

宝羊灌区地下水的矿化度动态研究

蔚丽娜¹, 陈勇², 和留宪³, 马耀光¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 南京市水利规划设计院 江苏 南京 210006;
3. 咸阳市地下水监测管理站, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 对1982—2009年宝鸡峡—羊毛湾灌区的地下水的水化学特征、水位动态和水化学动态进行分析和水质调查, 采用 Pearson 指数法和逐步回归方法对地下水的矿化度与离子构成关系进行相关分析, 以揭示灌溉、黄土塬灌区外源引水、地下水开采与农业生产活动对地下水的水化学类型和水位、水质动态的影响及其演变规律。结果表明: 地下水的矿化度变化主要受阴离子(HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)控制, Cr(VI) 和 NO_3^- — N 是灌区地下水的主要污染威胁。同时, 针对灌区面临的水资源和水环境问题, 提出了水资源与农业生态环境的保育措施, 可为黄土塬灌区地下水资源的利用与保护提供借鉴。

关键词: 黄土塬灌区; 水位动态; 水化学动态; 相关性分析

中图分类号: S273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)02-0213-07

渭北黄土塬灌区地处关中盆地北部, 降水量偏少, 区域水资源严重不足^[1]。我国黄土塬灌区地下水化学动态变化规律的研究, 主要是在土壤盐碱化方面的研究, 目前处于世界前沿水平, 其中, 揭示土壤盐碱化成因问题的研究比较多, 包括地下水的离子演变规律^[2], 灌溉对地下水水质影响的途径及因素^[3-4], 黄土地下水水化学特征以及水质时空分布特征^[5-6]等问题, 同时也应用了多种方法和技术在不同土壤盐碱化地区建立各种不同预测模型^[7-8]。

近年来随着人口的增加与经济的快速发展, 使水资源需求量大幅增长, 导致地下水超采严重; 不合理的灌溉方式、过量的化肥使用以及缺乏水污染的有效控制, 严重影响着灌区地下水资源的水质、人畜饮水安全以及生态环境安全。因此对渭北黄土塬灌区地下水化学特征、水位动态、水质演变的研究, 有利于渭北黄土塬灌区地下水资源的科学管理和利用, 对地下水资源的可持续利用和农业生产有着十分重要的意义。

1 研究区概况与水化学特征

宝鸡峡和羊毛湾灌区位于渭北黄土台塬地区的中段, 面积 1 758.26 km², 设计灌溉面积 19.9 万 hm², 在气候、水文、地质地貌和水文地质方面具有独特性, 是一个相对完整的地貌和水文地质单元^[9]。

1971 年灌区相继运行以来, 区域水资源与水环境条件发生了巨大的变化, 其中乾县—礼泉灌域位于宝—羊灌区腹地, 1979 年以来积累了较为丰富的地下水动态资料, 选择该灌域作为典型区研究具有良好的代表性, 能够揭示渭北黄土塬灌区地下水资源特征及其演变规律。

按照水文地质条件的不同^[10]并且依据地形地貌条件, 将乾县—礼泉灌域分为三个亚区, 由北向南依次为: 山前倾斜平原区、中部塬间洼地区和南部台塬区, 山前倾斜平原区位于乾县中部和礼泉县县城至烟霞镇区域, 中部塬间洼地包括乾县南部和礼泉县中部区域, 南部台塬区包括礼泉县南部以及武功县贞元镇以南。利用 1982—2009 年的地下水位和水质监测资料, 选择对应亚区上监测资料相对丰富且能代表各亚区水文地质条件的三个监测井: 405[#] (位于礼泉县烟霞镇上营村)、408[#] (位于礼泉县新乡张神村)、B209[#] (位于武功县贞元镇小韩店村), 见图 1。

黄土塬灌区地下水的水化学类型多为 HCO_3^- — Na 型、 HCO_3^- — Na 、 Mg 型。近年来, SO_4 — Na 型水也出现较多, 水体中 Na^+ 含量较高, 反映出天然水质的形成作用普遍受到 Na^+ 的积极参与, 阴离子中 HCO_3^- 占很大优势, 局部区域 SO_4^{2-} 离子的含量也在不断升高, 表明人类生产活动及农业的有机污染也使地下水受到影响; 研究区东部的地下水矿化度

收稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(50879071)

作者简介: 蔚丽娜(1986—), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事水环境保护的研究。E-mail: nanacom_ok@126.com。

通讯作者: 马耀光(1957—), 男, 陕西武功人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水资源与水环境保护方面的教学和科研工作。E-mail: myg0609@yahoo.com.cn。

大于 600 mg/L,西部区域矿化度在 400 ~ 600 mg/L,矿化度在不同年份波动较大,但均小于 1 000 mg/L,属于淡水区,中部洼地浅埋区在蒸发排泄期可能形

成微咸水,南部台塬深埋区由于灌溉入渗补给导致水质发生混合淡化。

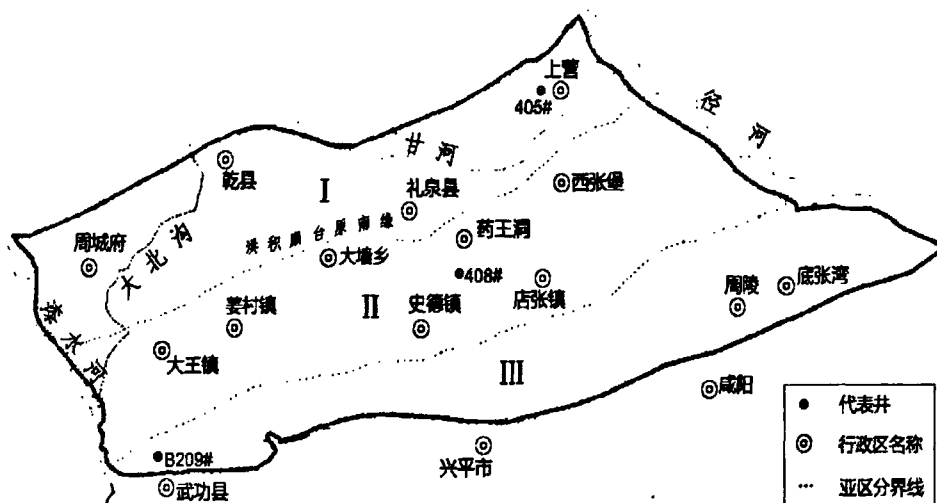


图 1 宝羊灌区示意图

Fig.1 The sketch map of the Baoyang Irrigation District

2 地下水位动态分析

根据陕西省地下水水位监测资料,得到各代表井地下水埋深动态变化曲线,见图 2。

山前倾斜平原区的 405# 井地下水位埋深变化于 20 ~ 40m 之间,属于地下水中埋区,其动态变化可明显分为三个阶段。1982—1984 年,地下水位快速上升,3 a 间上升 3.94 m,平均上升速度为 1.31 m/a,这是由于大量外源灌溉水入渗补给使地下水位持续上升;1986—1994 年 9 a 间水位保持相对稳定,这主要是水位上升使地下水径流排泄增强的原因所致。

1995—2009 年地下水位埋深由 20.73 m 下降至 36.97 m,平均下降速度为 1.08 m/a,这主要是由于灌区土地联产责任承包制的实施和农业经济多元化的迅速发展,对灌区外源引灌水量大幅减少,有些地方因水渍灾害和湖沼化而停止引灌;同时,由于地下水位的上升和新含水层的形成^[2],地下水资源的增加和开采条件的改善,对地下水需求逐年增加,地下水开采量逐年上升,导致水位逐年下降。水位动态类型由稳定的灌溉入渗—径流型转化为持续下降的降水入渗—开采型动态类型。

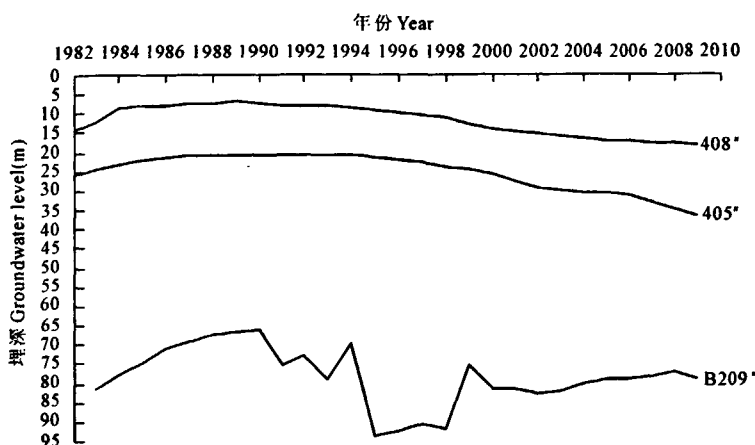


图 2 各代表井地下水埋深历年动态变化过程

Fig.2 Change line of groundwater level in representative wells in previous years

中部洼地区的 408# 井地下水位埋深变化于 5 ~ 20 m 之间,属于地下水浅埋区。由于相同的原因,

该区的地下水位动态也经历了相似的三个阶段。1982—1984年,地下水位以较快的速度持续上升,平均上升速度为0.96 m/a;1985—1994年,水位动态稳定;1995—2009年,地下水位逐年下降,平均下降速度为0.54 m/a。

B209*井位于南部台塬区,水位埋深大,平均埋深为80 m左右,属于地下水埋深区,多年来其变化过程较为剧烈,可分为三个阶段。1983—1990年,灌溉水集中补给导致地下水位快速上升阶段,平均上升速度为2.2 m/a;1991—1995年,由于灌区外源引灌水量大幅减少和地下水开采量的不断增加,导致地下水位在动荡中逐年下降,平均下降速度为2.0 m/a,水位动态类型由持续上升的灌溉入渗-径流型转化为持续下降的降水入渗-开采型动态类型;

1995年以后,由于地下水位深埋而开采成本较高,外源引水灌溉的恢复和稳定,使地下水深埋和侧向径流相对较弱的南部黄土塬灌区的地下水位动态,从动荡的持续下降转化为持续上升的灌溉入渗-开采型类型。

3 水化学动态及水质演变分析

3.1 矿化度动态

1) 山前倾斜平原区(以405*代表井为例)。该区域位于宝鸡峡塬上,根据宝鸡峡塬上渠首林家村断面历年逐月引水量统计资料^[11]得到该区域灌溉量数据。山前倾斜平原区灌溉、地下水埋深、矿化度、降水和蒸发的年际变化如图3。

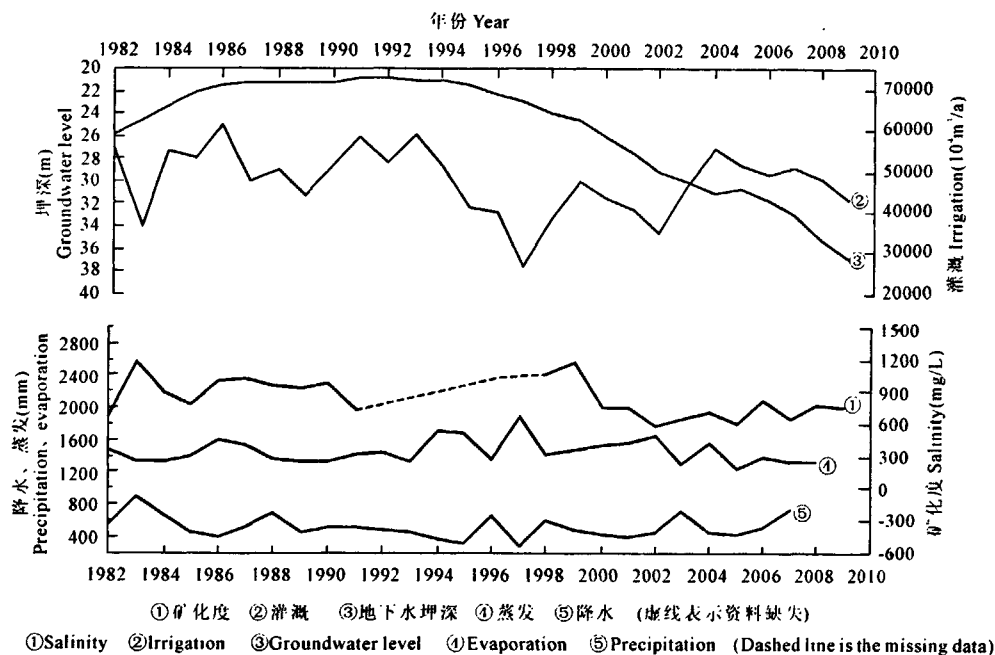


图3 山前倾斜平原区灌溉、降水、蒸发和地下水埋深对矿化度年际变化过程

Fig.3 Inter-annual salinity change line in the role of irrigation, precipitation, evaporation and groundwater level at piedmont clino plain

山前倾斜平原区地下水位埋深变化于21~37 m,年蒸发量多年平均1455.8 mm,年降雨量多年平均513.9 mm,干旱指数为2.83,是干旱区典型的降雨蒸发模式。该研究区灌溉和降水直接影响地下水水位,蒸发对地下水水位的影响较小。

1982—1993年,灌溉量呈现波动变化趋势,降雨量变化不大,地下水水位上升,矿化度总体下降,这是由于大量灌溉水进入地下水水体,将地下水逐渐稀释,发生水质淡化。其中,1986—1989年矿化度较高,主要是由于硝酸盐的含量过高,平均为135 mg/L。分析知,该期间内灌区氮肥使用过量,氮素随灌溉水入渗至地下水水体,使地下水中硝酸盐含量

增高,导致此期间内矿化度偏高。1990年后灌区开始控制氮肥使用,硝酸盐含量明显降低,目前,地下水体中硝酸盐含量现状调查为小于1 mg/L。

1994—2002年,灌溉量波动下降,降雨量减少,地下水水位以较快速度下降,矿化度受水位影响亦下降较快。这是由于灌溉量减少,随灌溉进入地下水体的盐分减少,导致矿化度下降,水质淡化。

2003—2009年,灌溉波动下降,降雨量增大,地下水位逐年下降,矿化度随之上升。这是因为地下水位下降到30 m后,盐分积累作用增强,矿化度开始上升,水质逐渐盐化,但仍未形成微咸水。

2) 中部洼地浅埋区(以408*代表井为例)。该

区域位于宝鸡峡塬上,根据宝鸡峡塬上渠首林家村断面历年逐月引水量统计资料^[11]得到该区域灌溉量数据。

中部洼地区灌溉、地下水埋深、降水和蒸发影响下的矿化度年际变化过程线如图 4。

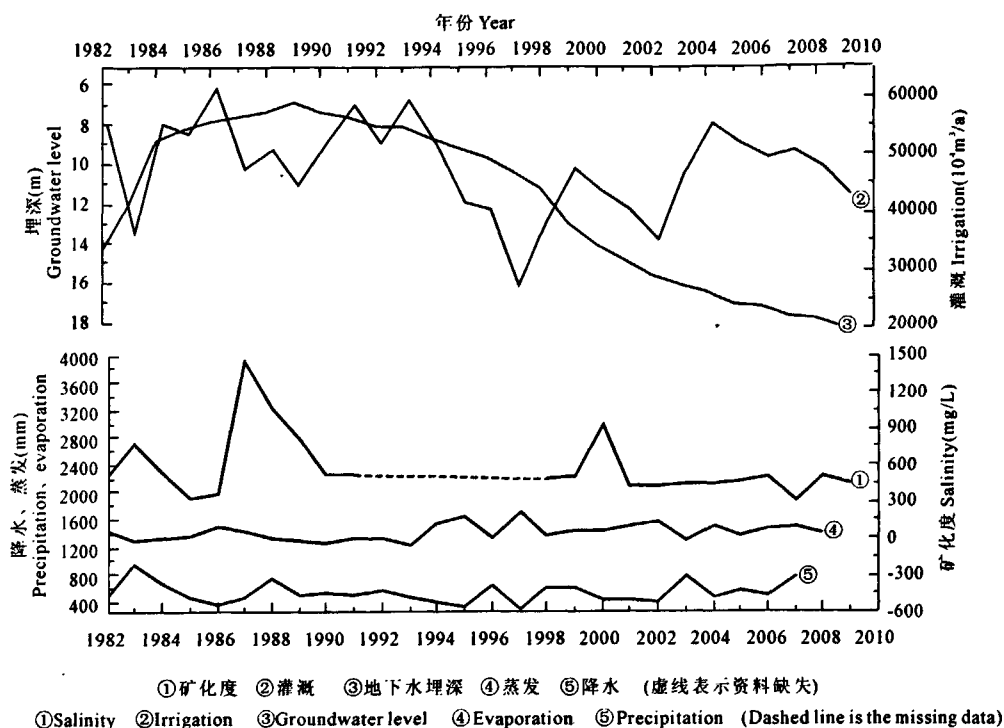


图 4 中部洼地区灌溉、降水、蒸发和地下水埋深影响下的矿化度年际变化过程线

Fig.4 Inter-annual salinity change line in the role of irrigation, precipitation, evaporation and groundwater level at middle depressions area

中部洼地区地下水位埋深变化于 6~18 m,年蒸发量多年平均 1414.2 mm,年降雨量多年平均 531.7 mm,干旱指数为 2.66。

1982—1993 年,灌溉量的增加使地下水水位不断上升,地下水处于浅埋、高水位期,地下水平均埋深 8.9 m,受蒸发影响较大,平均矿化度 746.9 mg/L,矿化度波动上升,地下水盐化趋势明显。如 1987 年,地下水埋深仅为 7.8 m,地下水受到强烈蒸发盐化作用,导致矿化度升高至 1453 mg/L,形成微咸水。需要指出的是,该期间内地下水中 NO_3^- 的含量非常高,是该区域的典型污染物,平均为 400 mg/L,表明该时期不合理的农业灌溉和施肥对地下水水质造成了严重的污染。

1994—2009 年,由于引灌水量波动下降,地下水水位持续下降,地下水平均埋深 13.5 m,平均矿化度 493.1 mg/L,地下水受蒸发影响变小,矿化度缓慢下降,水质逐渐淡化,同时,该期间内硝酸盐含量明显降低,现状调查为 1.91 mg/L,表明不合理的灌溉和化肥淋失对地下水质的不良影响显著减小。

3) 南部台塬区(以 B209# 代表井为例)。该区

域位于宝鸡峡塬下,根据宝鸡峡塬下渠首白杨树断面历年逐月引水量统计资料^[11]得到该区域灌溉量数据。

南部台塬区的灌溉、地下水埋深、降水和蒸发影响下的矿化度年际变化过程分别示于图 5。

南部平原区地下水位埋深变化于 75.67~91.78 m,年蒸发量多年平均为 1037.1 mm,年降雨量多年平均 583.7 mm,干旱指数为 1.78。

1998—2003 年,灌溉量波动上升,降雨量较小,地下水水位除 1999 年较高外,其他年份变化比较小,所以矿化度变化相对平稳,地下水水质处于相对平稳期。

2004—2007 年,引灌量逐年增大,地下水水位随之抬升,矿化度上升较快,这是由于黄土层含盐量较高,易溶盐分随灌溉水入渗至地下水水体中,使相对较淡的地下水中盐分增加,矿化度升高,水质发生盐化。

2007—2009 年,由于灌溉量的减少,上层土壤中随水分淋溶进入地下水体的盐分减少,使矿化度下降,水质随之淡化。

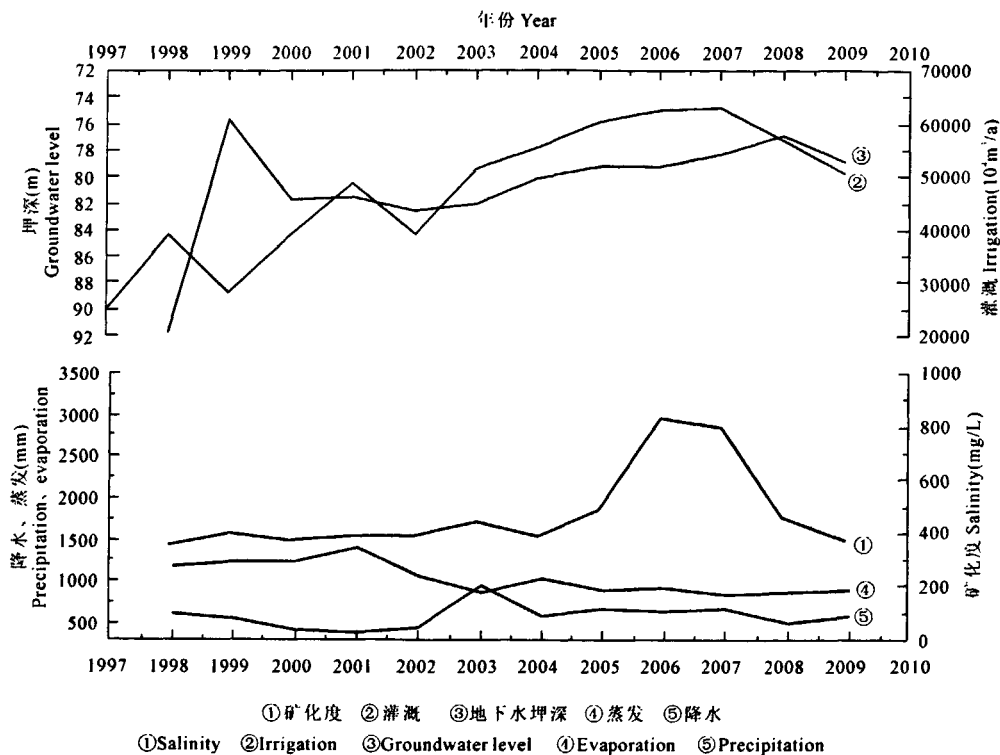


图 5 南部台塬区灌溉、降水、蒸发和地下水埋深对影响下的矿化度年际变化过程

Fig.5 Inter-annual salinity change line in the role of irrigation, precipitation, evaporation and groundwater level at loess platform

3.2 水化学相关性分析及水质污染调查

1) 矿化度与水质因子间的相关性分析^[12]。根据 1982—2009 年的水质指标监测数据,可知,地下

水主要的水质离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} ,采用 Pearson 指数分析矿化度与主要水质因子之间的相关性,结果见表 1。

表 1 矿化度与水质因子 Pearson 指数

Table 1 Water salinity and water quality factors' Pearson indexes

井号 Well number	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}
405 [*]	-0.057	0.321	0.594 [*]	0.536 ^{**}	0.231	-0.073
408 [*]	-0.139	0.845 ^{**}	0.192	0.93 ^{**}	0.933 ^{**}	0.532 [*]
B209 [*]	0.854 ^{**}	0.883 ^{**}	-0.134	0.954 ^{**}	0.935 ^{**}	0.758 ^{**}

注: * 表示 $P < 0.05$, 相关显著; ** 表示 $P < 0.01$, 相关极显著。

Note: * means $P < 0.05$, showing a significant correlation; ** means $P < 0.01$, showing a greatly significant correlation.

从表中可见,各水质因子与矿化度呈现正相关的占绝对优势,说明研究区的大部分区域大多数离子与矿化度变化是一致的。矿化度与 Ca^{2+} 离子除 B209[#] 井外,相关性均不显著。与 Mg^{2+} 矿化度在 B209[#] 和 408[#] 井均呈现极显著相关,而这 2 个井位于研究区西部区域,表明研究区西部区域 Mg^{2+} 盐的变化较为显著,对矿化度变化有较大影响。 Na^{+} 与矿化度只在 405[#] 井呈现显著相关,表明 Na 盐在研究区多年来变化不大,对矿化度变化的影响较小。 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 在研究区的大部区域均与矿化度变化呈显著相关(或极显著相关),表明阴离子在研究区大范围多年内的变化对矿化度的变化产生较大

影响。

利用 MINTAB 软件采用逐步回归分析方法建立矿化度与水质因子间的多元线性回归方程结果见表 2。各代表井对矿化度有显著影响的水质因子不尽相同。其中 Na^{+} 在代表井 405[#] 回归方程中被选入; Cl^{-} 和 HCO_3^{-} 在 3 个方程均入选, SO_4^{2-} 入选 408[#] 和 B209[#]。可见,研究区大部分区域矿化度变化受阴离子(Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^{-})影响,而 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 是农业化肥中常见成分,说明研究区的农业灌溉是造成矿化度变化的主要因素,此外,阳离子中的 Na^{+} 对山前倾斜平原区的矿化度变化颇有影响,而 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 对研究区矿化度变化的影响很小。

表 2 各代表井矿化度与各水质因子的多元回归方程

Table 2 Multiple regression equation of water salinity and water quality factors in representative wells

井号 Well number	回归方程 Regression equation	SD	R ²	水质指标 Water quality index	t 值 t-value	p 值 p-value
405 [#]	$Y_{\text{矿化度}} = 163.66 + 2.96C_{\text{Na}^+} + 3.019C_{\text{Cl}^-} - 0.39C_{\text{HCO}_3^-}$	169	0.563	Na ⁺	3.7	0.001
				Cl ⁻	2.1	0.048
				HCO ₃ ⁻	-2.06	0.051
408 [#]	$Y_{\text{矿化度}} = 147.5 + 1.23C_{\text{SO}_4^{2-}} + 0.57C_{\text{HCO}_3^-} + 1.47C_{\text{Cl}^-}$	33.9	0.962	SO ₄ ²⁻	2.78	0.024
				HCO ₃ ⁻	3.33	0.01
				Cl ⁻	2.57	0.033
B209 [#]	$Y_{\text{矿化度}} = 134.0 + 1.31C_{\text{Cl}^-} + 1.39C_{\text{SO}_4^{2-}} + 0.51C_{\text{HCO}_3^-}$	38.9	0.959	Cl ⁻	2.11	0.067
				SO ₄ ²⁻	1.39	0.031
				HCO ₃ ⁻	2.04	0.076

注:SD 表示标准差,R² 表示拟合度,t 值表示显著性检验值,p 值是置信度指标。

Note: SD means standard deviation, R² means fitting degree, t means significance test value, and p means confidence index.

2) 水质污染调查与评价。于 2011 年 3—4 月间对研究区进行了两次实地调研和分区水样采集,各采样点均匀分布于研究区内,共计 27 次样品。实验室分析了各水样中的 COD_{Mn}、Cr(VI)和 NO₃-N,其中,COD_{Mn}采用重铬酸钾法测定,Cr(VI)采取二苯碳酰二肼分光光度法测定,NO₃-N 采取紫外分光光度法测定,以《地下水环境质量标准》(GB/T14848-1993)为标准,分析结果如下:研究区 COD_{Mn}符合 I 类标准占 44.4%,II 类占 29.6%,III 类占 25.9%。Cr(VI)符合 II 类标准的占 3.7%,III 类占 51.9%,IV 类占 44.4%。NO₃-N 符合 I 类标准占 63%,II 类占 37%。可见研究区 Cr(VI)含量普遍较高,近一半地区 Cr(VI)超标,说明研究区工业污染物对地下水的污染较大;研究区普遍检出的 COD_{Mn}和 NO₃-N,说明农业灌溉和城镇生活产生的污染对地下水造成一定影响。

4 水资源与农业生态环境保护措施

通过对研究区地下水水质动态及其演变分析,灌区面临的水资源和水环境问题主要有以下几个方面:a)山前倾斜平原区和中部洼地区由于大量开采地下水,自 1992 年以来的 20 a 间,地下水水位以较快速度逐年下降;b)中部洼地区地下水水质受过量氮肥施用影响,水污染较为严重;c)研究区地下水中 Cr(VI)含量超标,普遍检出的 COD_{Mn}和 NO₃-N,表明研究区工农业和生活用水已经对地下水造成较大威胁。

针对研究区存在的水环境问题,需要采取相应的保育措施,修复和改善黄土塬灌区的水资源和水环境质量:a)山前倾斜平原区和中部洼地区应合理配置地表水和地下水资源,合理开采地下水,做到采

补平衡,保护地下水资源,防止形成地下水漏斗,影响灌区农业发展。b)中部洼地区必须合理使用化肥和农药,合理配置引灌水量和地下水开采量,控制地下水位埋深大于 10 m 以上,防止强烈蒸发使地下水发生盐化。c)针对研究区地下水中 Cr(VI)、NO₃-N 及 COD_{Mn}的污染状况,必须控制工业 Cr 污染源,科学控制化肥和农药使用量,大力推行清洁生产和节约用水,控制生活和工业废水排放量,防止地下水污染和水环境恶化。

5 结 论

1) 研究区矿化度小于 1 g/L,属于淡水区,水化学类型多为 HCO₃-Na 型和 HCO₃-Na.Mg 型。近年来,受灌溉入渗使地下水位上升和淋滤作用的影响,地下水质发生盐化;同时化肥的淋失和农业面源污染的影响,水化学类型向 HCO₃.SO₄-Na 型和 HCO₃.Cl-Na 型转化,并产生显著地肥水化过程。地下水的矿化度变化主要受阴离子(HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻)控制,阳离子以 Na⁺和 Mg²⁺对矿化度变化的贡献较大。

2) 灌区地下水水位动态为山前倾斜平原中埋区和中部洼地浅埋区由稳定的灌溉入渗-径流型转化为持续下降的降水入渗-开采型动态;南部平原深埋区由动荡的持续下降转化为持续上升的灌溉入渗-开采型动态;相应的水化学动态,山前倾斜平原区为灌溉-降雨淡化-蒸发浓缩型,中部洼地区是灌溉-降雨淡化-蒸发浓缩型,南部台塬区是灌溉入渗淡化型动态。

3) 灌区应合理开采地下水,防止形成地下水漏斗;严格控制化肥使用量和灌溉水质量,避免农业面源污染和土壤盐化;控制工业 Cr 污染源和生活氮污

染源的排放,防止地下水污染和水环境恶化。

参考文献:

- [1] 李佩成.黄土塬灌区三水转化机理及调控研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1999:10-23.
- [2] 马耀光,李书琴,和留宪,等.黄土原灌区地下水的离子演变规律[J].地下水,2003,24(3):151-153.
- [3] 马耀光,李大勇,许永功,等.黄土层中灌溉对尿素淋失特征的影响[J].水土保持学报,2003,17(4):113-117.
- [4] 康银红,马耀光,王巧焕.灌溉条件下包气带黄土层总 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的深部运移[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):147-150.
- [5] 陈立,张发旺,程彦培,等.宁夏海原盆地地下水水化学特征及其演化规律[J].现代地质,2009,23(1):9-14.
- [6] 王锐,刘文兆,赵小鹏,等.长武塬区地下水位动态特征分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):48-52.
- [7] 姜桂华,王文科,杨胜利.“三氮”黄土非饱和带迁移转化原位试验及数值模拟[J].吉林大学学报,2004,34(4):571-575.
- [8] 姜桂华,王文科.关中盆地包气带氮迁移转化数值模拟及预测[J].西北大学学报,2007,37(5):825-829.
- [9] 李丽.渭北黄土台塬灌区地下水形成条件及动态研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [10] 刘俊民.论渭北黄土台塬灌区新含水层地下水动态研究[C]//现代灌区人民探索.西安:陕西师大出版社,1992:582-585.
- [11] 杨芳.基于GIS的宝鸡峡灌区经济用水模式研究[D].西安:陕西师范大学,2008.
- [12] 欧亚波,李泽琴.地下水水质评价中相关性分析方法的应用[J].广东微量元素科学,2007,14(8):17-22.

Dynamic of salinity of groundwater in Baoyang Irrigation District

YU Li-na¹, CHEN Yong², HE Liu-xian³, MA Yao-guang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Nanjing Water Planning and Designing Institute, Nanjing, Jiangsu 210006, China;

3. Xianyang Groundwater Monitoring and Management Station, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: Based on the data of 1982—2009, we analyzed the chemical characteristics, dynamic of water level and water chemical properties of groundwater and investigated the water quality in Baoyang Irrigation District. Using Pearson index law and Stepwise regression analysis, we also analyzed the correlation between the groundwater salinity degree and ion composition, so as to reveal the effects of irrigation, external water diversion, groundwater exploitation and agricultural production activities on the groundwater water chemical type, water level and water quality dynamic in the loess tableland irrigation district. The results show that the groundwater salinity degree changes are mainly controlled by anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), and Cr(VI) and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ are the main threat of pollution to groundwater. Facing the problems of water resources and water environment in the district, we proposed some countermeasures for the conservation of water resources and ecological environment which may be used as reference to the protection and utilization of groundwater resources of loess tableland irrigation districts.

Keywords: irrigation district in loess tableland; dynamic of underground water level; dynamic of water quality; correlation analysis