

冀东平原地下水中铁离子来源判别分析研究

刘裕^{1,2}, 陆晨明^{1*}, 马荣¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:冀东地区是中国最大的铁矿生产基地, 剧烈的人类活动和地质环境导致浅层地下水中Fe、Mn、Cr、Pb等离子出现不同程度的超标, 尤其是铁离子含量最高可超饮用水标准5~10倍。为定量刻画浅层地下水中重金属离子来源, 2017年5-9月在冀东平原滦河中下游典型区内连续采集5期浅层地下水和土壤样品, 以铁离子为主要研究对象, 运用多元线性回归分析方法, 对其污染来源进行定量分析。研究结果表明: 浅层地下水中Fe³⁺离子来源于上游工矿企业、包气带中Fe³⁺离子的迁移和Fe²⁺离子的转化, 这三种来源在2017年5月对地下水中Fe³⁺离子的贡献率分别为2.29%、41.8%、55.9%; 6月贡献率分别为4.48%、52.58%、42.95%; 7月贡献率分别为9.2%、31.55%、59.25%; 8月贡献率分别为0.04%、31.43%、68.53%; 9月贡献率分别为10.63%、45%、44.37%。研究区内浅层地下水中Fe³⁺离子主要来源于包气带内Fe²⁺离子和Fe³⁺离子的迁移转化, 上游工矿企业对其并无显著影响。

关键词:地下水; 重金属离子; 多元线性回归; 贡献率; 滦河

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1672-4135(2019)02-0135-08

生态兴则文明兴、生态衰则文明衰, 生态环境保护已成为基本国策之一。如何在发展经济的同时, 开展生态环境保护, 为大规模人类活动提供科学建议, 成为水文地质研究人员面临的重要任务之一。冀东地区是中国最大的铁矿生产基地, 截止到2013年底, 累计查明资源储量约80亿t, 其中大型矿床15处^[1], 同时它也是华北平原水、土、气污染最为严重区域之一^[2], 尤其是浅层地下水存在不同程度的重金属离子超标^[3]。传统研究认为冀东地区浅层地下水污染主要由剧烈人类活动所引起的^[4-7], 停止或减少大规模矿山开采是冀东地区防止地下水污染的主要措施。

冀东地区位于华北克拉通东部陆块, 主体属II级构造单元-燕山台褶带, 近东西向, 四周被断裂所截, 南部平原属华北断拗, 中心部位主要由太古宙结晶基底组成, 两翼依次为中-新元古代和古生代沉积, 北翼的中-新元古界位于轴缘拗陷的中心部位, 最大沉积厚度近万米。冀东地区太古宙表壳岩依次划分为曹庄岩组、迁西岩群、遵化岩群、滦县岩群和朱杖子群^[8], 其中迁西岩群和滦县岩群是最重要的铁矿赋矿层位。盖层地层包括中-新元古界、古生界、

中生界和第四系。基岩在物理、化学、生物风化作用的影响下, 导致整个冀东地区第四系松散层内Fe、Cr、Ni、Cu等元素含量明显偏高^[9-11], 这些离子在大气降雨和农业灌溉作用下进入浅层地下水中, 进而对整个地区生态环境造成严重影响。

目前对于冀东地区重金属离子赋存特征、综合评价、在多圈层交互带中的迁移转化进行了大量研究^[2,4,12-14], 但对于地下水中重金属离子, 尤其是Fe离子在长期内的污染来源判别分析研究较少。这主要是因为冀东地区存在大量铁矿石生产基地, 且土壤中Fe离子具有较高的原生背景值, 在大气降雨和农业灌溉作用下土壤层中Fe²⁺离子和Fe³⁺离子通过迁移和转化进入浅层地下水中。更为重要的是, 在不同时期内, 大气降雨和灌溉强度具有显著的时空变化特征, 这导致包气带内Fe离子含量对于浅层地下水中Fe³⁺离子的影响亦具有强烈的时空变异性。多种污染来源、Fe离子不同价态的转化以及强烈的时空变异性, 对浅层地下水中Fe³⁺离子来源判别分析带来一定困难。

基于此, 在冀东平原滦河中下游选择典型研究区, 从2017年5-9月连续采集5期浅层地下水和包

收稿日期: 2019-04-13

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“滦河中下游地球关键带地质调查(DD20160241)”; “冀中南城市群综合地质调查(DD20190252)”

作者简介: 刘裕(1996-), 男, 中国地质大学(北京)工学硕士研究生在读; E-mail: liuyu987yu@163.com; *通讯作者: 陆晨明(1991-), 男, 中国地质科学院水文地质环境地质研究所研究实习生; E-mail: lcm910422@gmail.com。

气带土壤样品,以Fe离子为主要研究对象,通过多元线性回归分析,定量刻画人类活动和包气带内土壤层中Fe离子原生背景值对于浅层地下水中Fe³⁺离子的影响,从而为冀东平原实现生态文明建设与经济发展的共赢发展提供科学依据。

1 研究区概况

滦河流域为冀东地区最主要的河流之一,属于海河流域四大水系之一^[15-16],其起源于河北省丰宁满族自治县西北巴颜屯图尔古山麓,上游闪电河经内蒙古自治区多伦县折向东南,接纳小滦河后始称滦河,中游穿行于燕山山地,下游经过50 km宽的三角洲注入渤海湾^[17]。全长约887 km,流域面积44 750 km²,其中山区占98%,平原占2%。研究区位于滦河中下游,地理坐标118°48'~119°00'E,39°30'~39°38'

N,面积约200 km²,区域内地势平坦,交通便利,北部和东北部有多个大型炼铁厂(图1)。研究区属暖温带湿润-半湿润大陆季风性气候区,气候温和,年平均气温12.5℃,年降水500~750 mm,蒸发量1 500~1 800 mm,种植作物主要为冬小麦、夏玉米。第四系松散含水层是区内工农业及生活用水的主要开采层,自上而下可分为4个含水层组,第I含水层组底界埋深10~30 m,位于地表及浅部地段,直接接受大气降水补给和蒸发排泄,水循环条件好,为垂直强烈循环交替带,是区域内主要农业灌溉和生活水源,也是本次研究的主要目标层;第II含水层组底界埋深40~200 m,间接接受大气降水补给,水循环条件较好,为较强烈循环交替带,是整个滦河流域下游区域主要的工业开采层;第III含水层组底界埋深60~420 m,地下水具承压性,径流条件较差,为较差

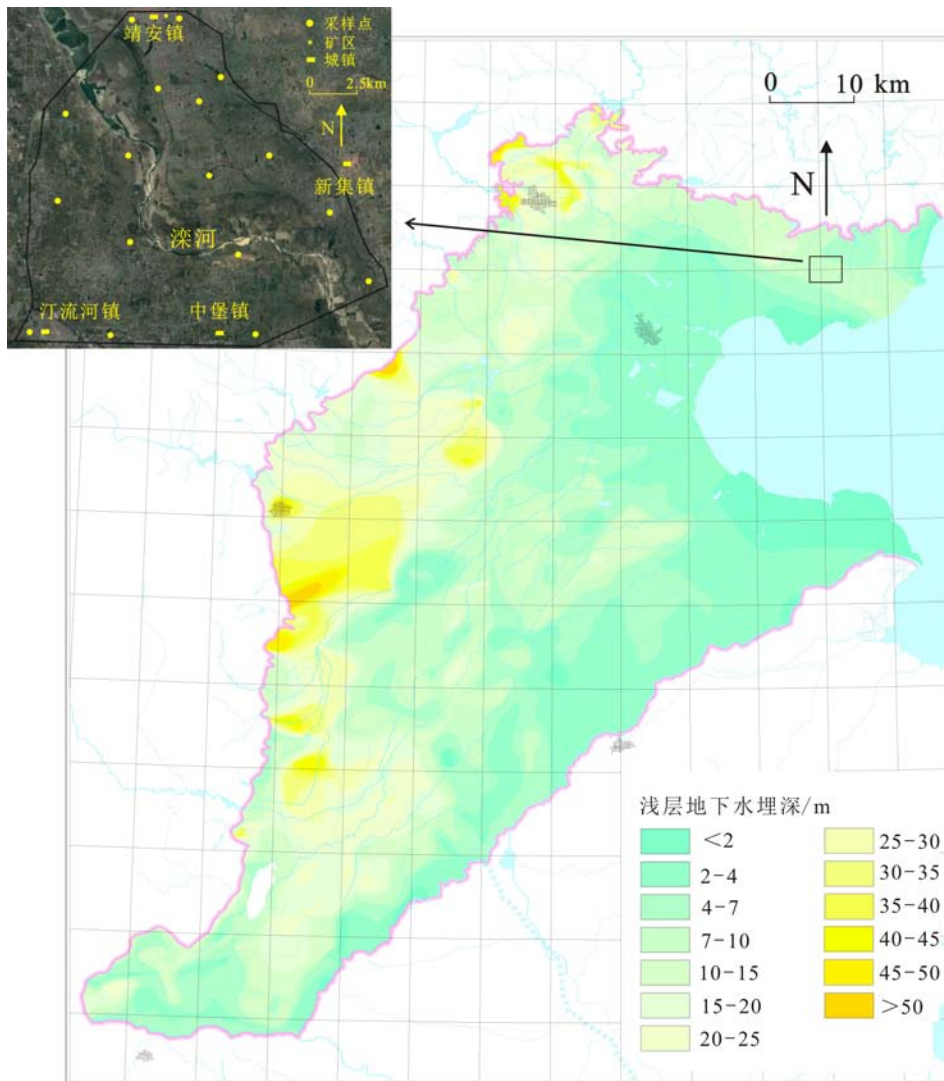


图1 研究区及采样分布图

Fig.1 Study area and sampling locations

循环带;第IV含水层组底界埋深350~550 m,地下水具承压性,径流条件差,为弱循环带^[18-21]。

2 样品采集与测试

在研究区内布置17个采样点(图1),从2017年5—9月每月中旬连续采集5期地下水样品,人工量测浅层地下水位埋深,查明地下水动力学场和化学场。同时在每个采样点处利用浅层土壤钻,揭穿该地下水取样点处包气带,由浅至深等间隔取6个土壤样品。至此每期取17组浅层地下水样品和102组土壤样品,从2017年5—9月共采集85组浅层地下水样品和510组土壤样品,并对其进行化学组分测试分析。地下水化学样品由中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试中心完成,土壤地球化学样品由河南省岩石矿物测试中心完成。

3 浅层地下水 Fe 离子来源判别分析

3.1 浅层地下水化学离子统计特征分析

对研究区采集的5期85组浅层地下水样品,进行微量元素含量测试分析,绘制滦河中下游地区不同水化学离子的时空变异图(图2)。

图2显示了滦河中下游地区不同水化学离子在2017年5—9月的时空变化特征,浅层地下水化学离子在不同时期具有较强的时空变异性,尤以Fe、Fe³⁺离子为甚。Fe³⁺离子含量最大值可达15 mg/L,Fe离子含量最大值可达30.33 mg/L,超过饮用水标准的10倍。TDS(溶解性总固体)的含量随着时间逐渐减少,Mn、Sr、Ba离子含量和pH值大小随着时间没有显著的变化,pH值变化范围为7.6~7.8。Fe²⁺离子含量甚微,虽有变化,可以忽略不计。因此,在研究中不考虑浅层地下水中Fe²⁺离子的影响。

3.2 土壤地球化学组分统计特征分析

对所采集的不同时期不同深度510组包气带土壤样品进行FeO和Fe₂O₃含量测试分析,绘制了不同时期不同深度FeO和Fe₂O₃含量的变化图(图3,图4)。

图3显示了不同时期不同深度FeO含量的变化特征。从同一时期来看,FeO的含量随深度主要表现出两种趋势,一是变化不显著,在一定范围内波动;二是先下降再上升。从同一深度来看,FeO的含量随时间呈现出较稳定的变化趋势。总的来说,不同时期不同深度FeO的含量具有明显变化。

图4显示了不同时期不同深度Fe₂O₃的含量变化

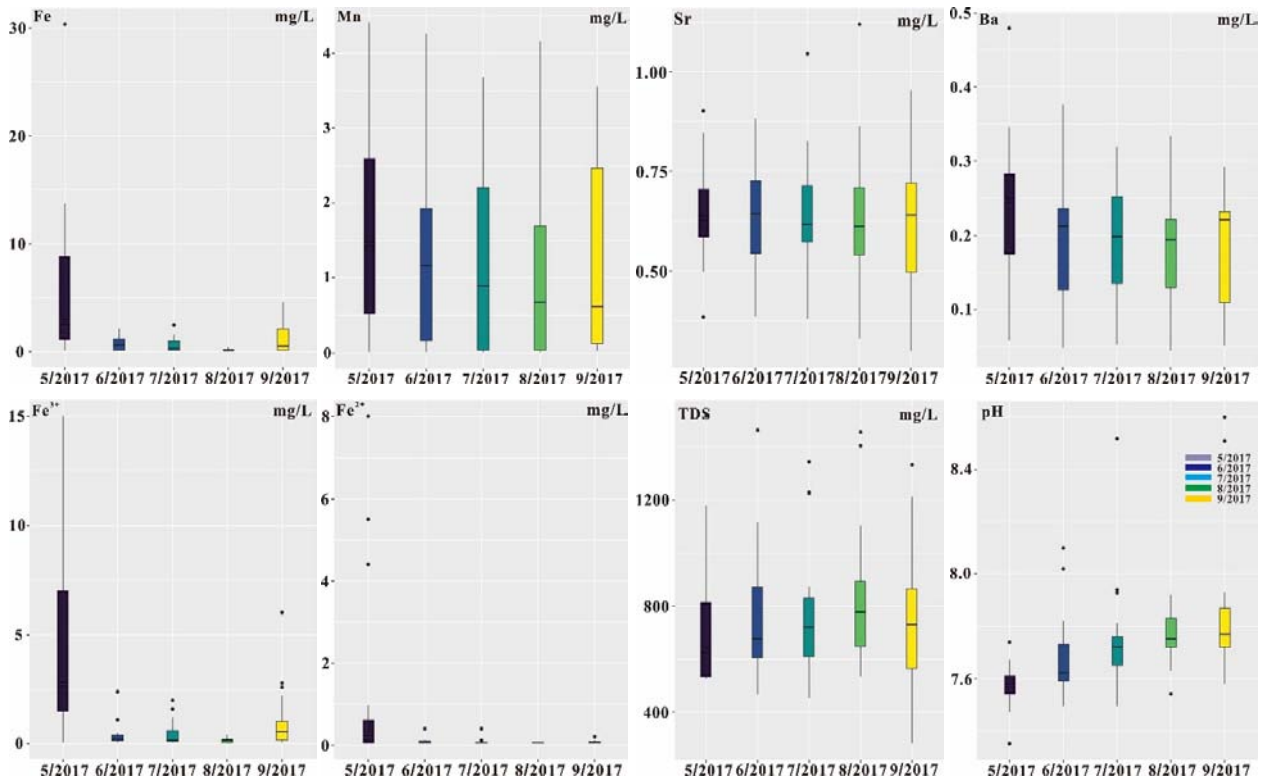


图2 不同水化学离子的时空变异图

Fig.2 Spatial and temporal variation of different hydrochemical ions

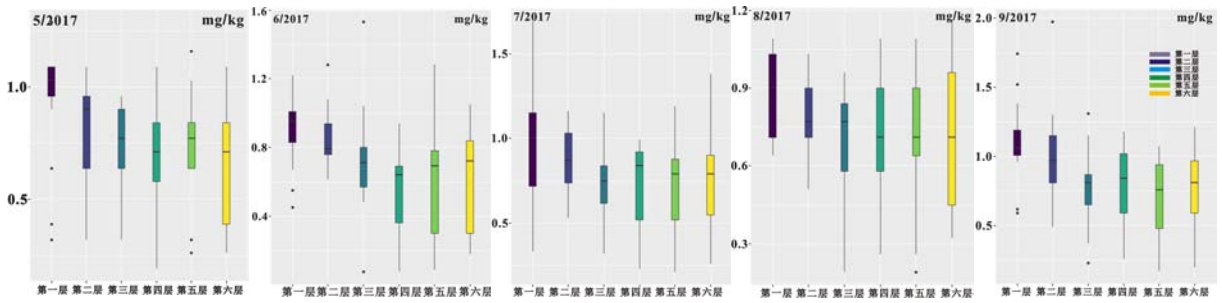


图3 不同时期不同深度FeO含量变化特征

Fig.3 Variation characteristics of FeO content at different depths in different periods

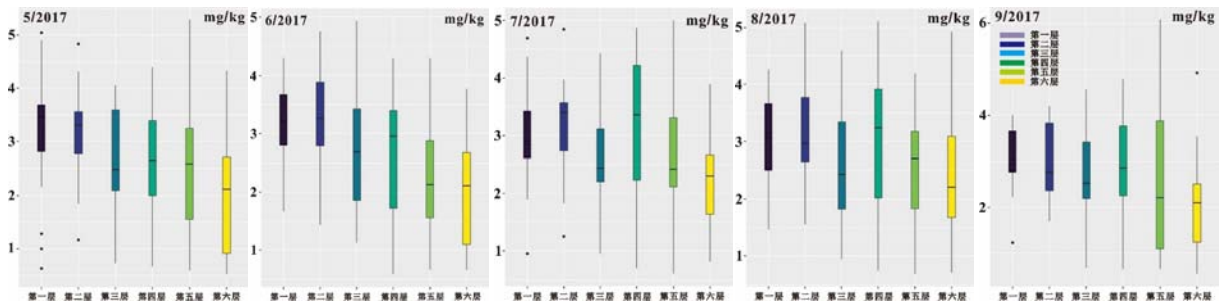


图4 不同时期不同深度Fe₂O₃含量变化特征

Fig.4 Variation characteristics of Fe₂O₃ content at different depths in different periods

特征。从同一时期来看,Fe₂O₃的含量随深度变化较为显著,含量的波动幅度较大。从同一深度来看,Fe₂O₃的含量随时间呈现出比较明显的变化趋势,含量的波动幅度不是很大,在较小的范围内变化。总的来说,不同时期不同深度Fe₂O₃的含量具有显著变化。

3.3 水化学离子与地下水位相关性分析

在人类活动的影响下,各离子随地下水由上游汇集至排泄区,研究区内地势平坦,浅层地下水位埋深即可代表该区域内地下水径流特征,通过浅层地下水位埋深与各离子的相关性,来定性刻画各离子随地下水流的运移特征。

表1表明地下水位埋深与水化学离子具有显著的相关性,其中地下水位埋深与水化学离子TDS和Sr离子具有负相关性,表明沿地下水的流向,上述离子浓度呈逐渐递减趋势,Fe、Mn、Ba、Fe³⁺离子与地下水位埋深呈正相关性,这表明其随着地下水流向逐渐富集。

浅层地下水中Fe³⁺离子空间分布特征图(图5)表明,在随着地下水流动的过程中,Fe³⁺离子从上游至下游逐渐富集,靖安镇和新集镇铁矿厂并未对浅层地下水化学场产生重要影响。仅在2017年6月和8月,在靖安镇附近Fe³⁺离子含量较高,但其扩散范围较小,对于下游地下水中Fe³⁺离子含量影响较小。上

图表明在整个研究区浅层地下水内,Fe³⁺离子随地下水流向逐渐富集,且上游大型工矿企业对其并无显著影响。浅层地下水中较高的Fe³⁺离子主要来源于包气带内Fe离子的迁移和转化。

3.4 地下水三价铁离子与土壤中铁离子相关性分析

值得注意的是,浅层地下水中Fe³⁺离子除来自于上游外,研究区内土壤中Fe离子在降雨和农业灌溉的影响下,亦会对浅层地下水中Fe³⁺离子浓度产生重要影响。基于以上考虑,笔者对不同时期浅层地下水中Fe³⁺离子与不同深度土壤中Fe离子含量进行了相关性分析。

研究区不同时期浅层地下水中Fe³⁺离子与不同深度土壤层中Fe²⁺离子和Fe³⁺离子的相关性分析结果(表2)表明,浅层地下水中Fe³⁺离子在不同时期与土

表1 浅层地下水位埋深与离子相关性

Tab.1 The correlation between the shallow groundwater table and ions

水化学离子	浅层地下水位埋深				
	5/2017	6/2017	7/2017	8/2017	9/2017
TDS	-0.434	-0.332	-0.417	-0.559	-0.416
Fe	0.337	0.34	0.496	0.521	0.52
Mn	0.327	0.394	0.461	0.558	0.412
Sr	-0.091	-0.352	-0.347	-0.415	-0.408
Ba	0.545	0.349	0.47	0.584	0.47
Fe ³⁺	0.556	-0.025	0.523	0.495	0.533
Fe ²⁺	0.244	0.076	-0.036	0.011	0.199
pH	0.265	-0.113	-0.313	-0.041	0.084

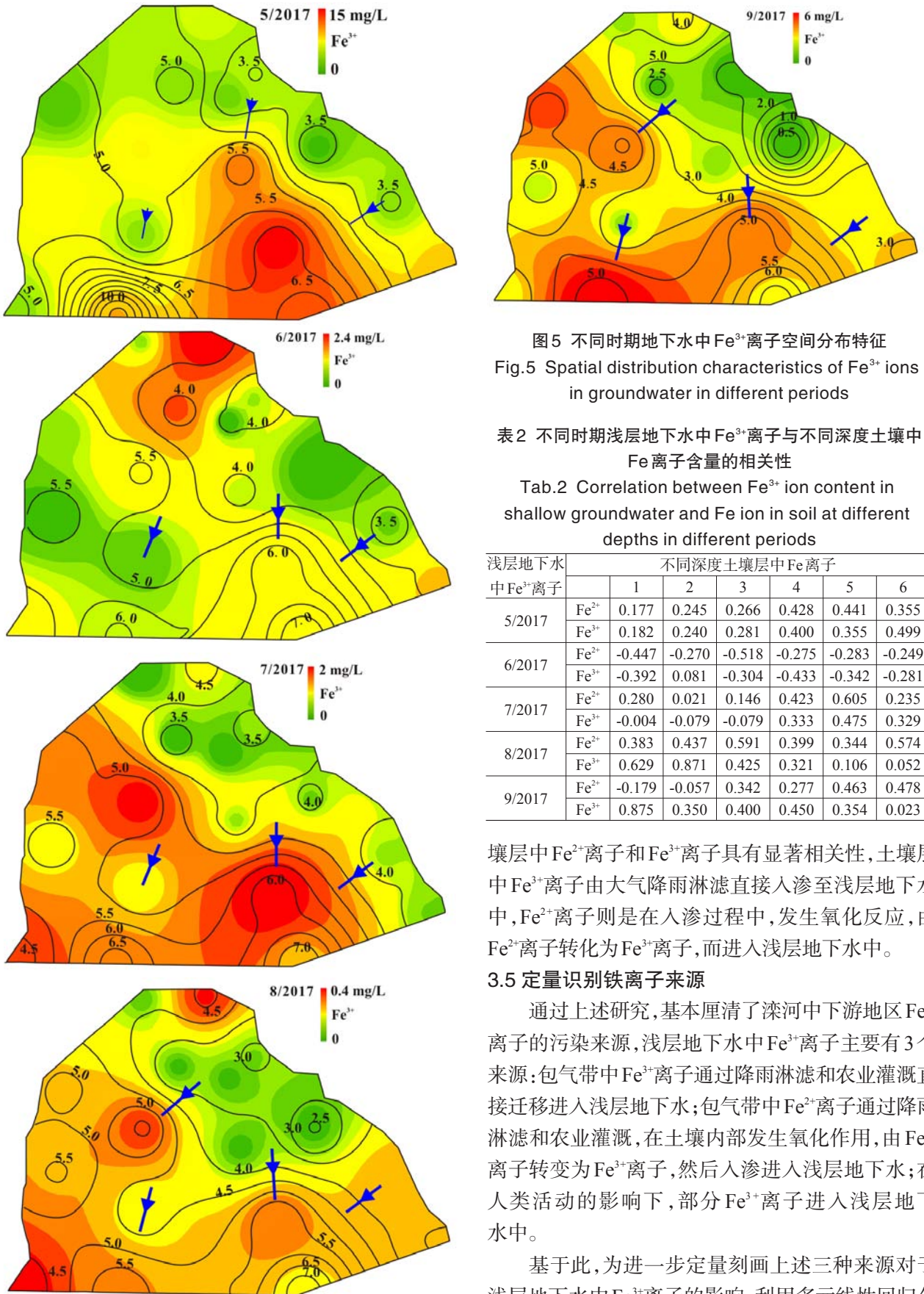


图5 不同时期地下水中Fe³⁺离子空间分布特征
Fig.5 Spatial distribution characteristics of Fe³⁺ ions in groundwater in different periods

表2 不同时期浅层地下水中Fe³⁺离子与不同深度土壤中Fe离子含量的相关性

Tab.2 Correlation between Fe³⁺ ion content in shallow groundwater and Fe ion in soil at different depths in different periods

浅层地下水中Fe ³⁺ 离子	不同深度土壤层中Fe离子						
	1	2	3	4	5	6	
5/2017	Fe ²⁺	0.177	0.245	0.266	0.428	0.441	0.355
	Fe ³⁺	0.182	0.240	0.281	0.400	0.355	0.499
6/2017	Fe ²⁺	-0.447	-0.270	-0.518	-0.275	-0.283	-0.249
	Fe ³⁺	-0.392	0.081	-0.304	-0.433	-0.342	-0.281
7/2017	Fe ²⁺	0.280	0.021	0.146	0.423	0.605	0.235
	Fe ³⁺	-0.004	-0.079	-0.079	0.333	0.475	0.329
8/2017	Fe ²⁺	0.383	0.437	0.591	0.399	0.344	0.574
	Fe ³⁺	0.629	0.871	0.425	0.321	0.106	0.052
9/2017	Fe ²⁺	-0.179	-0.057	0.342	0.277	0.463	0.478
	Fe ³⁺	0.875	0.350	0.400	0.450	0.354	0.023

壤层中Fe²⁺离子和Fe³⁺离子具有显著相关性,土壤层中Fe³⁺离子由大气降雨淋滤直接入渗至浅层地下水中,Fe²⁺离子则是在入渗过程中,发生氧化反应,由Fe²⁺离子转化为Fe³⁺离子,而进入浅层地下水中。

3.5 定量识别铁离子来源

通过上述研究,基本厘清了滦河中下游地区Fe³⁺离子的污染来源,浅层地下水中Fe³⁺离子主要有3个来源:包气带中Fe³⁺离子通过降雨淋滤和农业灌溉直接迁移进入浅层地下水;包气带中Fe²⁺离子通过降雨淋滤和农业灌溉,在土壤内部发生氧化作用,由Fe²⁺离子转变为Fe³⁺离子,然后入渗进入浅层地下水;在人类活动的影响下,部分Fe³⁺离子进入浅层地下水中。

基于此,为进一步定量刻画上述三种来源对于浅层地下水中Fe³⁺离子的影响,利用多元线性回归分

析方法定量识别出不同时期浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的主要来源。

根据公式(1)计算出的每一期不同深度土壤层

$$Y=a_1X_1+a_2X_2+a_3X_3+a_4X_4+a_5X_5+a_6X_6+a_7X_7+a_8X_8+a_9X_9+a_{10}X_{10}+a_{11}X_{11}+a_{12}X_{12}+a_{13}X_{13} \quad (1)$$

$$g_i = \frac{|a_i|}{|a_1| + |a_2| + |a_3| + |a_4| + |a_5| + |a_6| + |a_7| + |a_8| + |a_9| + |a_{10}| + |a_{11}| + |a_{12}| + |a_{13}|} \quad (2)$$

式中Y表示浅层地下水中 Fe^{3+} 的含量; $X_1 - X_6$ 分别代表1-6层包气带中 Fe^{2+} 离子的含量; $X_7 - X_{12}$ 分别代表1-6层包气带中 Fe^{3+} 离子的含量; X_{13} 代表人类活动, $a_1 - a_{13}$ 分别代表上述变量的回归系数。

至此求得不同时期不同深度土壤层中 Fe^{2+} 离子、 Fe^{3+} 离子以及人类活动对浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的贡献率(图6)。

从研究区不同时期不同深度土壤层中 Fe^{2+} 离子、 Fe^{3+} 离子以及人类活动对浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的贡献率(图6)可以看出,不同时期不同深度土壤内部 Fe^{2+} 离子对浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的贡献率不一样,第一期第三层土壤中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大,达到0.194 2。第二期第一层土壤中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大,达0.1781。第三期第四层土壤中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大,达到0.252 2。第四期第五层土壤中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大,达到0.232 9。第五期第三层土壤中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大,达到0.174 9。总的来说,土壤内部 Fe^{2+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率最大的为第三期第四层土壤。同样的,第一期第三层土壤中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大为0.172 5。第二期第二层土壤中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的贡献率最大为0.151 3。第三期第六层土壤中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大为0.093 7。第四期第二层土壤中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大为0.168 6。第五期第三层土壤中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大为0.248 9。总的来说,土壤内部 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率最大的为第五期第三层土壤。对于人类活动而言,第五期人类活动对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率最大为0.106 3。

由图6可以看出,在降雨淋滤作用下,土壤层中 Fe^{2+} 离子和 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子产生了重要的影响,值得注意的是,土壤层中 Fe^{3+} 离子通过降

雨淋滤直接入渗至浅层地下水中,而 Fe^{2+} 离子则需要土壤内部发生氧化作用,由 Fe^{2+} 离子氧化至 Fe^{3+} 离子,然后入渗进入浅层地下水中,其过程较为复杂,降雨淋滤作用使得土壤层中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水中 Fe^{3+} 离子产生的直接影响不是十分显著。基于以上考虑,绘制了不同时期不同深度土壤层中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率随降雨量变化的关系图(图7)。

中 Fe^{2+} 离子、 Fe^{3+} 离子以及人类活动与浅层地下水 Fe^{3+} 离子之间的回归系数,再利用公式(2)计算上述每个变量对于浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的贡献率。

雨淋滤直接入渗至浅层地下水中,而 Fe^{2+} 离子则需要土壤内部发生氧化作用,由 Fe^{2+} 离子氧化至 Fe^{3+} 离子,然后入渗进入浅层地下水中,其过程较为复杂,降雨淋滤作用使得土壤层中 Fe^{2+} 离子对浅层地下水中 Fe^{3+} 离子产生的直接影响不是十分显著。基于以上考虑,绘制了不同时期不同深度土壤层中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率随降雨量变化的关系图(图7)。

由图7可以看出:第一层包气带中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率与降雨量的变化基本吻合;第二层中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率与降雨量的变化在局部出现较大波动,整体来讲仍具有相同的变化趋势;第三层至第六层中 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子贡献率与降雨量的变化不相吻合。这表明浅层包气带中 Fe^{3+} 离子的迁移更易受大气降雨的影响,随深度的增加,其对于深层 Fe^{3+} 离子迁移转化的影响逐渐降低,这与我们传统认识也是相一致的。

4 结论

通过对冀东地区滦河中下游内浅层地下水样品和包气带内土壤样品化学组分的长期监测,对于研究区水、土化学环境演化特征等有明确认识,在此基础上进一步定量刻画浅层地下水中 Fe^{3+} 离子的主要来源。

(1)浅层地下水中 Fe^{3+} 离子主要有3个来源:1)包气带中 Fe^{3+} 离子通过降雨淋滤和农业灌溉直接迁移进入浅层地下水;2)包气带中 Fe^{2+} 离子通过降雨淋滤和农业灌溉,在土壤内部发生氧化作用,由 Fe^{2+} 离子氧化至 Fe^{3+} 离子,然后入渗进入浅层地下水;3)在人类活动的影响下,部分 Fe^{3+} 离子进入浅层地下水中。

(2)对比土壤内部 Fe^{2+} 离子与 Fe^{3+} 离子对浅层地下水 Fe^{3+} 离子的贡献率,土壤内部 Fe^{2+} 离子比 Fe^{3+} 离子的贡献率大,也即浅层地下水 Fe^{3+} 离子主要来自于土壤层中 Fe^{2+} 离子的氧化。

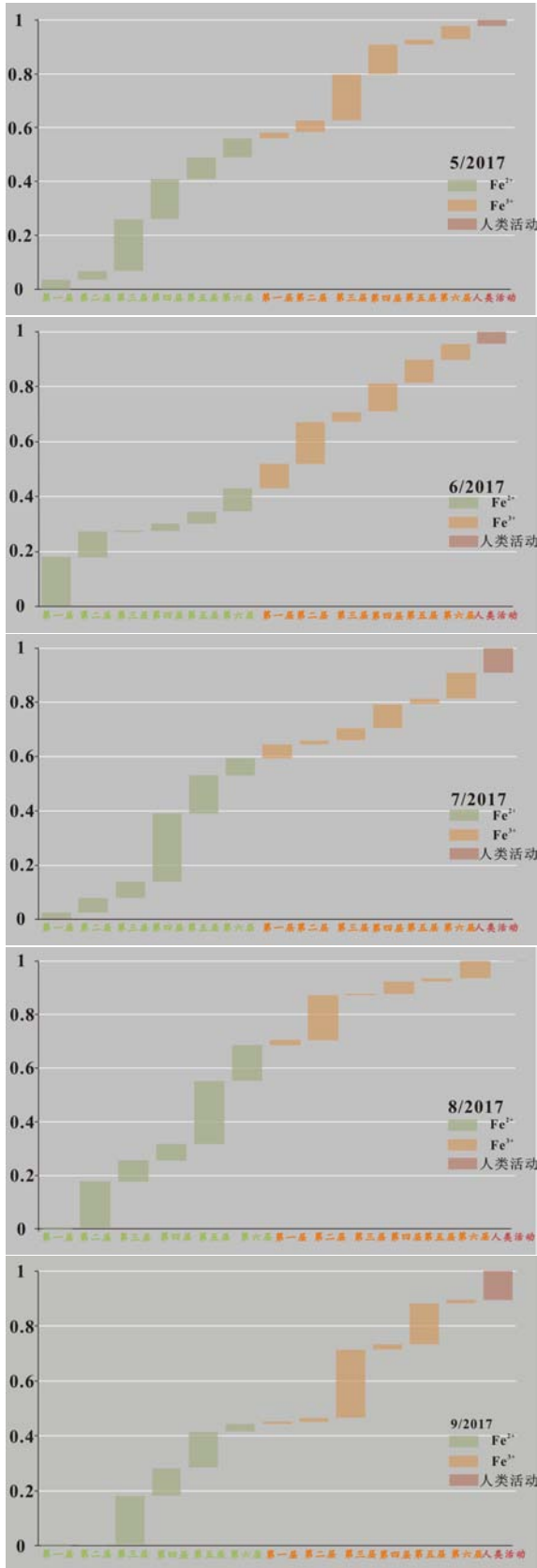


图6 不同时期Fe³⁺离子主要来源分布图

Fig.6 Distribution map of main sources of Fe³⁺ ion in different periods

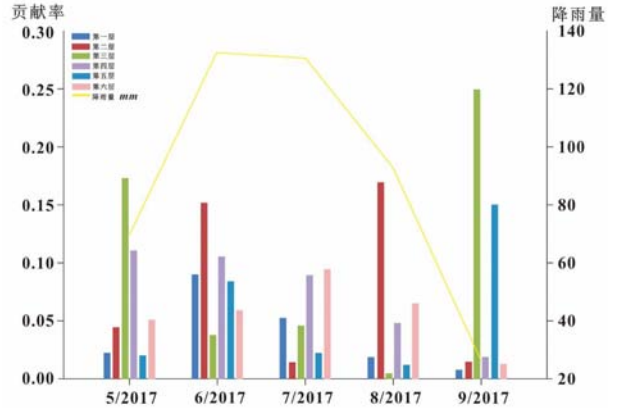


图7 不同时期不同深度土壤层中Fe³⁺离子对浅层地下水Fe³⁺离子贡献率随降雨量变化图

Fig.7 The contribution rate of Fe³⁺ ions to shallow groundwater in soil layers at different depths in different periods and with changes in rainfall

(3)从五期人类活动对浅层地下水Fe³⁺离子的贡献率来看,第五期人类活动对浅层地下水Fe³⁺离子的贡献率最大为0.1063。

参考文献:

[1] 许英霞,张龙飞,王明格,等.冀东马城沉积变质型铁矿床流体包裹体研究[J].地质与勘探,2015,51(2):225-237.

[2] Ma R, Zhou X, Shi J S. Spatial variation of chemical variables in the critical zone of the Luan River catchment in North China Plain[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11: 516.

[3] Ma R, Zhou X, Shi J S. Heavy metal contamination and health risk assessment in critical zone of Luan River Catchment in the North China Plain[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2018,18: 47-57.

[4] 张兆吉,费宇红,郭春艳,等.华北平原区域地下水污染评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(5):1456-1461.

[5] 王璇,于宏旭,熊惠磊,等.华北平原地下水污染特征识别及防控模式探讨[J].环境与可持续发展,2016,41(3):30-34.

[6] 郭春艳,马震,张兆吉,等.唐山市平原区浅层地下水环境特征研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):77-80.

[7] 张志强,田西昭,单强,等.唐山市某垃圾填埋场对浅层地下水水质的影响[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):79-82.

[8] 陈靖,李厚民,李立兴,等.冀东司家营BIF铁矿流体包裹体及氧同位素研究[J].岩石学报,2014,30(5):1253-1268.

[9] 郭海全,马忠社,郝俊杰,等.冀东土壤地球化学基准值特征及研究意义[J].岩矿测试,2007,26(4):281-286.

[10] 宋泽峰,栾文楼,崔邢涛,等.冀东平原土壤重金属元素

- 的来源分析[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1530-1538.
- [11] 崔邢涛, 栾文楼, 吴景霞, 等. 冀东平原表层土壤重金属元素的空间变异及模拟研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 957-964.
- [12] 谭科艳, 刘晓端, 汤奇峰, 等. 华北平原土壤环境重金属元素分布规律及其意义[J]. 地球学报, 2011, 32(6): 732-738.
- [13] 乔晓辉, 陈建平, 王明玉, 等. 华北平原地下水重金属山前至滨海空间分布特征与规律[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 209-215.
- [14] 王兰化, 李明明, 张莺, 等. 华北地区某蔬菜基地土壤重金属污染特征及健康风险评估[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 191-196.
- [15] 王晓曦, 王文科, 王周锋, 等. 滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 25-33, 73.
- [16] 赵佳莉, 王文科, 王周锋, 等. 河床沉积物渗透系数空间变异性研究——以滦河下游为例[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 13-20.
- [17] 王立明, 徐宁, 王腾骏, 等. 滦河中下游(唐山段)河岸带种子植物区系分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 46-49.
- [18] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持利用调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2009:25-62.
- [19] 陈彭, 马震, 王威, 等. 滦河三角洲地下水污染调查评价[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(2): 115-122.
- [20] 费宇红, 张兆吉, 郭春艳, 等. 区域地下水质量评价及影响因素识别方法研究——以华北平原为例[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 131-138.
- [21] 刘宏伟, 杨君, 杜东, 等. 冀东平原滨海地区浅层地下水水化学与同位素特征分析[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(2): 108-114.

Discriminant analysis on iron ion provenance in groundwater, eastern Hebei Plain

LIU Yu^{1,2}, LU Chen-ming^{1*}, MA Rong¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Eastern Hebei Province is the largest iron ore production base in China. Violent anthropogenic activities and geological environment lead to different degrees of excess of Fe, Mn, Cr and Pb ions in shallow groundwater. In particular, the iron ion content can be 5 ~ 10 times higher than the drinking water standard. In order to quantitatively characterize the provenance of heavy metal ions in shallow groundwater in the typical area of the middle and lower reaches of the Luan River in the Eastern Hebei Plain, five consecutive periods samples in the shallow groundwater and soil were collected from May to September, in 2017. Taking iron ion as the main research object, the multiple linear regression analysis method was used to quantitatively describe the sources of pollution. The results of research demonstrate that Fe^{3+} ions in shallow groundwater are derived from the upstream industrial waste water, the migration of Fe^{3+} ions and the transformation of Fe^{2+} ions in the vadose zone. The contribution rates of the above three sources to Fe^{3+} ions in shallow groundwater in May 2017 were 2.29%, 41.8%, and 55.9%, respectively. The contribution rates in June were 4.48%, 52.58%, and 42.95%, respectively; The contribution rates in July were 9.2%, 31.55%, and 59.25%, respectively. The contribution rates in August were 0.04%, 31.43%, and 68.53%, respectively, The contribution rates in September were 10.63%, 45%, and 44.37%, respectively. The Fe^{3+} ions in the shallow groundwater in the study area are mainly derived from the migration and transformation of Fe^{2+} ions and Fe^{3+} ions in the vadose zone, and the upstream industrial waste water has no significant effect on it.

Key words: groundwater; heavy metal ion; multiple linear regression; contribution rate; Luan river