

德州引黄灌区主要河系水化学空间特征分析*

张 芳^{1,2} 李发东^{2**} 李 静² 宋 帅² 蔡文静^{1,2} 常春平^{1***}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院 石家庄 050024;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101)

摘要 通过对德州引黄灌区主要河流及引黄灌渠水质的离子化学成分分析,探讨了引黄灌区地表水化学成分特点、水化学类型及其空间变化和主要离子来源,为长期观测引黄灌溉对该区地表水、地下水的水化学特征变化的影响及地表水、地下水的循环交换提供依据,同时为该区水环境评价以及水体污染防治提供理论指导。研究结果显示,该区地表水的 pH、电导率(EC)及各主要离子含量存在明显的空间差异。水体 pH 的变化范围为 7.65~9.34, 属弱碱性水; EC 的变化范围为 965~1 530 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$; 主要阴阳离子的浓度范围分别为: NO_3^- 1.32~60.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 SO_4^{2-} 53.41~781.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 HCO_3^- 143.35~823.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Cl^- 98.00~564.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Ca^{2+} 22.57~265.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Mg^{2+} 29.41~195.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Na^+ 103.20~472.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 K^+ 0.83~59.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。该研究区水化学类型以 $\text{Na}^+\cdot\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 水为主。各阴离子浓度的平均值 HCO_3^- (330.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> SO_4^{2-} (308.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> Cl^- (286.83 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> NO_3^- (29.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 阳离子浓度的平均值 Na^+ (236.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> Ca^{2+} (98.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> Mg^{2+} (82.62 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> K^+ (9.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。pH、 Cl^- 的最高值均出现在马颊河流域, 并且该流域 Mg^{2+} 浓度均值高于其他两个流域。德惠新河流域 EC、 NO_3^- 和 HCO_3^- 的均值最高。引黄灌渠的 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的平均浓度高于其他两个流域。通过 Piper 图分析得出, 不同小流域水体类型不同。对研究区灌溉水质评价结果显示, 该区地表水适合灌溉。经相关分析发现, 该研究区地表水中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均具有极显著的相关性, 此外, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Na^+ 与 K^+ 、 SO_4^{2-} 与 Cl^- 也显示出了极显著的相关性, 表明这些离子相互影响, 或者具有相同的来源, 受人类活动影响较大。

关键词 引黄灌区 离子特征 空间差异 水化学类型 水质评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)04-0487-07

Hydrochemical characteristics of surface water in main rivers of the irrigation districts in the downstream of Yellow River

ZHANG Fang^{1,2}, LI Fa-Dong², LI Jing², SONG Shuai², CAI Wen-Jing^{1,2}, CHANG Chun-Ping¹

(1. College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences; Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract This paper investigated spatial variations in chemical characteristics, hydrochemistry type and sources of major ions in water. It analyzed the composition of chemical ions in surface water of Majia River, Dehuixin River and Yinhuangguanqu of the irrigation districts in the downstream of Yellow River. The study attempted to lay the theoretical guidelines for long-term observation of hydrochemical changes of surface water and groundwater under irrigation from the Yellow River. In addition, the paper provided the scientific basis for evaluating water environment conditions and pollution prevention measures. The results showed that pH and electrical conductivity (EC) varied in space. Surface water in the study area was alkaline with pH range of 7.65~9.34. EC of the water samples was in the range of 965~1 530 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. The ranges of concentration of NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ were respectively 1.32~60.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 53.41~781.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 143.35~823.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 98.00~564.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 22.57~265.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

* 中国科学院“百人计划”项目资助

** 通讯作者: 李发东(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为生态水文与水环境, E-mail: lifadong@igsnrr.ac.cn; 常春平(1969—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为水土保持与荒漠化防治、环境影响评价与规划, E-mail: changchunping@126.com

张芳(1987—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源管理与水环境评价。E-mail: zhang870515@126.com

收稿日期: 2012-09-23 接受日期: 2012-12-27

29.41~195.50 mg·L⁻¹, 103.20~472.00 mg·L⁻¹ 和 0.83~59.05 mg·L⁻¹。The major ions and their average concentrations were as follows: HCO₃⁻(330.45 mg·L⁻¹)>SO₄²⁻(308.48 mg·L⁻¹)>Cl⁻(286.83 mg·L⁻¹)>NO₃⁻(29.60 mg·L⁻¹) and Na⁺(236.85 mg·L⁻¹)>Ca²⁺(98.15 mg·L⁻¹)>Mg²⁺(82.62 mg·L⁻¹)>K⁺(9.05 mg·L⁻¹)。The hydrochemical type of the surface water was Na⁺·Ca²⁺—HCO₃⁻·SO₄²⁻。The pH and Cl⁻ of Majia River along with mean Mg²⁺ concentration were highest in the three rivers. Mean EC, concentrations of NO₃⁻ and HCO₃⁻ were highest in Dehuixin River. Also mean concentrations of SO₄²⁻, Na⁺, Ca²⁺ and K⁺ for Yinhuangguanqu were higher than those for the other two rivers. The Piper diagrams suggested that the hydrochemical types of the surface waters were different for different rivers. Water assessment showed that water in study area was suitable for irrigation. Correlation analysis showed that Ca²⁺, Mg²⁺ and Na⁺ were significantly correlated with SO₄²⁻ and Cl⁻. Furthermore, Ca²⁺ and Mg²⁺, Na⁺ and K⁺, and SO₄²⁻ and Cl⁻ were significantly correlated. The results suggested inter-related influence or same source water ions in the region which were likely driven by human activity.

Key words Irrigation district of the downstream of Yellow River, Ion characteristics, Spatial variation, Hydrochemical type, Water assessment

(Received Sep. 23, 2012; accepted Dec. 27, 2012)

水是自然界最活跃的因素, 地表水体可以溶解或携带大气、土壤、岩石中的许多物质从而反映相关流域的物理化学过程和环境变化^[1]。河流水化学特征可以反映河流在自然条件下的水质状况^[2], 是研究河流水质的前提和基础, 是水环境科学研究的主要内容^[3]。河流主要离子的特性反映了其来源和流域风化速率, 其中化学风化速率对确定流域 CO₂ 消耗以及流域对全球气候变化的影响十分重要^[4]。研究河水地球化学特征, 可以获得有关流域的地表化学风化、气候地质特征、上地壳的平均化学组成, 以及化学元素在大陆–河流–海洋系统中循环的相关信息^[5–6], 为资源利用和生态环境建设提供理论指导和科学依据^[7–9]。

国际上河流水化学特征研究工作始于 19 世纪末, 如欧洲莱因河的水化学特征监测分析开始于 1875 年, 英国泰晤士河和法国塞纳河的水化学特征研究开始于 1890 年前后。最初的监测项目只有溶解氧、pH、粪便大肠杆菌等几项。最近 100 年来, 随着工业发展和河流水质污染加重, 水质监测项目呈指数增加。目前欧盟和美国环保局规定的水质监测项目已超过 100 项^[10]。

我国学者对河流离子化学的研究始于 20 世纪 60—70 年代, 分别从全国范围^[11–12]和区域范围对个别河流离子化学特征进行研究^[13–15]。这些研究从不同角度和尺度, 揭示了我国河流天然水化学成分形成和演变的基本规律。化学离子被认为是天然水中的“示踪剂”, 在一定程度上记录着水体的形成、转化及运移的历史^[16–17]。通过水体离子化学含量特征及空间分布的研究可确定河流溶质的地球化学来源与区域自然条件的关系^[18]。目前国内的研究多集中在长江、黄河、珠江等一些大流域的地球化学研究^[19–20], 对小流域的水文地球化学研究相对较少, 关于德州引黄灌区河流水体主要离子化学特征的研究尚少见报道。

德州地区有两大引黄灌区, 即潘庄灌区和李家岸灌区, 规划控制灌溉面积达 53.2 万 hm², 占全地区总耕地面积的 92%, 总设计引水能力 250 m^{3·s⁻¹。两灌区建成初期, 单纯为农业供水, 随着水利改革的不断深化, 为适应经济发展的需要, 已逐步变成具有灌溉补源、淤沙造地、工业供水、生活用水、引黄济津等综合服务功能的水利实体, 成为全地区工农生产和人民生活的命脉和基础产业。}

本研究对德州引黄灌区主要河流水体进行离子化学特征分析, 以获得该流域水文地球化学特征及其演变规律, 为长期观测引黄灌溉对该区域地表水、地下水水化学特征变化的影响及地表水、地下水的循环交换提供理论依据, 并为该区水资源合理利用、水环境保护以及水质评价工作提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究的德州引黄灌区的主要河流位于德州市境内。德州市位于黄河下游北岸, 山东省西北部, 东经 115°45'~117°36', 北纬 36°24'~38°0'之间。辖 1 区 2 市 8 县和两个经济开发区, 总面积 1.03 万 km², 人口 560 万^[21]。德州市为黄河冲积平原, 地势西南高、东北低, 属暖温带半湿润半干旱区, 年平均气温 14.1 ℃, 年均降水量 803.8 mm。流经德州引黄灌区的主要河流有黄河、卫运河、漳卫新河、徒骇河、德惠新河和马颊河(图 1)。该区引黄始于 1972 年, 引黄水占城市供水水源的 33.7%, 并成为该区主要水源。至 2009 年底, 有效灌溉面积为 441 600 hm², 其中地表水供水总量达 1.39×10^8 m³^[22]。

本研究的取样点主要集中在马颊河、德惠新河和中国科学院禹城农业综合试验站周围的引黄灌渠。

1.2 样品采集与分析方法

于 2010 年 3 月底到 4 月初对研究区内主要河流

24个样点的地表水进行取样(图1), 其中沿马颊河分布的样点有7个(21、20、11、4、6、7、10), 沿德惠新河分布的样点有6个(12、13、3、5、8、9), 沿禹城综合试验站附近的引黄灌渠分布的样点有9个(17、18、14、22、23、19、24、1、2), 沿黄河分布的取样点有2个(15、16)。

对各个取样点进行GPS定位, 现场测定pH、电导率(EC)和水温, 水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后, 用离子色谱仪(岛津, 日本)分析 Cl^- , 用连续流动分析仪(SKALAR SAN++, 荷兰)测定 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , 用硫酸滴定法测定 HCO_3^- 。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定水样中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 浓度。

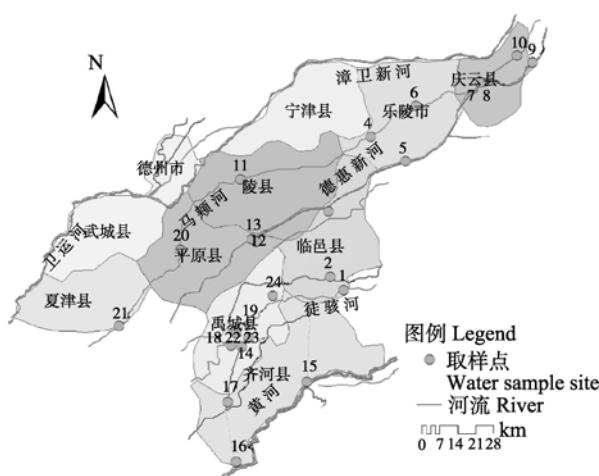


图1 德州引黄灌区样点分布图

Fig. 1 Water sample sites in irrigation districts in the downstream of Yellow River

2 结果与分析

2.1 研究区水体主要离子浓度

德州市地下水可划分为3个主要含水层组。第1含水层组: 浅层地下潜水, 埋深0~60 m, 含水层底板埋深30~50 m, 厚10~20 m。第2含水层组: 中层微承压咸水, 埋深60~200 m, 含水层厚度20 m左右。第3含水层组: 深层地下水, 埋深200~500 m内的地下淡水, 含水层厚度15~40 m。

地表水离子类型由地表水径流经历的岩性、径流速度、地球化学反应特征、人类活动等因素决定^[23]。由图2可知, 本研究区地表水pH的变化范围为7.65~9.34, 平均值为8.33, 属弱碱性水。其中马颊河流域地表水pH的均值最高(8.56), 且空间变异性大, 而引黄灌渠水体pH的均值最低(8.20)。EC均值最高($1364.33\text{ }\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)且空间变化最大的是德惠新河。该研究区各阴离子浓度的平均值 HCO_3^- ($330.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> SO_4^{2-} ($308.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> Cl^- ($286.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)>

NO_3^- ($29.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 阳离子浓度的平均值 Na^+ ($236.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> Ca^{2+} ($98.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> Mg^{2+} ($82.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)> K^+ ($9.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。总而言之, 该研究区域水体中 Cl^- 和 Na^+ 占优势, 其次是 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 。

2.2 德州引黄灌区主要河系水化学空间分布特征

通过对马颊河干渠(德州段)近5年的水质调查分析看出, 马颊河水质为超V类水, 主要污染项目为 COD_{cr} 、 BOD_5 , 其次是阴离子表面活性剂、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、总磷、氟化物。整个河段主要受到有机物的污染和非金属无机盐的污染, 污染情况上游入口较重, 中游稍好, 下游又加重。由图2可以看出, 研究区pH、 Cl^- 的最高值均出现在马颊河流域, 并且该流域 Mg^{2+} 浓度的均值高于其他两个流域。 NO_3^- 是反映人类活动的特征离子, 德惠新河流域EC、 NO_3^- 和 HCO_3^- 的均值最高, 这与德惠新河流域的污染有关, 德惠新河流域内不仅铸造、印刷业发达, 而且农业以奶牛、肉鸭、生猪、肉鸡养殖为主, 尤其是养殖业产生的废水及废渣直接排入河内。为了便于灌溉用水, 引黄灌渠大多分布在村镇周围, 距生活区较近, 所以不免被生活污水污染, 导致引黄灌渠 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的平均浓度高于其他两个流域(图2)。

水化学图是揭示水文地球化学规律的重要工具, Hill^[24]首先使用三线图对水化学类型进行描述。Piper在前人基础上对三线图进行修改形成了如今国内外广泛应用的Piper三线图^[25]。图3为马颊河、德惠新河及引黄灌渠的Piper三线图。由图3可以看出, 不同流域水化学类型不同, 马颊河流域为 $\text{Na}^+\cdot\text{Mg}^{2+}\cdot\text{SO}_4^{2-}\cdot\text{Cl}^-$ 型水体, 德惠新河流域为 $\text{Na}^+\cdot\text{K}^+\cdot\text{HCO}_3^-\cdot\text{Cl}^-$ 型水体, 引黄灌渠则属于 $\text{Na}^+\cdot\text{K}^+\cdot\text{Cl}^-\cdot\text{SO}_4^{2-}$ 型水体。该研究区属于黄河冲积平原, 气候、地质条件特征相似, 造成小流域水体类型不同的主要原因可能是人为因素的干扰。造成水体污染的主要人为原因是工业的快速发展^[26]。由于河流沿岸工农业的高速发展以及土壤的EC值偏高, 使流域内水体的离子浓度远高出自然水体本底值。

2.3 德州引黄灌区主要河系水化学类型的成因分析

由图4可知, 马颊河流域内阴离子变化幅度较大, 且规律性差, 但是除 HCO_3^- 的浓度在点11处最大外, 其他离子浓度的最大值都出现在点6处。点6处距乐陵市区较近(5 km), 生活污水排入量大, 这可能是该点离子含量均较高的主要原因。马颊河流域水体污染开始于20世纪70年代末80年代初期, 1985年左右开始变重。有资料显示, 地表水污染大多伴随着氯化物、硫酸盐等污染物的超标^[27]。调查显示, 向马颊河排放污水的支流有8处之多, 排

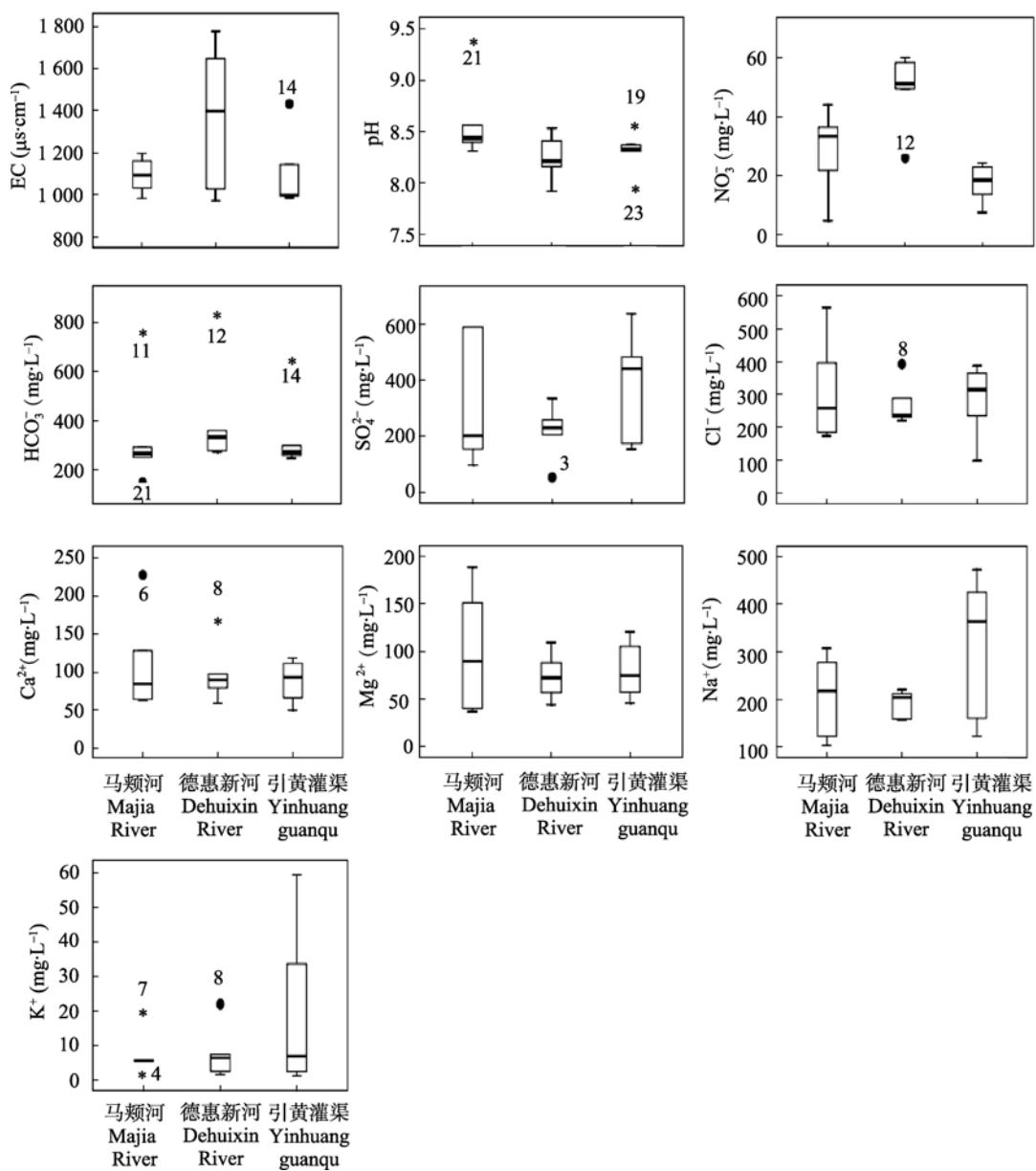


图 2 德州引黄灌区主要河系水体不同离子含量分布图

Fig. 2 Concentration of different ions of main rivers in irrigation districts in the downstream of Yellow River
“●”为离群值，“*”为奇异值，数字为出群值和奇异值的点位。“●” shows outliers, “*” shows singular values; numbers next them represent the sample point number of outliers or singular values.

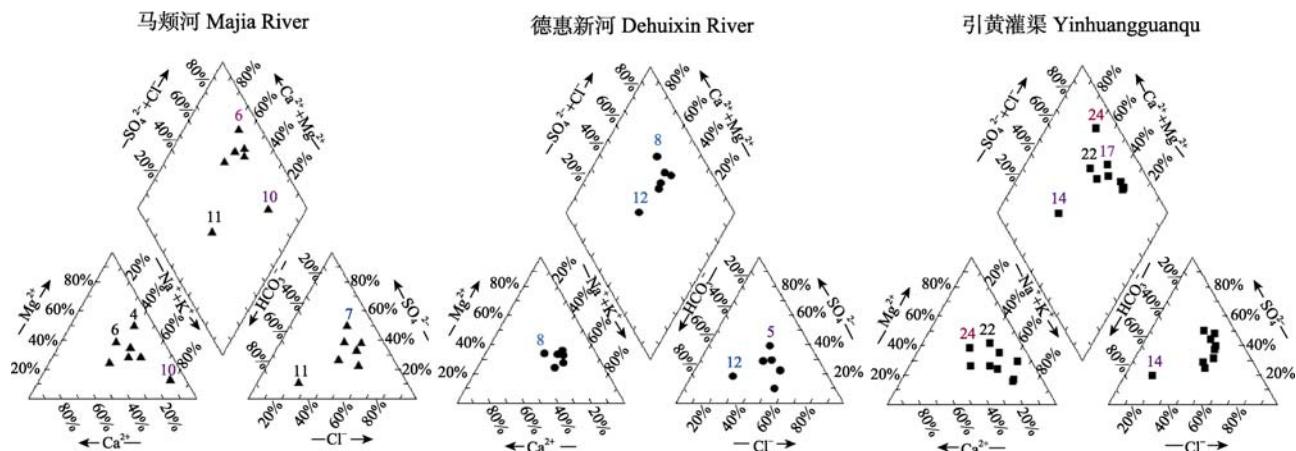


图 3 德州引黄灌区主要河系水体水化学类型图

Fig. 3 Piper diagrams of the water samples of main rivers in the irrigation districts in the downstream of the Yellow River
不同图标为取样点位 Different icons in the diagrams are different sampling sites.

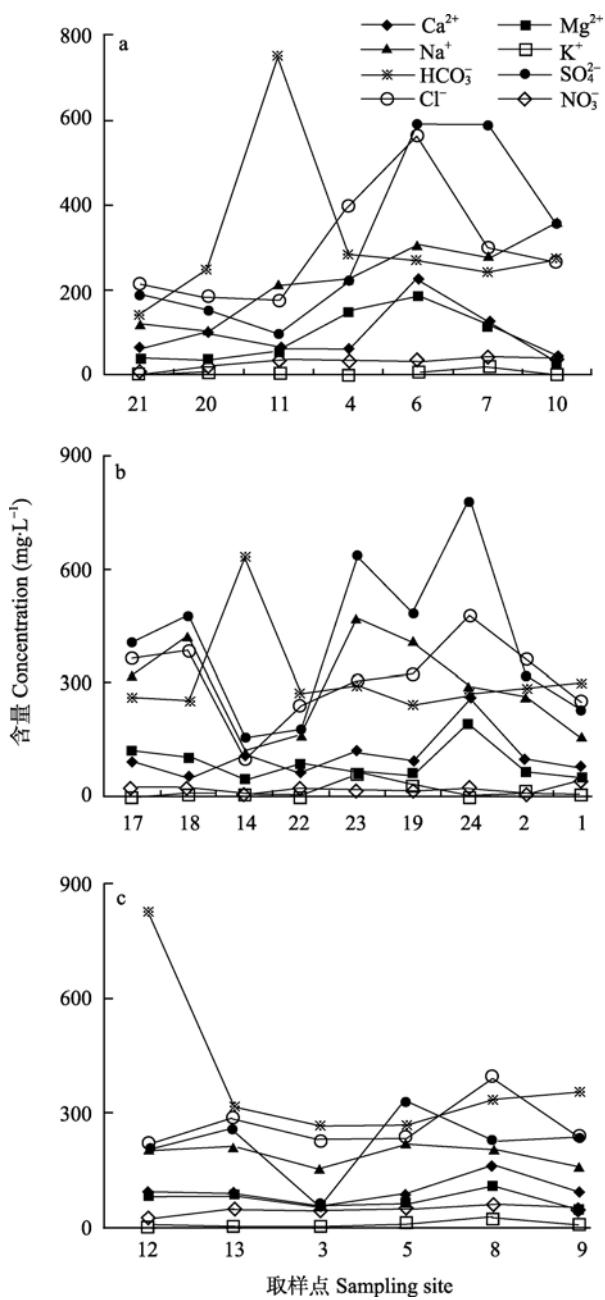


图4 德州引黄灌区马颊河(a)、德惠新河(b)和引黄灌渠(c)
水体离子含量变化趋势

Fig. 4 Change trends of ions concentrations in water from upstream to downstream of Majia River (a), Duhxin River (b) and Yinhuanquan (c) in the irrigation districts in the downstream of Yellow River

污单位主要是造纸厂和印刷厂。造纸厂和印刷厂用烧碱法和硫酸盐法蒸煮原料,产生大量黑色含有硫化物的废水,在漂白洗涤的废水中又有氯和碱的残留,这可能是造成该段流域内 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 含量较高且 pH 高于其他两个流域的原因。

德惠新河流域从上游至下游除 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度变化较大以外,其他离子的浓度变化相对平稳(图 4)。德惠新河是横贯德州市且污染严重的河流,河水 COD、氨氮浓度均长期超标,严重影响了沿岸

群众的生产和生活,且影响了下游以及海洋水质。河流上游的王凤楼造纸厂是该河段最大的污染源,此外该流域沿岸有大型养殖场,养殖场对水体的污染主要是有机物污染、微生物污染和有毒有害物污染。有机物污染主要是养殖场粪污中含有碳氢化合物及含氮、含磷有机物和未被消化的营养物质排放进水体,造成水体污染^[28]。作为氮在河水中的主要存在形式, NO_3^- 及其含量变化能指示人为活动对水体化学组成的影响^[29]。德惠新河流域 NO_3^- 的浓度在几个小流域内最大,由此可见,该河段水体受人类活动影响较大。

引黄灌渠水体中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度较高,而且浓度变化规律性差,但是 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 在点 24(房寺镇政府)处出现最高值。许多工业废水中含大量氯化物,特别是生活污水中由于人尿的排入而含 Cl^- 较高,所以在本底值很低的天然水体,浓度明显增加,指示着水体可能受到生活污水或工业废水的污染^[30]。这也说明,中国科学院禹城农业综合试验站附近的引黄灌渠正在受到工业和生活污染的威胁。

2.4 德州引黄灌区主要河系灌溉水质评价

灌溉水质会影响土壤和农作物,特别是在盐碱地区,盐分和 Na^+ 浓度可作为水体是否适用于灌溉的指标^[31]。灌溉水体中过量的盐分和 Na^+ 会对作物产生危害,如果水体中的 Na^+ 代替了土壤中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 会减弱土壤的渗透性造成土壤板结^[32-33]。为进一步了解该区地表水的水质及其是否适合用于灌溉,本文利用 Wilcox^[34-35]的灌溉水体分级方法将该区地表水进行分类。Wilcox^[34]利用 Na^+ 的比率和 EC 对灌溉水质进行分类,将灌溉水质分成 5 类,即非常好(excellent to good)、好(good to permissible)、允许使用(permissible to doubtful)、不太适合(doubtful to unsuitable)和不适合(unusable)。通过式(1)计算 Na^+ 比率:

$$\% \text{Na}^+ = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) \times 100\% \quad (1)$$

通过与 Wilcox 分类标准的对比,德州引黄灌区地表水体共分成 2 类,92% 的水样属于第二类,只有两个点(点 10 和点 19)属于第三类。总体来说,该研究区地表水体适用于灌溉,不会对土壤造成危害。

2.5 研究区域内水体 pH、EC 与主要离子之间的相关分析

通过对研究区域内水体 pH、EC 和主要离子之间进行的相关分析,可以看出,该研究区域内, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 都显示出与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 具有极显著的相关性,这表明阳离子可能主要来源于硫酸盐,与叶宏萌等^[36]的研究结果相一致。此外, SO_4^{2-} 与 Cl^- 也显示出了极显著的相关性(表 1),这表明 Cl^- 对水

表 1 德州引黄灌区主要河系水体 pH、EC 与主要离子之间的相关关系

Table 1 Correlation coefficients among major ions, pH and EC of surface water of main rivers in the irrigation districts in the downstream of Yellow River

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	pH	EC
Ca^{2+}	1	0.633**	0.143	0.155	-0.023	0.644**	0.618**	0.045	-0.212	0.192
Mg^{2+}		1	0.307	-0.118	-0.121	0.567**	0.812**	0.125	-0.168	-0.079
Na^+			1	0.574**	-0.179	0.757**	0.573**	-0.102	-0.225	-0.166
K^+				1	-0.086	0.441*	0.112	-0.133	-0.174	0.062
HCO_3^-					1	-0.295	-0.361	0.029	0.010	0.459*
SO_4^{2-}						1	0.715**	-0.077	-0.203	-0.093
Cl^-							1	0.113	-0.276	-0.014
NO_3^-								1	-0.154	0.210
pH									1	-0.391
EC										1

和*分别表示通过 $a=0.01$ 和 $a=0.05$ 显著性检验。 and * show significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

体的酸化和水质变化有影响。另外 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Na^+ 与 K^+ 也具有显著的相关性，其他阴离子之间的相关性不明显。这表明，这些离子在地质风化的过程中可能相互影响，同时又受人类活动的影响，具有相同的污染来源，如，造纸、冶炼等产生的工业废水、生活废水以及农药化肥的大量使用产生的面源污染。

3 结论

本文通过系统取样分析化验，并采用多种统计分析方法，较为详细地研究了德州引黄灌区不同小流域的离子化学特征。结果表明：该研究区域水体中 Cl^- 和 Na^+ 是占优势的离子，其次是 HCO_3^- 和 Mg^{2+} ，但不同小流域的水体类型不尽相同，马颊河流域为 $\text{Na}^+\cdot\text{Mg}^{2+}\text{-}\text{SO}_4^{2-}\cdot\text{Cl}^-$ 型水体，德惠新河流域为 $\text{Na}^+\cdot\text{K}^+\text{-}\text{HCO}_3^- \cdot\text{Cl}^-$ 型水体，引黄灌渠则属于 $\text{Na}^+\cdot\text{K}^+\text{-}\text{Cl}^- \cdot\text{SO}_4^{2-}$ 型水体。通过对该地区地表水进行水质评价，可以看出，该区水体适合灌溉。通过相关分析发现，该研究区域内， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 都显示出与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 具有极显著的相关性，此外， Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Na^+ 与 K^+ 、 SO_4^{2-} 与 Cl^- 也显示出了极显著的相关性，这表明，这些离子可能具有相同的来源，受人类活动影响较大。

参考文献

- [1] 罗建美, 霍永伟, 孙媛媛, 等. 赣南小流域地表水化学特性研究[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2007, 28(5): 63–70
Luo J M, Huo Y W, Sun Y Y, et al. Hydrochemistry of small catchment in the South of Jiangxi Province[J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2007, 28(5): 63–70
- [2] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J].
- Chemical Geology, 2004, 204(1/2): 1–21
- [3] 王双合, 胡兴林, 赵治文, 等. 甘肃省河流天然水化学特征的分布规律及控制因素分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 373–380
Wang S H, Hu X L, Zhao Z W, et al. The spatial pattern of natural hydrochemistry features of the rivers in Gansu Province and its controlling factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 373–380
- [4] Dalai T, Krishnaswami S, Sarin M M. Major ion chemistry in the headwaters of the Yamuna river system: Chemical weathering, its temperature dependence and CO_2 consumption in the Himalaya[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(19): 3397–3416
- [5] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, 36(9): 1061–1066
- [6] Drever J I. The geochemistry of natural waters[M]. New Jersey: Prentice-Hall Press, 1982: 388
- [7] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers[J]. Nature, 1982, 298(5874): 550–553
- [8] Huh Y, Tsou M Y, Zaitsev A, et al. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia: I. Tributaries of the Lena River draining the sedimentary platform of the Siberian Craton[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(10): 1657–1676
- [9] Elderfield H, Upstill-Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(4): 971–991
- [10] 陈静生. 陆地水水质变化研究国内外进展[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 10–15
Chen J S. Progress in research on Inland water quality changes in Domestic and Overseas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(1): 10–15
- [11] Martin J M, Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers[J]. Marine Chemistry, 1979, 7(3): 173–206
- [12] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质[M]. 北京: 科学出版社, 2006

- Chen J S. Principles of river water quality and Chinese river water quality[M]. Beijing: Science Press, 2006
- [13] 陈静生, 夏星辉. 我国河流水化学研究进展[J]. 地理科学, 1999, 19(4): 290–293
- Chen J S, Xia X H. Progress in research on river hydrochemistry in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(4): 290–293
- [14] 乐嘉祥, 王德春. 中国河流水化学特征[J]. 地理学报, 1963, 29(1): 1–13
- Yue J X, Wang D C. River water chemical characteristics in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1963, 29(1): 1–13
- [15] 刘亚传. 石羊河流域水化学特征分布规律及演变[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 348–356
- Liu Y C. Features, distribution law and evolution of hydrochemistry in the Shiyanghe River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1986, 6(4): 348–356
- [16] 余钟波. 流域分布式水文学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- Yu Z B. Principle and application of watershed distributed hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2008
- [17] 王光生, 宁方贵, 肖飞, 等. 实用水文预报方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- Wang G S, Ning F G, Xiao F, et al. Practical hydrological forecasting method[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008
- [18] 夏学齐, 杨忠芳, 王亚平, 等. 长江水系河水主要离子化学特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 194–202
- Xia X Q, Yang Z F, Wang Y P, et al. Major ion chemistry in the Yangtze River[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 194–202
- [19] 张利田, 陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 236–240
- Zhang L T, Chen J S. The relationship between the composition of the major ion of river of China and regional natural factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(3): 236–240
- [20] 陈静生, 关文荣, 夏星辉, 等. 长江中、上游水质变化趋势与环境酸化关系初探[J]. 环境科学学报, 1998, 18(3): 265–270
- Chen J S, Guan W R, Xia X H, et al. Evolution in water quality and its relation with environmental acidification in the upper and middle reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(3): 265–270
- [21] 刘兴慧. 山东统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010
- Liu X H. 2010 Shandong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010
- [22] 吴向东, 李发东, 郭建青, 等. 黄河下游引黄灌区主要河系硝态氮及铵态氮安全评价[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 114–117
- Wu X D, Li F D, Guo J Q, et al. Security evaluation of nitrate and ammonium nitrogen in main river reaches of irrigation districts in downstream of Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011, 22(4): 114–117
- [23] 温小虎, 仵彦卿, 常娟, 等. 黑河流域水化学空间分异特征分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(1): 1–6
- Wen X H, Wu Y Q, Chang J, et al. Analysis on the spatial differentiation of hydrochemical characteristics in the Heihe River watershed[J]. *Arid Zone Research*, 2004, 21(1): 1–6
- [24] Hill R A. Geochemical patterns in Coachella valley[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1940, 21(1): 46–49
- [25] Dalton M G, Upchurch S B. Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis[J]. *Ground Water*, 1978, 16(4): 228–233
- [26] Yang L H, Song X F, Zhang Y H, et al. A hydrochemical framework and water quality assessment of river water in the upper reaches of the Huai River Basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(7): 2142–2156
- [27] 刘林章, 江菊叶. 地表水污染及其防治[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 335–337
- Liu L Z, Jiang J Y. Surface water pollution and its preventing and controlling[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(4): 335–337
- [28] 布仁, 王学理. 畜禽养殖场污染及其治理对策的探讨[J]. 中国动物检疫, 2008, 25(10): 14–15
- Bu R, Wang X L. Exploration on livestock and poultry farm contamination[J]. *Chinese Journal of Animal Health Inspection*, 2008, 25(10): 14–15
- [29] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州乌江水系的水文地球化学研究[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 35–43
- Han G L, Liu C Q. Hydrogeochemistry of Wujiang River Water in Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 35–43
- [30] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987
- Chen J S. Water environmental chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987
- [31] Nishanthiny S C, Thushyanthy M, Barathithasan T, et al. Irrigation water quality based on hydro chemical analysis, Jaffna, Sri Lanka[J]. *American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Science*, 2010, 7(1): 100–102
- [32] Shaki A, Adeloye A. Evaluation of quantity and quality of irrigation water at Gadowa irrigation project in Murzuq basin, southwest Libya[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1/2): 193–201
- [33] Zhang B, Song X F, Zhang Y H, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China[J]. *Water Research*, 2012, 46(8): 2737–2748
- [34] Wilcox L V. Classification and use of irrigation waters[M]. US Department of Agriculture, 1955
- [35] Laboratory R S. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[M]. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954: 160
- [36] 叶宏萌, 袁旭音, 葛敏霞, 等. 太湖北部流域水化学特征及其控制因素[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 23–27
- Ye H M, Yuan X Y, Ge M X, et al. Water chemistry characteristics and controlling factors in the northern rivers in the Taihu Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 23–27