

doi: 10.12029/gc20200606

朱亮,刘景涛,杨明楠,吕晓立,解飞,魏玉涛. 2020. 1998 年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素[J]. 中国地质, 47(6): 1677–1687.

Zhu Liang, Liu Jingtao, Yang Mingnan, Lü Xiaoli, Xie Fei, Wei Yutao. 2020. Changes and driving factors of groundwater environment in Lanzhou since 1998[J]. *Geology in China*, 47(6):1677–1687(in Chinese with English abstract).

1998 年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素

朱亮^{1,2}, 刘景涛^{1,2}, 杨明楠¹, 吕晓立^{1,2}, 解飞¹, 魏玉涛³

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061; 2. 河北省中国地质调查局地下水污染机理与修复重点实验室, 河北石家庄 050061; 3. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃兰州 730050)

摘要:以地下水污染调查数据、地下水监测数据和遥感数据为基础,分析了 1998 年以来(1998—2019 年)兰州不同区域地下水环境变化趋势,探讨了土地利用变化、污染源排放、地下水开采等城市发展要素对地下水的影响。结果表明:1998 年以来兰州市地下水环境变化的主要特征是水质恶化、水位上升。溶解性总固体、总硬度、硝酸根、氟等典型水化学指标在大部分地区呈稳定上升趋势,局部地下水中硝酸根比重增加,出现了硝酸型地下水。污染负荷增加是水质恶化的重要驱动因素,且恶化指标与城市主体功能存在直接关系,城关区是主要的居住、商业区,水质恶化的典型指标为硝酸盐;西固区是化工、冶炼等重工业集中区,地下水污染程度最重,反映工业污染的氟化物上升显著;七里河区、安宁区是商业、居住及轻工业的综合分布区,矿化度、总硬度、硝酸根等指标都有不同程度上升,但升幅不大。西固及三滩地区地下水位上升较为明显,其他城区相对稳定,城市不透水界面阻碍了降雨、灌溉等地表垂直入渗,使地下水位年内波动趋于平缓;水源地开采量减少、沿河工程建设以及地下管网渗漏等因素导致地下水补径排条件发生变化,不仅引起城区地下水位上升,还能够增强污染物淋滤和地下水蒸发浓缩,对水化学环境造成一定影响。

关键词:地下水;水化学;水动力条件;城市化;地质调查工程;兰州市;甘肃省

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)06-1677-11

Changes and driving factors of groundwater environment in Lanzhou since 1998

ZHU Liang^{1,2}, LIU Jingtao^{1,2}, YANG Mingnan¹, LÜ Xiaoli^{1,2}, XIE Fei¹, WEI Yutao³

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Pollution Mechanism and the Repair of Hebei Province, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 3. *Geological Environmental Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China*)

Abstract: Based on groundwater pollution survey data, groundwater monitoring data and remote sensing data, the authors analyzed the groundwater environment change trend in different areas of Lanzhou City since the 1990s (1998–2013). The results show that, since 1998, the main groundwater environment change in Lanzhou has been characterized by deterioration of groundwater quality and rising of groundwater level. Typical hydrochemical indexes such as TDS, TH, nitrate and fluorine have different trends in different areas of Lanzhou, and most of them show a steady upward trend. Nitric acid groundwater has appeared in some areas. The

收稿日期:2018-09-05;改回日期:2019-03-26

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“湟水河流域水文地质调查”(DD20190331)资助。

作者简介:朱亮,男,1984年生,助理研究员,主要从事污染水文地质方面的研究;E-mail:liangzhuz@163.com。

increase of urban pollution load is an important driving factor for the rise of typical hydrochemical indicators, and there is a direct relationship between the characteristic indicators and the main functions of different urban areas. Chengguan District is the main residential and commercial area, with the typical index of water quality deterioration being nitrate. Xigu District is a concentrated area of heavy industries such as chemical industry and smelting, with the highest degree of groundwater pollution, and the increase of fluoride suggests that industrial pollution is significant. Qilihe District and Anning District are comprehensive distribution areas of commerce, residence and light industry, and TDS, TH, nitrate and other indicators have all risen in varying degrees, but the increase is not significant. The rise of groundwater level in Xigu and Santan area is more obvious, with that in other areas being relatively stable. Urban impervious interface hinders the vertical infiltration of rainfall, irrigation and other surface water, making the annual fluctuation of groundwater level gentle. Due to the reduction of groundwater exploitation, increasing construction along the Yellow river and the leakage of underground pipe network, the condition of groundwater recharge and discharge is changing. It not only causes the rise of groundwater level in the urban area, but also enhances the leaching of pollutants and the evaporation and concentration of groundwater, which has a certain impact on the hydrochemical environment.

Key words: groundwater; hydrochemistry; hydrodynamic condition; urbanization; geological survey engineering; Lanzhou; Gansu Province

About the first author: ZHU Liang, male, born in 1984, assistant researcher, mainly engages in the research on groundwater pollution; E-mail: liangzhuz@163.com.

Fund support: Supported by project of China Geological Survey: Hydrological Geology in Huangshuihe Basin (No. DD20190331).

1 引 言

20世纪90年代以来中国进入了全面城市化阶段(肖翔, 2011),城市规模的快速扩张和城市人口的急剧增加一方面导致土地利用结构和地下空间结构发生变化,改变了地下水的循环和赋存条件(闫佰忠等, 2015; 王晓勇等, 2019; 邱国玉等, 2019),另一方面污染物排放也对地下水质量造成强烈干扰(Vázquez-Suñé, et al., 2005; Kumar et al., 2011; 何泽等, 2019)。兰州是中国西北地区重要的工业中心,以能源消耗为主的发展模式对地下水环境带来巨大冲击,是西北地区城市发展地下水环境之间矛盾的典型(朱亮等, 2014)。

余振国等利用氢氧同位素数据分析了“三滩”水源地地下水的形成和循环机理,探讨了水质恶化的原因(余振国等, 1992);郭同章等研究了水源地大规模开采时期(1980—1990年代)地下水漏斗及地下水环境的变化过程(张明泉等, 1990; 郭同章等, 1997)。随着漏斗区水质恶化,地下水逐渐丧失饮用功能,水源井逐渐报废。黎涛等研究了1987—2006年漏斗区地下水位和水化学的变化与开采量及黄河水补给的关系,结果表明,随着开采量的较少, TDS等水化学指标呈下降趋势(黎涛等, 2010)。前人的研究结果对认识兰州市地下水循环和水质演化过程具有重要意义,但研究区域多局限在“三滩”水源地,缺乏对整个市区的

研究,特别是20世纪90年代中后期以来,城市规模和经济水平都出现了飞跃式的增长,城市发展对地下水环境的影响也越来越显著。

本文结合不同区域地下水水质和水位监测资料,综合分析1998年以来兰州市地下水环境变化及其主要影响因素,研究结果对深入认识中国西北地区城市发展的地下水环境效应及地下水环境保护具有重要意义。

2 研究区概况

兰州地处甘肃省中部,位于北纬 $35^{\circ}45'$ ~ $36^{\circ}28'$,东经 $102^{\circ}49'$ ~ $103^{\circ}59'$,群山环绕,属温带半干旱气候,多年平均降水量321 mm,集中在8、9月份,多年平均蒸发量1448.1 mm,黄河自西向东穿过市区,多年平均流量 $1025\text{ m}^3/\text{s}$,多条发源于两侧山区的季节性河流穿过市区汇入黄河,中途大量工业、生活废水注入,形成市区的天然排污沟。兰州属典型的河谷盆地型城市,城区地貌为侵蚀堆积河谷阶状平原,包括黄河I~IV级阶地和漫滩,多被人工改造所夷平。地下水赋存于两岸的砂卵砾石层中,含水层厚度区域差异较大,在三滩地区最厚可达300 m,而在西固区一、二级阶地多在5~13 m。区域地下水从南北两侧丘陵山区接受降水补给后向河谷径流,在径流过程中接受灌溉和城市污水的入渗补给,最终排泄于黄河,局部傍河地段河水位高于地下水位,河水变为地下水的主

要补给源(李建宏,2019)(图1)。

兰州于1941年建市,仅有城关区面积不到20 km²的区域,20世纪50、60年代及“三线建设”时期,兰州市由落后的消费型城镇迅速发展为工业重镇,此后在改革开放、西部大开发等政策的引导下,城市化、工业化水平显著提高,截止2018年,建成区面积366.84 km²,人口379.09万。在城市功能分区上,城关区作为政治、经济、文化中心,主要布置行政、商贸和生活居住用地;西固区作为工业中心,主要布置石油化工、电力等二、三类工业;安宁区、七里河区以商业、居住为主,其次还分布机械加工、建筑建材、电子等工业(张志斌等,2019)(图1)。

3 数据来源

本文中使用的数据主要包括土地利用数据、社会经济发展数据;地下水水质及水位监测数据等。其中土地利用数据来源于landsat5 TM及landsat8 OLI 30 m分辨率影像解译;社会经济发展数据引自兰州市历年统计年鉴;监测井水位数据引自中国地质环境监测地下水水位年鉴;1998—2011年的监测井水质动态数据从甘肃省地质环境监测总站收集,2018—2019年水质数据由国家地下水监测工程收集,2012—2103年的水质数据通过地下水污染调查采样自主获取,由于调查采样的时间为8、9月份。因此,为了使水质数据具有更强的可比性,本文使用的历史监测数据均为历年丰水期的水质数据。

4 结果和讨论

4.1 地下水化学形成作用

兰州市地下水化学受天然和人为两种因素控制,具有从两侧山体向黄河两岸呈条带状分布的特

征。在黄河二级阶地后缘,三、四级阶地以及黄土丘陵地区,地下水主要接受大气降水和农业灌溉水补给,地层中的易溶岩在降水和灌溉水淋滤作用下进入地下水,再加之地势较为平缓,径流条件较差,地下水与含水层介质作用时间长,有利于盐分的富集,地下水化学形成以溶滤作用为主。

西固、沙井驿、安宁区北部以及城关区的二级阶地,来自上游的地下水与河谷潜水发生混溶驱替,水化学类型变得较为复杂;在“三滩”一带河漫滩及一级阶地前缘地段,黄河水位高于地下水位,低矿化度的河水以舌状楔入地下水中,地下水化学类型与河水接近;在一些地表沟渠两侧,还存在生活污水、工业废水与地下水的混合,形成了线状甚至是片状分布的地下水污染区域。在城市高速发展的驱动下,人类活动逐渐成为干扰和影响地下水环境的重要外营力(袁建飞等,2016)。

4.2 地下水环境变化

4.2.1 典型水化学指标变化

在兰州市选择6个代表性的地下水监测井,地下水类型均为松散岩类孔隙水,其中Q01、Q08、Q62、Q67位于新城区,Q92位于老城区、Q94位于工业区(图2)。根据1998—2013年的监测数据,研究矿化度、硝酸根、氟4个典型指标的动态变化。其中,矿化度反映地下水总体质量;硝酸根反映农业及生活污染源的影响;氟是西北地区高背景元素之一,也是一种典型的工业污染组分(吕晓立等)。

矿化度在新城区Q01、Q08呈波动上升趋势,矿化度分别从510.3 mg/L、1340.6 mg/L增至1278.6 mg/L、1889.3 mg/L;Q67和Q62呈波动下降趋势,矿化度分别从1270.6 mg/L、1549.3 mg/L降至483.7 mg/L、637.9 mg/L,由微咸水变为淡水。老城区和工

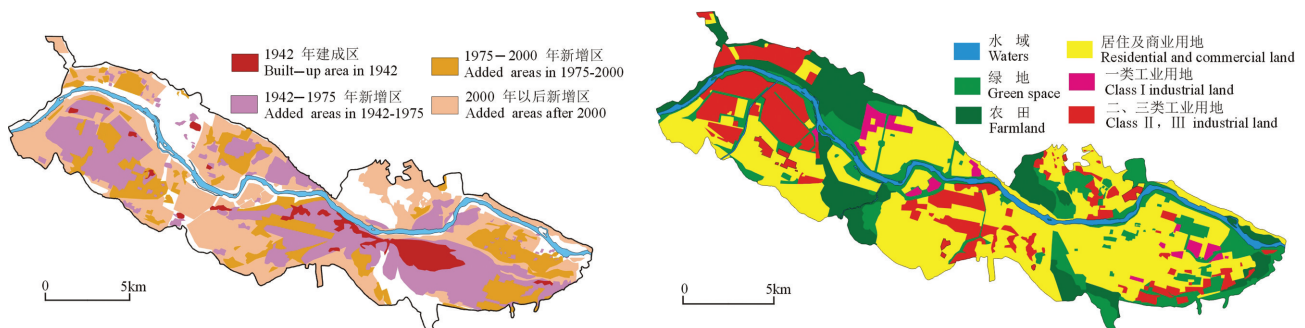


图1 兰州市城市扩张(左)及土地利用图(右)

Fig.1 Urban expansion (left) and land use map (right) of Lanzhou City

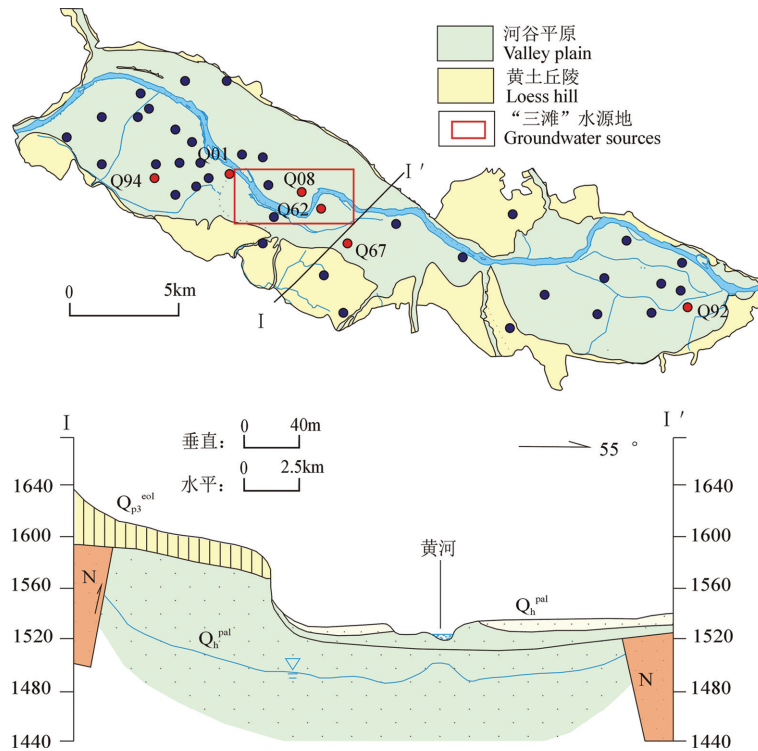


图2 研究区地貌概况及采样点分析

Fig.2 Geomorphic survey and sampling sites of the study area

业区缺乏连续的长系列监测数据,但从现有数据来看,这两个地区都属于高矿化地下水,其中,位于工业区的Q94波动较大(图3)。

硝酸根在新城区Q01含量低且较稳定;Q08含量较高且呈波动上升趋势,从119 mg/L(1998年)增至286.21 mg/L(2018年);Q62、Q67呈波动下降趋势,2008年后基本稳定在20 mg/L左右;老城区和工业区均呈上升趋势,其中Q92从103.8 mg/L(2009年)升至269.37 mg/L(2019年),4年间增加了1.5倍,Q94从4 mg/L(1998年)升至184.43 mg/L(2013年),15年间增加了45.1倍(图3)。

氟离子在新城区Q01呈波动上升趋势,从0.24 mg/L增至0.62 mg/L;工业区Q94中氟离子含量稳定上升,从0.16 mg/L增至2.31 mg/L,增加了14.4倍。其他监测井氟离子含量年际间存在波动,但总体处于稳定状态(图3)。

综上所述,老城区地下水中硝酸根,西固工业区的硝酸根、氟离子,新城区崔家大滩的矿化度、氟离子以及迎门滩的矿化度、硝酸根呈上升趋势,其他指标相对稳定;新城区马滩地区的矿化度、总硬度、硝酸根呈下降趋势,其他指标变化不大,这一规

律与吕晓立等对兰州市地下水“三氮”分布的结果基本一致(吕晓立等,2019)。

4.2.2 地下水化学类型变化

根据各监测井毫克当量百分比变化图(图4),新城区Q01水化学类型从 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型转化为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型;Q08阴阳离子比例变化不大,水化学类型较稳定;Q62中各阴阳离子在不同年份间的波动较大,不存在明显的变化规律,阴离子水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 或 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ 型,阳离子水化学类型以 $\text{Na} \cdot \text{Mg}$ 为主,偶尔出现 $\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型;Q67水化学类型从 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型转化为 HCO_3 或 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型;老城区Q92中 Cl^- 比例下降, SO_4^{2-} 比例上升,但水化学类型基本为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型;工业区Q94水化学类型较稳定,基本为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 。

综上所述可以看出,地下水化学类型变化较大的地区主要位于新城区,其中,Q67向优质水体转化,Q01向劣质水体转化,不同的水化学类型变化特征指示了不同的地下水影响因素。

传统的水化学类型是以6种宏量组分进行组合命名的,随着地下水污染加剧,很多地区地下水中

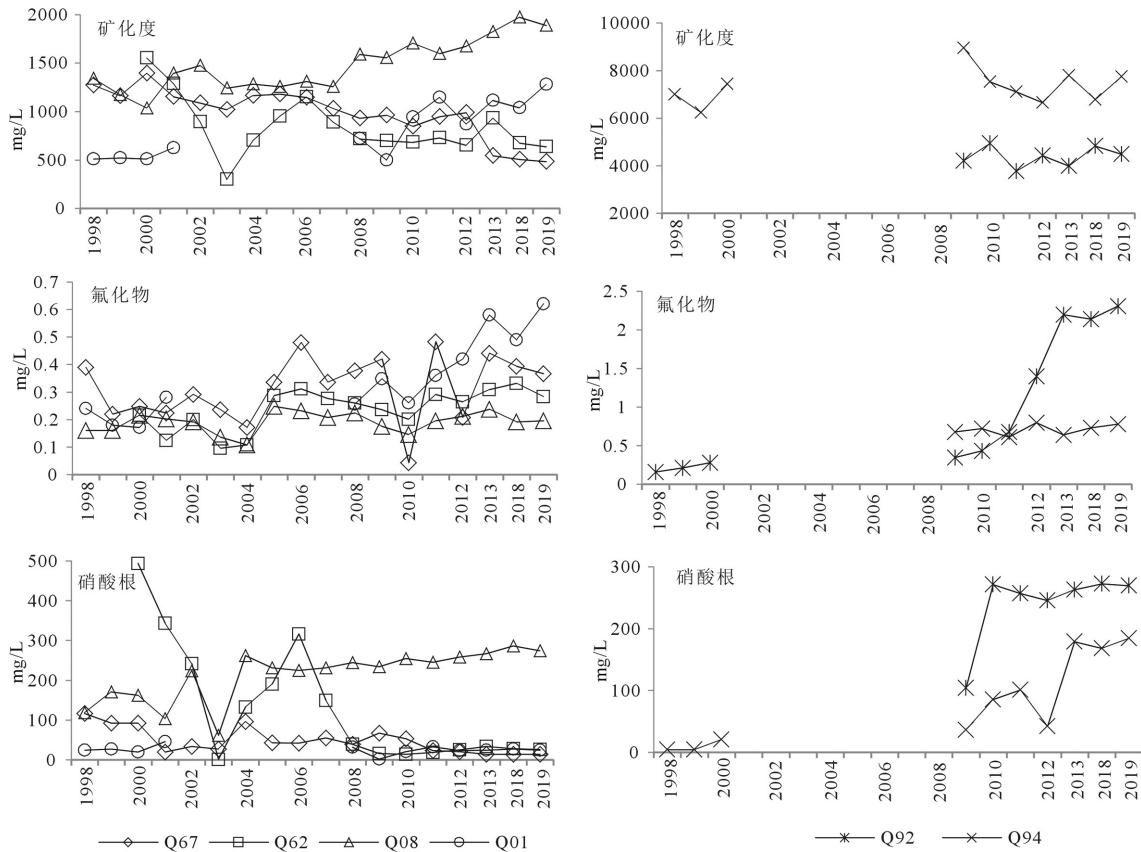


图3 各监测井矿化度、硝酸根、氟化物变化曲线
Fig.3 Variation curves of salinity, nitrate and fluoride in each monitoring well

硝酸根含量持续升高,出现了硝酸型地下水(周迅等, 2014; 廖磊等, 2016; 李政红等, 2018)。兰州市地下水样品阴离子计算结果显示,有4个样品 NO_3^- 毫克当量百分比大于25%,按照舒卡列夫分类原则, NO_3^- 应参与这些样品的水化学命名。为了在Piper图中表达 NO_3^- 的水化学比重,对Piper图(图5a)进行了改进,在Piper图右下角三角形中用 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 毫克当量百分比之和替代 SO_4^{2-} 比重,然后再增加一个三角形(图5b中绿色边框)用以显示 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的毫克当量百分比。改进后的Piper图直观反映了 NO_3^- 在地下水中的比重,能够更加准确表示地下水 NO_3^- 升高情况下的水化学特征。

4.2.3 水动力条件变化

地下水位是表征地下水动力条件的重要标志(孙厚云等, 2018; 吴斌等, 2019)。从20世纪80年代开始,地下水上升就已成为兰州市严重的环境地质问题之一。根据水位监测资料,在西固区大部、秀川—西站—小西湖一带、安宁堡—万里厂—王家庄一带以及雁滩、拱星墩的近河岸地带,地下水位

上升趋势明显;三滩地区在20世纪80年代形成了区域性的降落漏斗,但从20世纪90年代中后期开始,随着水源地水质恶化,开采量逐年下降,三滩地区地下水漏斗逐渐恢复,形成了区域性的地下水为上升区(图6),2005—2011年间,西固区及三滩地区监测井(Q94、Q67、Q08、Q01)水位上升幅度普遍在4~6 m,其他城区地下水位相对稳定。

4.3 驱动因素分析

4.3.1 污染源特征及排放变化

对于地下水环境而言,不同城市功能区具有不同的污染荷载、污染源类型和污染途径,往往形成不同的地下水污染特征(张小文等, 2018; 柳山等, 2018)。20世纪90年代中后期以来,人口密度和工业发展速度加快,截止2018年,兰州城市人口379.09万,平均人口密度2414人/ km^2 ,其中城关区人口密度可达5818人/ km^2 ,全市规模以上工业生产总产值2732.94亿元,随之而来的是污水、固废产生量的急剧升高(图7),加重了地下水污染负荷。

兰州市是以城关区为中心发展起来的,城关区是

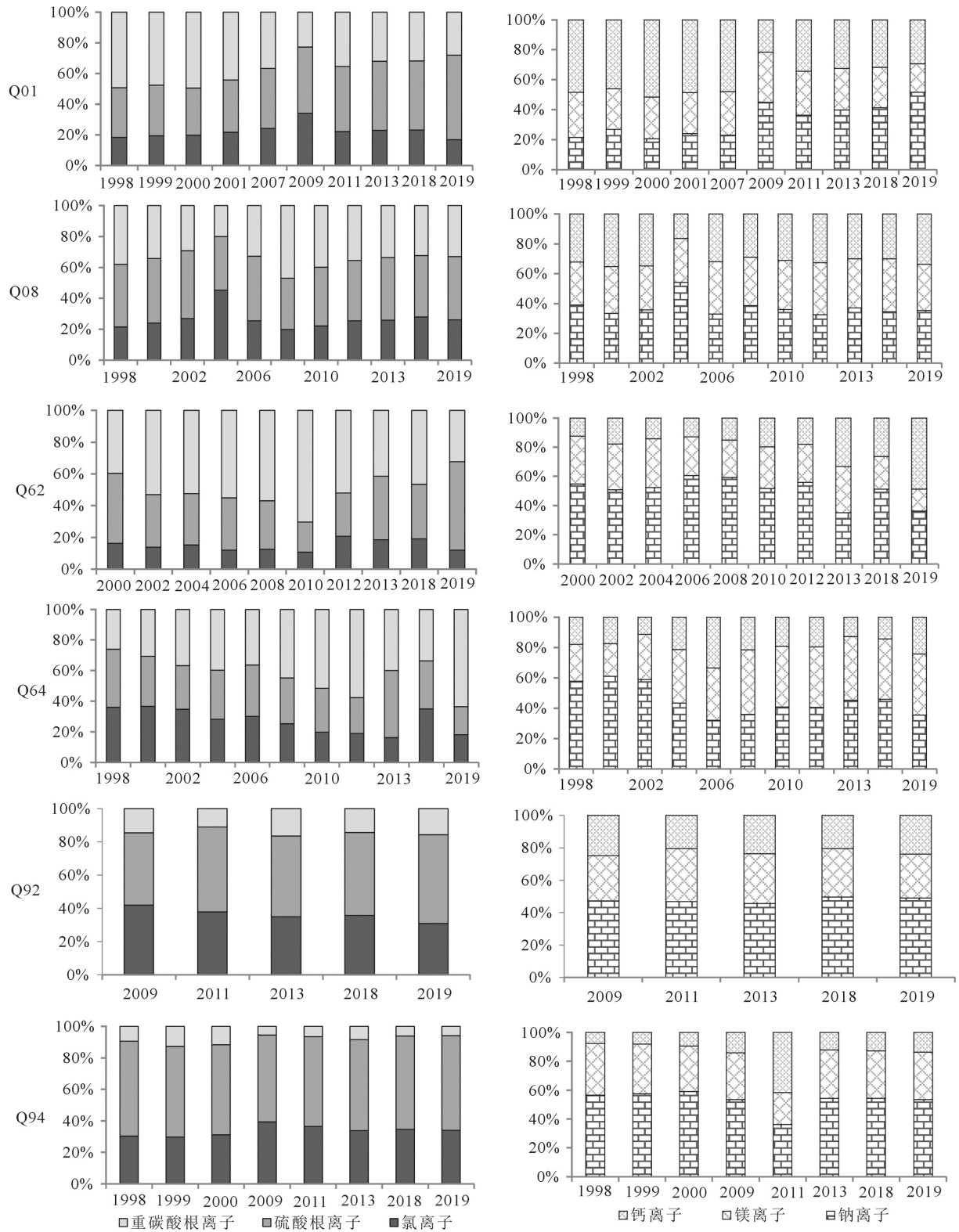


图4 各监测井宏量指标的毫克当量百分比变化
 Fig.4 Change of Meq percentage of macro indexes of monitoring wells

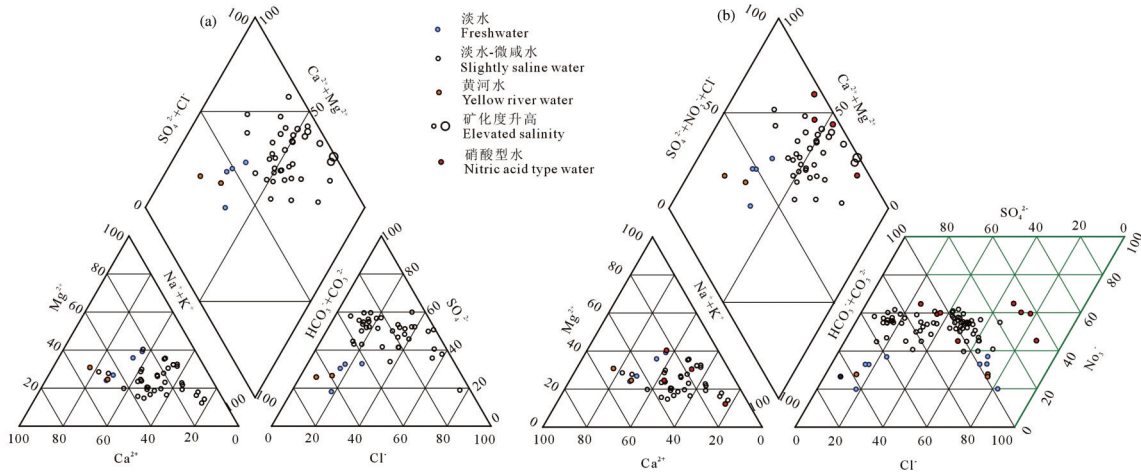


图5 考虑硝酸根后的Piper图
Fig.5 Piper after consideration of nitrate

主要的行政、商贸、居住区,污染源类型主要以城市生活污水、垃圾为主,因此,硝酸盐成为该区域监测井Q92中变化最为明显地下水化学指标;西固区主要布置石油化工、石油储运、金属冶炼等重工业区,也拥有比较完备的生活配套设施,污染源类型较为复杂,因此该区域Q94监测井中氟离子、硝酸根变化明显,而且矿化度也出现较大的波动(吕晓立等,2019)。

氟是一种重要的工业氧化剂,从2006年开始,随着“三废”排放量急剧增高,2010年后,西固工业区Q94监测井和下游的Q01监测井中氟离子出现了上升趋势,尤其是位于工业区内的Q94上升趋势更加明显,这说明工业污染源排放量的快速增加对工

业区地下水中氟离子的影响十分明显,而地下水中氟离子变化的滞后性则反映了氟离子从工业污染源到地下水的迁移过程(杨磊等,2015)。事实上,受城市发展的影响,兰州市不同功能区之间并没有严格的界限,在多重因素影响下,地下水中污染物成分往往较为复杂,但典型污染物类型与主体功能之间仍存在着直接关系。

4.3.2 土地利用类型变化

20世纪90年代以来,兰州市土地利用类型变化以城市建成区的增加和耕地的减少为主要特点,减少的耕地面积几乎全部转化为城市建成区(图8)。其中,七里河区的马滩、迎门滩至范家坪、彭家坪以

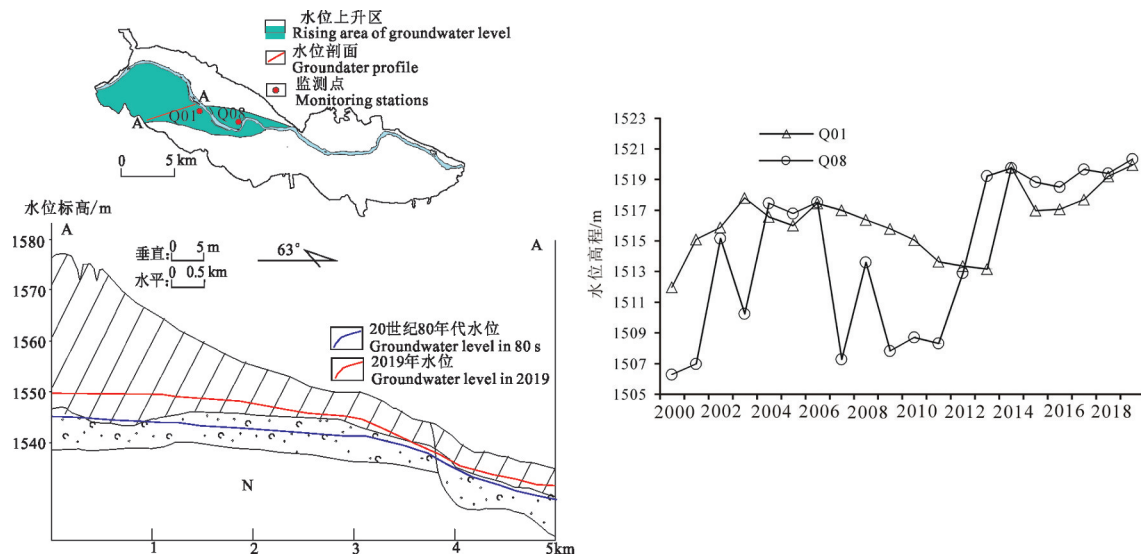


图6 水位上升区及典型监测点水位变化曲线
Fig.6 Groundwater rising area and the curve of typical monitoring stations

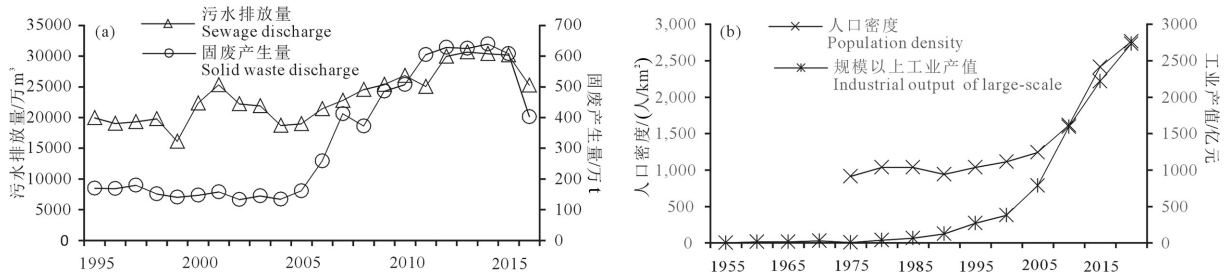


图7 兰州市人口、工业(a)以及主要污染物排放(b)增长趋势
 Fig.7 Growth trend of population, industry (a) and main pollutant discharge (b) in Lanzhou

及城关区的雁滩一带是耕地向城区转化最为剧烈的地区,目前,三滩地区以及雁滩等原来的水源保护区及农业区已基本全部被城区覆盖。

耕地向城市用地转化改变了天然地表性质和人类活动特征,对地下水的补给过程和地下水化学指标产生显著影响(凌明阁等, 2012; 蔡月梅, 2016)。从Q67监测井2007年和2018水位波动(图9)可以看出,当周围为耕地时(2007年),年内水位波动较大,分别在4月份、8月份出现了两个高水位;但当大部分耕地转化为城区后(2018年),原本随灌溉、降雨而波动地下水位趋于平缓,这说明耕地向城区的转化过程中,由于天然下垫面被水泥硬化地面取代,灌溉、降水等集中式的补给源对地下水的垂向补给作用逐渐减弱。在图2硝酸盐变化曲线中可以看出,从20世纪90年代中后期开始,马滩地区Q67、Q62中硝酸根含量呈下降趋势,众所周知,硝酸根是一种重要的农业污染源,马滩地区在20世纪60年代后期开始大面积围河造田,90%以上的区域变为耕地,受化肥使用以及污水灌溉等因素影响,地下水硝酸盐逐年升高(郭同章等, 1997),从90年代后期耕地逐渐转化为城区,来自农业的硝酸盐污染负荷减弱可能是马滩地区地

下水硝酸盐含量降低的主要原因。

4.3.3 地下水开采强度变化

“三滩”水源地于20世纪60年代中期投产运行,80、90年代达到开采的高峰期,年开采量超过7000万m³。水源地开采形成了区域性的降落漏斗,在南部咸水入侵、深部古咸水上升以及人为污染等多种因素的驱动下,水源地水质急剧恶化,逐渐丧失供水功能(吕晓立等, 2014, 2015),水源地水质恶化模式如图10所示。从90年代中后期开始,随着水源地逐渐停采,地下水位逐渐回升,强开采时期形成的降落漏斗开始逐渐恢复,南部咸水及深部古咸水的补给动力逐渐减弱,受此影响,马滩水源地(Q67、Q62监测井)矿化度、总硬度呈下降趋势,逐渐由咸水转化为淡水,但在大滩(Q01)和迎门滩(Q08),地下水矿化度、总硬度却出现了和马滩水源地相反的变化特征(图3),说明这两个地区仍然存在其他的劣质水体补给源。

4.3.4 地下水补径排条件变化

天然条件下兰州市区地下水主要接受降水入渗补给和南北侧基岩山区侧向径流补给,最终以地

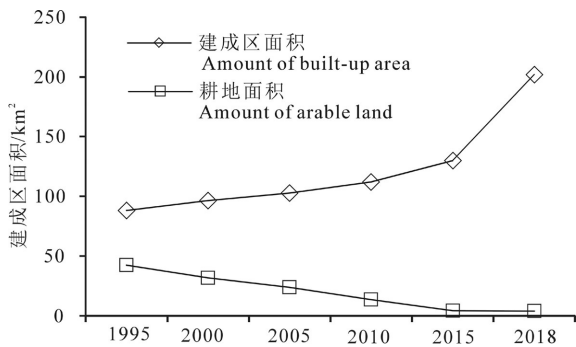


图8 兰州市建成区与耕地面积变化
 Fig.8 Change of cultivated area and farmland in Lanzhou City

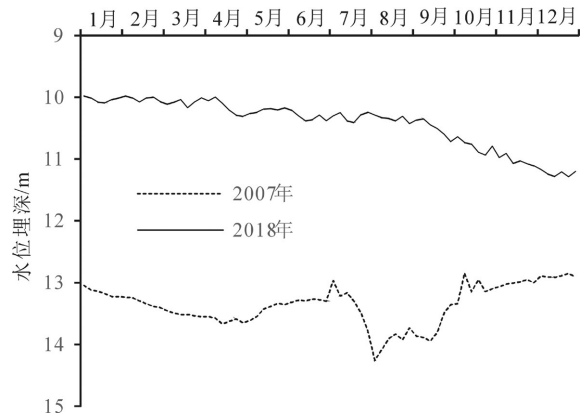


图9 Q67地下水位波动变化
 Fig.9 Fluctuation of groundwater level in Q67

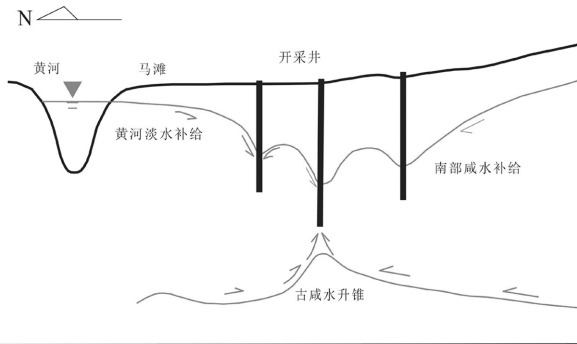


图10 漏斗区水质恶化模式示意图

Fig.10 Schematic diagram of water quality deterioration in funnel area

下潜流的形式通过Ⅱ、Ⅰ级阶地最终排泄于黄河。而引黄灌溉、城市工程建设、污水排放以及地下水开采强度等因素改变了地下水天然补、径、排条件,造成局部水位升高。

如前所述,地下水开采量减小是三滩地区地下水位升高的主要因素,另外,在其他工业集中区和人口聚集区,地下水位上升也十分明显,其中西固区已经形成总面积 28.55 km² 的地下水上升区,2000—2019年,Q01、Q08的地下水位年平均上升幅度达到0.4 m和0.7 m(图6)。随着城市供水量和排污量不断增加,地下管网的漏损成为城市地区地下水补给的不可忽视的组成部分(于开宁等,2004),截至2018年兰州市地下管网总长度2943.7 km,是1995年(497.12 km)的5.9倍,由于城市发展时间较长,一些老城区地下管网老化破损现象严重,漏损率高达20%以上,年漏损量近5千万m³,成为地下水的一个重要补给源和一类典型的污染源;由于城区地下水只能通过向黄河排泄,黄河沿岸公路的修建以及河堤加深加固进一步阻塞了地下水排泄通道,而且黄河水大量泥沙在河床边缘地带沉积形成一层含泥质较高的砂砾石层,细颗粒的粉土及黏土含量为6.5%~22%,对地下水的排泄极为不利。

地下水位上升导致地下水充满砂卵砾石层并上升进入上部的黄土状土层中,改变了原来的含水介质类型,不仅改变了地下水径流条件,而且会加剧对上部土层中可溶盐及其他污染物的淋溶作用和蒸发浓缩作用,进而引起水化学组分变化(张茂省等,2018)。

5 结 论

(1)在城市高速发展驱动下,20世纪90年代以

来兰州市地下水水质及水动力条件发生了显著变化,水质恶化、水位上升成为地下水环境发展的主要方向。污染源排放、城市功能分区、土地利用类型变化、水源地开采量减少、城市工程建设等都是地下水环境变化的驱动因素。

(2)污染源排放是造成水质恶化的关键因素,受城市主体功能的影响,不同城区污染物排放类型不同,因此对地下水的影响指标也不尽相同。城关区是主要的行政、商贸、居住区,人口密度最大,受生活污染源的影响,硝酸盐成为该区域水质恶化的典型指标;西固区是化工、冶炼等重工业集中区,地下水污染程度最重,重金属及有机污染突出,监测数据中反映工业污染的氟化物上升显著;七里河区、安宁区是商业、居住、建材及电子类企业的综合分布区,矿化度、总硬度、硝酸根等指标都有不同程度上升,但上升幅度不大。

(3)城市扩张过程中,一方面下垫面性质发生显著变化,大面积硬化不透水界面直接影响降雨、灌溉等来自地表的垂直入渗补给,使城区地下水位年内波动趋于平缓;另一方面,地表人类活动特征的变化改变了原有的污染源类型和强度,最终引起地下水中与污染源相关的水化学指标发生变化。

(4)地下水水位上升是兰州市一个典型的环境地质问题,尤其在西固区和三滩地区表现最明显,人为因素引起的地下水补给量增加、排泄量减少和径流条件受阻是导致地下水位上升的根本原因。地下水位上升进入上部黄土层一方面使含水层介质发生变化,改变水岩作用,另一方面包气带厚度减小使地下水蒸发浓缩作用增强,而且地表污染物更容易通过垂直入渗进入地下水。

References

- Cai Yuemei, Wang Wenxiang, Zhang Mingjiang, Yin Xiulan, Cai Wutian, Wang Ruijiu, Li Wenpeng. 2016. An analysis of the groundwater flow system based on environmental isotopes in Turpan basin[J]. *Geology in China*, 43(4): 1439–1445 (in Chinese with English abstract).
- E Vázquez-Suñé, X Sánchez-Vila, J Carrera. 2005. Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain[J]. *Hydrogeology Journal*, 13(3): 522–533.
- Guo Tongzhang, Wei Xiaoke. 1997. A study of the causes for the deterioration of Lanzhou's groundwater conditions[J]. *Journal of*

- Lanzhou Railway University, V(4): 32–36 (in Chinese with English abstract).
- He Ze, Ning Zhuo, Huang Guanxing, Liu Dandan, Zhang Qianqian, Sun Jichao. 2019. The response characteristics of microbial diversity to shallow groundwater contamination in the piedmont of the Taihang Mountains using molecular biotechnologies: A case study of groundwater of Hutuo River Basin[J]. *Geology in China*, 46(2): 78–89 (in Chinese with English abstract)
- Li Tao, Ma Teng, Li Liang, Zuo Mingfang. 2010. An analysis of groundwater quality evolution in the area of depression cone in the Santan riverside wellfield[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 37(2): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianhong. 2019. Study on hydrogeological characteristics of groundwater in Lanzhou City[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 8: 155–157, 20–21 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenghong, Zhang Yilong, Hu Bo, Wang Lijuan, Zhu Yuchen, Li Jianfeng. 2018. Driving action of human activities on NO_3^- -N pollution in confined groundwater of Togtoh County, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(2): 358–364 (in Chinese with English abstract).
- Liao Lei, Hen Jiangtao, Ceng Ying, Peng Cong, Huang De Liang. 2016. A study of nitrate background level of shallow groundwater in the Liujiang Basin[J]. *Geology in China*, 43(2): 671–682 (in Chinese with English abstract).
- Ling Mingge, Liu Fang, Zhu Jian, Zhang Qiaoxiang. 2012. Influence of urbanization on concentrations of N and P in shallow groundwater and its evaluation in karst hilly area of Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(5): 141–144 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shan, Li Hongwei, Jin Xiaowen, Li Yanni. 2018. Research on the environmental impact of backfilling under dewatering mine conditions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(6): 62–68 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiaoli, Sun Jichao, Liu Jingtao, Jin Shenghai, Cui Haiwei, Zhang Ying. 2014. Evolution and countermeasures of water quality of the Santan wellfield in Lanzhou based on GMS[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(4): 24–31 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiaoli, Sun Jichao, Liu Jingtao, Jin Shenghai, Zhang Yuxi. 2015. The influence of the groundwater pollution on a riverside source field[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(5): 983–989 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiaoli, Liu Jingtao, Zhu Liang, Liu Chunyan, Liu Junjian. 2019. Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater of Lanzhou City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 33(1): 95–100 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiaoli, Liu Jingtao, Zhu Liang, Liu Junjian, Liu Chunyan. 2019. Distribution and source of Fe and Mn in groundwater of Lanzhou City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 33(3): 132–138 (in Chinese with English abstract).
- Manish Kumar, M.Someshwar Rao, Bhishm Kumar, Algappan Ramanathan. 2011. Identification of aquifer– recharge zones and sources in an urban development area (Delhi, India), by correlating isotopic tracers with hydrological features[J]. *Hydrogeology Journal*, 19(2): 463–474.
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1128–1141 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoyong, Zhu Lifeng, Dong Jiaqiu, Zhang Jun, Yin Lihe. 2019. Influence of underlying surface change on hydrogeological conditions in arid and semi–arid regions[J]. *Northwestern Geology*, 52(2): 227–235 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bin, Wang Sai, Wang Wenxiang, An Yonghui. 2019. Impact of future climate change on water resources in the arid regions of Northwest China based on surface water– groundwater coupling model: A case study of the middle reaches of the Heihe River[J]. *Geology in China*, 46(02): 157–168 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xiang. 2011. A historical analysis of China's urbanization and evolution of Industrial structure (1949–2010) [J]. *Teaching and Research*, 6: 18–25 (in Chinese with English abstract).
- Yan Baizhong, Xiao Changlai, Liu Hongzhi, Wei Runchu Liang Xiujuan. 2015. Effect of urban land use on the spatial distribution of groundwater pollution in the Jilin City[J]. *China Environmental Science*, V(3): 934–942 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lei, Gong Xulong, Lu Xurong, Zhang Yan. 2015. Distribution and genesis of high–fluoride groundwater in northern Lianyun gang area[J]. *Geology in China*, 42(4): 1161–1169 (in Chinese with English abstract).
- Yu Kaining, Lou Huajun, Guo Zhenzhong, Li Tao. 2004. Mechanism of groundwater recharge increment induced by urbanization[J]. *Resources Science*, 26(2): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhenguo, Yanggu, Lianyanqing. 1992. The study of formation process and circulation of groundwater source of vicinity along the both said of the river in Lanzhou with H, O isotope change[J]. *Acta Geologica Gansu*, V(1): 68–84 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianfei, Deng Guoshi, Xufen Tang Yueqi, Li Pengyu. 2016. The multivariate statistical analysis of chemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the northern part of Bijie City, Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 43(4): 1446–1456 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Wang Huaqi, Wang Rao, Dong Ying, Sun Pingping. 2018. Progress and Prospect of Urban Geological Survey in China[J]. *Northwestern Geology*, 51(4): 5–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingquan, Gao Hongxuan, Wu Kejian. 1990. A survey on the cause of nitric radical NO_3^- pollution in water–supply, source site

- of Lanzhou City[J]. Environmental Science, V(5): 79–82 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaowen, He Jiangtao, Liu Dandan, Ni Zehua, Zhang Changyan. 2018. An analysis of the stress effects and methods of the shallow groundwater quality in the Hutuo River alluvial fan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45(5): 54–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhibin, Gong Weimin, Zhang Huailin, Wang Kaijia, Zhao Hang. 2019. The Spatial agglomeration characteristics and its influencing factors of producer services in Lanzhou[J]. Economic Geography, 39(9): 112–121 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xun, Ye Yonghong. 2014. Improvement and application of Schukalev groundwater hydrochemical classification method: Taking groundwaters in Jinjiang City, Fujian Province as an example[J]. Resources Survey and Environment, 35(4): 299–304 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Liang, Sun Jichao, Liu Jingtao, Liu Junjian, Lü Xiaoli. 2014. Effect of urbanization on groundwater system in Lanzhou[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, V(3): 111–115 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Liang, Yang Mingnan, Chen Xi, Liu Jingtao. 2019. Health Risk Assessment and Risk Control: Drinking Groundwater in Yinchuan Plain, China[J]. Exposure & Health, 11(1): 59–72.
- ### 附中文参考文献
- 蔡月梅, 王文祥, 张明江, 张明江, 殷秀兰, 蔡五田, 王瑞久, 李文鹏. 2016. 基于环境同位素分析吐鲁番盆地地下水水流系统[J]. 中国地质, 43(4): 1439–1445.
- 郭同章, 魏肖克. 1997. 兰州市地下水环境恶化的原因探析[J]. 兰州交通大学学报, (4): 32–36.
- 何泽, 宁卓, 黄冠星, 刘丹丹, 张千千, 孙继朝. 2019. 太行山前平原浅层地下水污染的分子生物学响应特征——以滹沱河流域为例[J]. 中国地质, 46(2): 78–89.
- 黎涛, 马腾, 李亮, 左鸣放. 2010. “三滩”傍河水源地地下水水位降落漏斗区水质演化[J]. 水文地质工程地质, 37(2): 10–15.
- 李建宏. 2019. 兰州市城区地下水水文地质特征研究[J]. 城市道桥与防洪, (8): 155–157, 20–21
- 李政红, 张翼龙, 胡波, 王丽娟, 朱玉晨, 李剑锋. 2018. 人类活动对内蒙古托克托县浅层地下水 NO₃-N 污染的驱动作用[J]. 地球学报, 39(3): 358–364.
- 廖磊, 何江涛, 曾颖, 彭聪, 黄德亮. 2016. 柳江盆地浅层地下水硝酸盐背景值研究[J]. 中国地质, 43(2): 671–682.
- 凌明阁, 刘方, 朱健, 张巧香. 2012. 贵州省中部喀斯特山区城镇化对浅层地下水氮磷的影响及评价[J]. 水土保持通报, 32, 141–144.
- 柳山, 李洪伟, 金晓文, 李燕妮. 2018. 疏干降水条件下矿渣回填对地下水环境的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 45(6): 62–68.
- 吕晓立, 孙继朝, 刘景涛, 靳盛海, 崔海炜, 张英. 2014. 基于GMS的兰州“三滩”水源地地下水水质演化及调控对策[J]. 水文地质工程地质, 41(4): 24–31.
- 吕晓立, 孙继朝, 刘景涛, 靳盛海, 张玉玺. 2015. 地下水污染羽对傍河水源地的影响[J]. 地质通报, 34(5): 983–989.
- 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 刘春燕, 刘俊建. 2019. 兰州市地下水中“三氮”污染特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 33(01): 95–100.
- 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 刘俊建, 刘春燕. 2019. 兰州市地下水中铁锰分布特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 33(03): 132–138.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 惠玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128–1141.
- 王晓勇, 朱立峰, 董佳秋, 张俊, 尹立河. 2019. 干旱—半干旱区下垫面变化对地下水水位的影响[J]. 西北地质, 52(2): 227–235
- 吴斌, 王赛, 王文祥, 安永会. 2019. 基于地表水—地下水耦合模型的未來气候变化对西北干旱区水资源影响研究——以黑河中游为例[J]. 中国地质, 46(2): 157–168.
- 肖翔. 2011. 中国城市化与产业结构演变的历史分析(1949–2010)[J]. 教学与研究, (6): 18–25.
- 闫佰忠, 肖长来, 刘泓志, 危润初, 梁秀娟. 2015. 吉林市城区土地利用对地下水污染空间分布的影响[J]. 中国环境科学, (3): 934–942.
- 杨磊, 龚绪龙, 陆徐荣, 张岩. 2015. 连云港北部地区高氟地下水分布特征及成因[J]. 中国地质, 42(4): 1161–1169.
- 于开宁, 娄华君, 郭振中, 李涛. 2004. 城市化诱发地下水补给增量的机理分析[J]. 资源科学, 26(2): 68–73.
- 余振国, 杨顾, 连炎清. 1992. 应用氢氧同位素方法研究兰州市傍河水源地地下水水体的形成和循环机理[J]. 甘肃地质, 1992, (1): 68–84.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质, 43(4): 1446–1456.
- 张茂省, 王化齐, 王尧, 董英, 孙萍萍. 2018. 中国城市地质调查进展与展望[J]. 西北地质, 51(4): 5–13.
- 张明泉, 高洪宣, 吴克俭. 1990. 兰州马滩水源地 NO₃ 污染环境条件分析[J]. 环境科学, (5): 79–82.
- 张小文, 何江涛, 刘丹丹, 倪泽华, 张昌延. 2018. 滹沱河冲洪积扇浅层地下水水质外界胁迫作用分析[J]. 水文地质工程地质, 45(5): 54–62.
- 张志斌, 公维民, 张怀林, 王凯佳, 赵航. 2019. 兰州市生产性服务业的空间集聚及其影响因素[J]. 经济地理, 39(9): 112–121.
- 周迅, 叶永红. 2014. 地下水舒卡列夫水化学分类法的改进及应用——以福建省晋江市地下水为例[J]. 华东地质, 35(4): 299–304.
- 朱亮, 孙继朝, 刘景涛, 刘俊建, 吕晓立. 2014. 兰州市城市化对地下水系统的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, (3): 111–115.