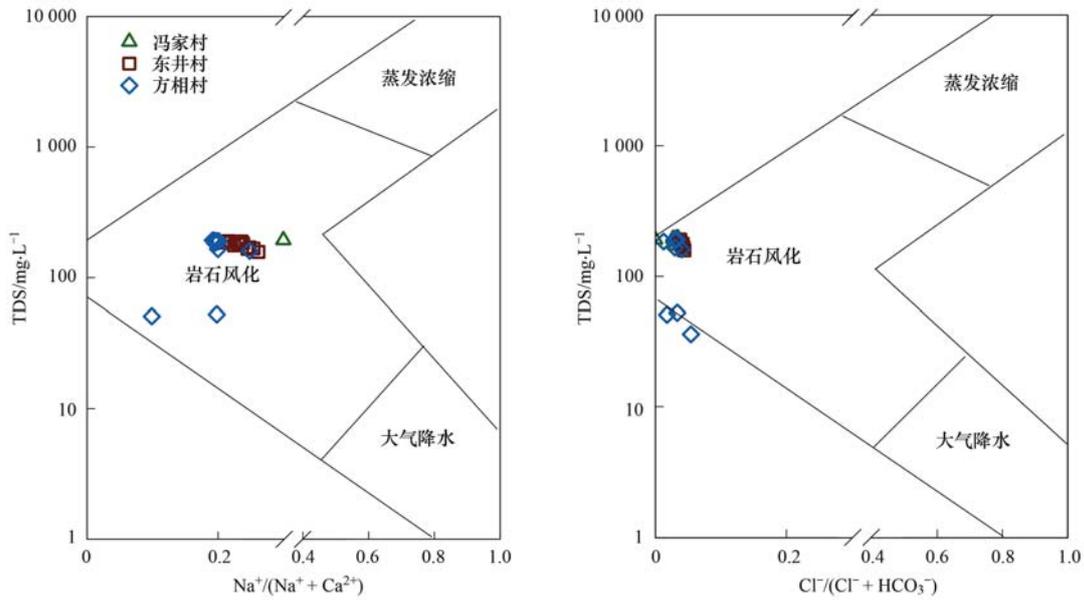


图 4 洛川源区地下水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram for the groundwater in the Luochuan tablelands

表 2 洛川塬地下水水化学参数相关系数分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of groundwater hydrochemical composition in the Luochuan tablelands

东井村地下水									
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	TDS
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	-0.29	1							
SO ₄ ²⁻	0.47 *	0.33	1						
Ca ²⁺	0.29	0.07	0.23	1					
K ⁺	0.46 *	-0.19	0.11	0.42 *	1				
Mg ²⁺	0.41 *	0.51 **	0.55 **	0.48 **	-0.14	1			
Na ⁺	-0.13	0.39 *	0.26	-0.16	0.78 **	0.63 **	1		
HCO ₃ ⁻	0.20	0.10	0.27	0.93 **	0.15	0.69 **	0.18	1	
TDS	0.41 *	0.00	0.18	0.92 **	0.71 **	0.26	-0.50	0.73 **	1

冯家村地下水									
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	TDS
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	0.32	1							
SO ₄ ²⁻	0.53 **	0.20	1						
Ca ²⁺	-0.28	0.04	-0.34	1					
K ⁺	0.22	-0.27	0.25	-0.26	1				
Mg ²⁺	-0.08	-0.37	-0.29	0.30	0.28	1			
Na ⁺	0.06	0.45 *	0.17	0.12	-0.17	-0.78 **	1		
HCO ₃ ⁻	-0.39	-0.18	-0.51 *	0.94 **	-0.13	0.56 **	-0.11	1	
TDS	0.14	0.09	0.26	0.37	0.44 *	-0.05	0.50 *	0.29	1

方相村地下水									
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	TDS
Cl ⁻	1								
NO ₃ ⁻	0.58 **	1							
SO ₄ ²⁻	0.53 **	0.88 **	1						
Ca ²⁺	0.43 **	0.01	-0.00	1					
K ⁺	-0.15	-0.27	-0.24	-0.08	1				
Mg ²⁺	0.52 **	-0.07	-0.11	0.66 **	-0.29	1			
Na ⁺	0.01	-0.08	-0.21	0.48 **	-0.30	0.59 **	1		
HCO ₃ ⁻	0.34	-0.17	-0.19	0.96 **	-0.07	0.78 **	0.62 **	1	
TDS	0.66 **	0.25	0.26	0.90 **	-0.06	0.65 **	0.21	0.82 **	1

1) ** 表示在 0.01 水平上线性相关, * 表示在 0.05 水平上线性相关

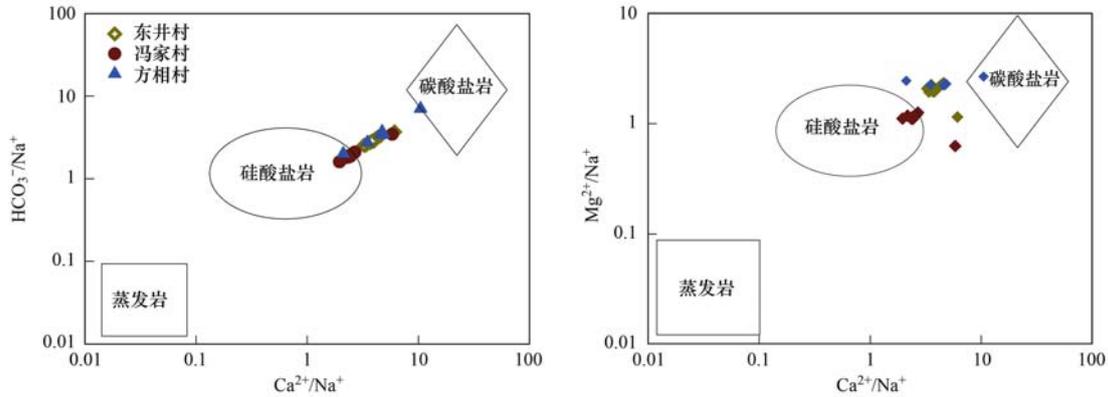


图5 洛川源区地下水 Mg^{2+}/Na^+ 与 Ca^{2+}/Na^+ 、 HCO_3^-/Na^+ 与 Ca^{2+}/Na^+ 的关系

Fig. 5 Plots of Mg^{2+}/Na^+ against Ca^{2+}/Na^+ and HCO_3^-/Na^+ against Ca^{2+}/Na^+ for the groundwater in the Luochuan tablelands

$$[X]_{\text{地下水}} = X_{\text{大气}} + X_{\text{蒸发岩}} + X_{\text{硅酸盐}} + X_{\text{碳酸盐}} + X_{\text{人类活动}} \quad (1)$$

$$[Cl^-]_{\text{大气降水}} = 0.06 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \quad (2)$$

$$[NO_3^-]_{\text{地下水}} = [NO_3^-]_{\text{大气}} + [NO_3^-]_{\text{人类活动}} \quad (3)$$

$$[Na^+]_{\text{地下水}} = [Na^+]_{\text{大气}} + [Na^+]_{\text{人类活动}} + [Na^+]_{\text{硅酸盐岩}} + [Na^+]_{\text{蒸发岩}} \quad (4)$$

$$[K^+]_{\text{地下水}} = [K^+]_{\text{大气}} + [K^+]_{\text{硅酸盐岩}} \quad (5)$$

$$[Ca^{2+}]_{\text{地下水}} = [Ca^{2+}]_{\text{大气}} + [Ca^{2+}]_{\text{碳酸盐岩}} + [Ca^{2+}]_{\text{硅酸盐岩}} + [Ca^{2+}]_{\text{蒸发岩}} \quad (6)$$

$$[Mg^{2+}]_{\text{地下水}} = [Mg^{2+}]_{\text{大气}} + [Mg^{2+}]_{\text{碳酸盐岩}} + [Mg^{2+}]_{\text{硅酸盐岩}} \quad (7)$$

首先本文通过 Noh 等^[29]和 Rai 等^[30]提出的用来计算大气的贡献输入的方法,假定具有最低氯浓度的样品中的氯离子都是大气输入成因的^[31],当样品中最低氯浓度($Cl_{\text{最小值}} = 0.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)大于雨水中氯离子浓度时,可通过下式来计算和校正大气输入的各离子总量:

$$X_{\text{大气}}^* = X_{\text{大气}} \quad (8)$$

$$(X: Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+)$$

$$X_{\text{地下水}}^* = X_{\text{地下水}} - X_{\text{大气}} \quad (9)$$

$$(X: Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+)$$

式中, $X_{\text{大气}}^*$ 表示地下水中 X 的大气校正浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $X_{\text{地下水}}$ 是地下水中 X 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $X_{\text{地下水}}^*$ 表示地下水中 X 的校正浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

计算结果表明,大气输入对地下水离子浓度的贡献率很低,这一量化结果正好与 Gibbs 图得到的结论一致,值得注意的是虽然大气输入的直接作用很小,但是它会通过加速岩石风化速率和溶滤土壤矿物质等途径来间接影响地下水中主要离子浓度,以致其产生季节性波动。

其次,由于人类活动排放污染物的特征是富含 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- ,其中 K^+ 、 Ca^{2+} 、

SO_4^{2-} 、 Cl^- 同时又是岩石风化的产物,所以 NO_3^- 则常作为反映人类活动的特征离子^[19],本文以下主要通过水体中的 NO_3^- 离子浓度来进一步量化人类活动对地下水离子浓度的贡献,计算结果显示人类活动的影响很小,并且从上文中通过分析水化学时空分布特征可知,表征人类活动影响的 NO_3^- 离子浓度的年内年际变化不大且相对稳定,因此人类活动的影响确实可以被忽略。

由于黄河流域内没有证据表明存在有黄铁矿,并且降水中的硫酸也很少,洛川源位于黄河流域中下游,最后根据 Larssen 等^[32]的研究,本文计算蒸发盐贡献时只考虑岩盐和石膏溶解作用。

此外,研究区周边分布有花岗岩,根据 Xiao 等^[33]的研究,黄河上游到下游地区基岩中 Ca^{2+}/Na^+ 平均值在 0.24 ~ 0.31 之间, Mg^{2+}/Na^+ 平均值在 0.35 ~ 0.51 之间。洛川源地处黄河中游地区,可以利用基岩中 Ca^{2+}/Na^+ (0.25), Mg^{2+}/Na^+ (0.4) 来计算硅酸盐岩风化的贡献, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 扣除降水和硅酸盐岩风化的贡献后,剩余的全部来自碳酸盐岩风化。

通过正向推演模型计算得到的结果与相关性分析的结论相互印证,其中碳酸盐岩风化对地下水离子来源起主导作用,平均贡献率大小分别为:方相村(85%) > 东井村(78%) > 冯家村(47%),硅酸盐岩风化对冯家村地下水水化学影响较大,平均贡献率为 38%,蒸发岩的溶解作用对地下水的溶质来源贡献率平均为 3%,影响较小(图 7)。

3.4 阳离子交换吸附作用

洛川源黄土中的黏土矿物相对丰富,这为阳离子交换提供了有利条件。氯碱指数可以被用于研究地下水中是否存在阳离子交换交替吸附作用。通常情况下,当含水层颗粒表面吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与地下水中 Na^+ 、 K^+ 进行阳离子交换作用时,CA I 和

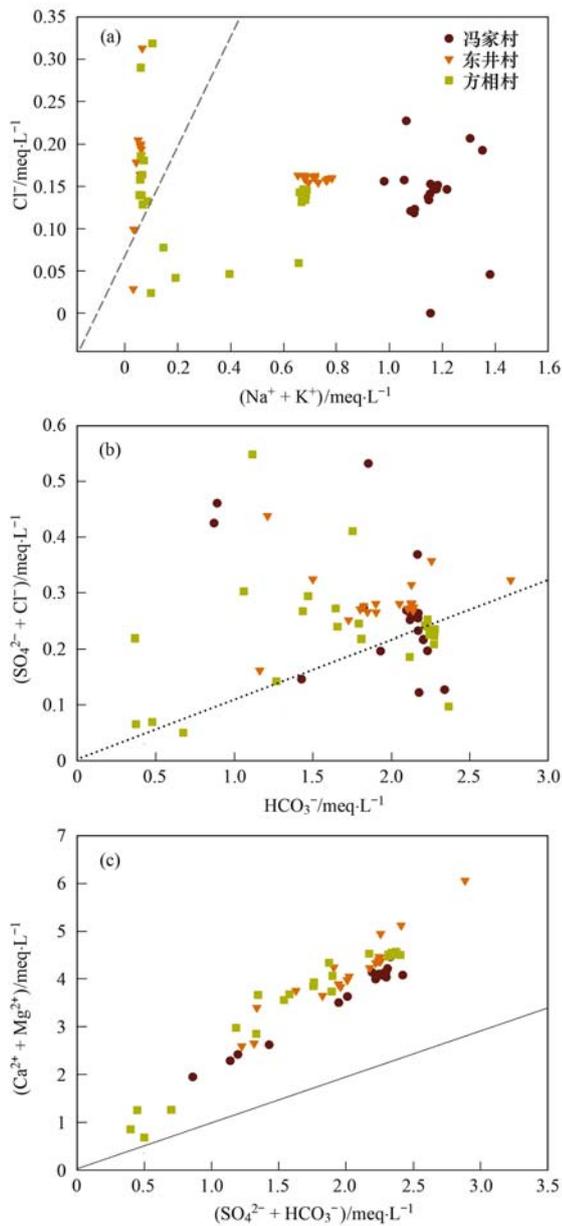


图 6 洛川塬地下水的化学计量

Fig. 6 Stoichiometry plots of the groundwater in the Luochuan tablelands

CA II 均为正; 相应的如果存在反离子交换作用, 其 CA I 和 CA II 值将会为负值^[34].

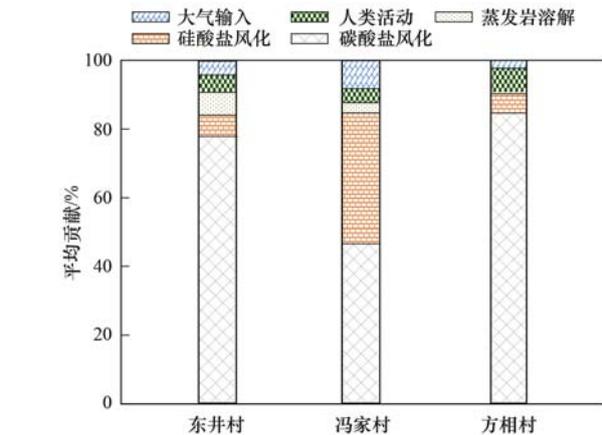
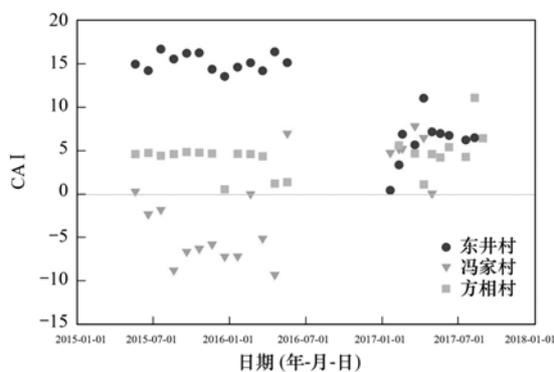


图 7 洛川塬地下水总阳离子的不同端元贡献

Fig. 7 Calculated contributions from the different end members to the total cations in the groundwater in the Luochuan loess tablelands

$$CA I = Cl^- - [(Na^+ + K^+)/Cl^-] \quad (10)$$

$$CA II = Cl^- - [(Na^+ + K^+)/SO_4^{2-}] + HCO_3^- + NO_3^- \quad (11)$$

冯家村地下水的 CA II 值大于 0(图 8), 但是其大部分采样点的 CA I 值小于 0, 说明冯家村地下水除了阳离子交换作用外, 硅酸盐的风化作用导致了 Na⁺ 和 K⁺ 的增加. 东井村和方相村的 CA I 和 CA II 指数均大于 0(图 8), 表明地下水中 Na⁺、K⁺ 和含水层颗粒表面吸附 Ca²⁺、Mg²⁺ 之间发生了阳离子交换, 导致地下水中 Ca²⁺ 的增加、Na⁺ 和 K⁺ 的减少. 综上所述也进一步解释了塬区地下水中阳离子浓度随季节性变化剧烈的原因.

4 结论

通过 2015 ~ 2017 年连续采集和测定黄土区洛川塬地下水的离子浓度, 分析了深厚黄土下地下水的水化学特征及其控制因子. 洛川塬地下水为弱碱性重碳酸型淡水, 矿化度较低, 水质较好, 适合作为生活生产用水. 地下水中离子浓度总体具有时间和空间上的稳定性特征, 仅 Na⁺、Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 的浓度有季节性差异, Na⁺ 略有空间差异, 表明水质

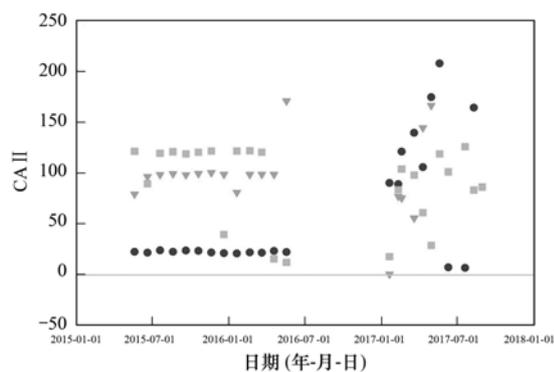


图 8 洛川塬区地下水 CA I 和 CA II 指数

Fig. 8 Groundwater CA I and CA II index for the Luochuan tablelands

具有一定的时空稳定性. 这可能是因为地下水的水化学特征主要受碳酸岩风化(47% ~ 85%)和硅酸岩风化(6% ~ 38%)影响导致的, 而人为干扰及大气输入的贡献非常小. 可见, 洛川黄土塬区地下水的水质仍然受到自然因素主导, 而人类活动影响较小. 因此, 对塬区地下水资源的管理应着重考虑储量和水量的适度开发, 目前尚不需要担心水质的威胁. 但需要注意的是, 本结论仅适合地下水深埋的塬区, 而沟道中的地下水由于受到更多来源的影响, 可能水质状况比较复杂, 仍需进行区域尺度的全面评估.

参考文献:

- [1] 何小武, 刘广全, 郭孟华. 黄土高原植被建设的水资源环境及对策[J]. 水利学报, 2008, **39**(7): 843-847.
He X W, Liu G Q, Guo M H. On water resources environment for vegetation planning in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(7): 843-847.
- [2] Li Z, Chen X, Liu W Z, *et al.* Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers [J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 827-835.
- [3] 王德潜. 洛川黄土潜水补给特征[J]. 水文地质工程地质, 1982, (5): 1-8.
- [4] 阎太白. 洛川黄土地区区域地下水资源及计算方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 1981, (5): 43-46.
- [5] 滕志宏, 张银玲, 胡巍, 等. 黄土高原地下水资源与水质初步评价[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2000, **30**(1): 60-64.
Teng Z H, Zhang Y L, Hu W, *et al.* Water resource and water quality evaluation of underground water in Loess Plateau [J]. Journal of Northwest University (Natural Science), 2000, **30**(1): 60-64.
- [6] 黄亚楠, 李晨曦, 林国伟, 等. 洛川塬土壤水分特征及其对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(6): 106-112.
Huang Y N, Li C X, Lin G W, *et al.* Soil moisture characteristics and their responses to land use change on Luochuan loess tableland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(6): 106-112.
- [7] 李晨曦. 基于环境同位素的洛川塬区地下水补给机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Li C X. Study on groundwater recharge mechanism in luochuan Loess Tableland base on environmental isotope [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [8] Li Z, Lin X Q, Coles A E, *et al.* Catchment-scale surface water-groundwater connectivity on China's loess plateau [J]. CATENA, 2017, **152**: 268-276.
- [9] Huang T M, Yang S, Liu J L, *et al.* How much information can soil solute profiles reveal about groundwater recharge? [J]. Geosciences Journal, 2016, **20**(4): 495-502.
- [10] 王德潜. 洛川塬黄土潜水开采资源的初步探讨[J]. 水文地质工程地质, 1986, (5): 20-23.
- [11] 哈希公司. 水质分析实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [12] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [13] Mitamura O, Seike Y, Kondo K, *et al.* First investigation of ultraoligotrophic alpine lake puma yumco in the pre-himalayas, China [J]. Limnology, 2003, **4**(3): 167-175.
- [14] 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 等. 锡林河流域地表水水化学离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 131-142.
Tang X W, Wu J K, Xue L Y, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the Xilin River basin and the possible controls [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 131-142.
- [15] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process [J]. Science, 1971, **172**(3985): 870-872.
- [16] 杨雪, 胡俊良, 刘劲松, 等. 湖南香花岭矿区地下水的水文地球化学特征及形成机制[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(7): 2575-2585.
Yang X, Hu J L, Liu J S, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Xianghualing mining area, Hunan Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(7): 2575-2585.
- [17] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [18] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4537-4545.
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [19] Galy A, Francelanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 31-60.
- [20] Xu Z F, Liu C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China [J]. Chemical Geology, 2007, **239**(1-2): 83-95.
- [21] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, *et al.* Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: Anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, **72**(17): 4254-4277.
- [22] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 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 Y C, Hua K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [23] 吴起鑫, 韩贵琳, 李富山, 等. 珠江源区南、北盘江丰水期水化学组成特征及来源分析[J]. 环境化学, 2015, **34**(7): 1289-1296.
Wu Q X, Han G L, Li F S, *et al.* Characteristic and source analysis of major ions in Nanpanjiang and Beipanjiang at the upper Pearl River during the wet season [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(7): 1289-1296.
- [24] 罗进, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 赤水河中下游冬季河水化学空间分布特征分析[J]. 地球与环境, 2014, **42**(3): 297-305.
Luo J, An Y L, Wu Q X, *et al.* Spatial distribution of surface water chemical components in the middle and lower reaches of the Chishui River Basin [J]. Earth and Environment, 2014, **42**(3): 297-305.
- [25] Lehn G O, Jacobson A D, Douglas T A, *et al.* Constraining seasonal active layer dynamics and chemical weathering reactions occurring in North Slope Alaskan watersheds with major ion and isotope ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{44/40}\text{Ca}$ and $\delta^{44/42}\text{Ca}$) measurements [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017,

- 217: 399-420.
- [26] Ma H Y. Major ion chemistry of groundwater in the sangong river watershed, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(6): 487.
- [27] Zieliński M, Dopieralska J, Belka Z, *et al.* The strontium isotope budget of the Warta River (Poland): between silicate and carbonate weathering, and anthropogenic pressure[J]. Applied Geochemistry, 2017, **81**: 1-11.
- [28] 李晓强, 韩贵琳, 董爱国, 等. 九龙江丰水期水化学组成特征及其控制因素[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 697-706.
Li X Q, Han G L, Dong A G, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and controlling factors in Jiulong River (Fujian Province) during the flood season [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(3): 697-706.
- [29] Noh H, Huh Y, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the three rivers region of Eastern Tibet [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, **73**(7): 1857-1877.
- [30] Rai S K, Singh S K, Krishnaswami S. Chemical weathering in the plain and peninsular sub-basins of the Ganga: impact on major ion chemistry and elemental fluxes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, **74**(8): 2340-2355.
- [31] Hu G Y, Dong Z B, Lu J, *et al.* Driving forces responsible for aeolian desertification in the source region of the Yangtze River from 1975 to 2005[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **66**(1): 257-263.
- [32] Larssen T, Seep H M, Semb A, *et al.* Acid deposition and its effects in China: an overview [J]. Environmental Science & Policy, 1999, **2**(1): 9-24.
- [33] Xiao J, Zhang F, Jin Z D. Spatial characteristics and controlling factors of chemical weathering of loess in the dry season in the middle Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2016, **30**(25): 4855-4869.
- [34] Liu P, Hoth N, Drebenstedt C, *et al.* Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions - using multivariate statistics and geochemical modeling approaches[J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1-14.



CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i>	(3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian	(3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i>	(3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei	(3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i>	(3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i>	(3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao	(3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i>	(3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i>	(3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i>	(3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i>	(3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i>	(3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i>	(3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i>	(3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian	(3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i>	(3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i>	(3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i>	(3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i>	(3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i>	(3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i>	(3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i>	(3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i>	(3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i>	(3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua	(3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i>	(3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i>	(3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i>	(3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i>	(3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan	(3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i>	(3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i>	(3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i>	(3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i>	(3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo	(3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i>	(3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i>	(3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan	(3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i>	(3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i>	(3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i>	(3840)