Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙，吴乾元，杜烨，黄南，陆韻，魏东斌，胡洪营

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年6月
第42卷 第6期
Vol.42 No.6

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第6期
2021年6月15日

目 次

白方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第6期 2021年6月
Vol.42, No.6 Jun., 2021

渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素

刘鑫[1], 向伟[1*], 司炳成[1,2]

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2.萨斯喀彻温大学土壤学系, 加拿大萨斯卡通市 S7N5A8)

摘要: 渭河和泾河流域是黄河流域的重要支流,了解这两个流域地下水的水质状况对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义. 本文利用 Piper 图、Gibbs 模型、Na 端元图和离子相关关系等方法,解释了两流域地下水水化学组成特征及其控制因素的特征与差异. 并利用 WQI 法、Wilcox 图、USSL 图和 Doneen 图等方法,评估研究区地下水水质的饮用和灌溉适宜性. 结果表明,渭河和泾河流域浅层地下水均以淡水为主,呈弱碱性; 除 Na^+ 外,渭河流域地下水离子浓度整体上均大于泾河流域; 两流域优势阴阳离子均为 HCO_3^- 和 Na^+; 渭河流域水化学类型以 HCO_3-Ca-Mg 为主,占 50%,而泾河流域以 HCO_3-Ca-Mg 和 HCO_3-Na-K 为主,各占 32.5%. 渭河和泾河流域水化学组成均主要受岩石风化作用控制,其中又以硅酸盐岩石风化为主; 其次,研究区地下水水化学组成受到工矿活动的影响,且农业活动中化肥的施用也是其重要的控制因素; 此外,渭河流域的浅层地下水水化学特征受到了明显的阳离子交替吸附作用的影响,而泾河流域有些地区却并不明显. 对于饮用水水质评价而言,两流域地下水水质整体较好,且泾河流域地下水整体上优于渭河流域; 根据 SSP、SAR 和 PI 指标对地下水作为灌溉水水质评价表明,研究区部分地区地下水不能直接进行灌溉,否则会造成盐害进而引起抑制植物生长,南部的水质优于北部; 此外, 3 种灌溉水质评判方法均表明泾河流域地下水作为灌溉水水质整体上优于渭河流域. 本研究能对渭河和泾河流域地下水水资源可持续利用、科学开发治理提供依据,并为黄土高原主要流域和其他类似地区水质管理及评价提供借鉴.

关键词: 地下水; 水质评价; 水化学; 黄土高原; 黄河流域; 渭河; 泾河

中图分类号: X523 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)06-2817-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202011068

Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments

LIU Xin[1], XIANG Wei[1*], SI Bing-cheng[1,2]

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Department of Soil Science, University of Saskatoon, SK S7N 5A8, Canada)

Abstract: The Weihe and Jinghe Rivers catchments are important tributaries of the Yellow River, where it is of great significance to evaluate groundwater hydrochemistry and quality for ecological protection and sustainable development. Piper diagrams, Gibbs, Na-normalized molar ratios, and ion correlation methods were used to analyze the chemical composition of groundwater in these two catchments. Furthermore, the WQI method, Wilcox diagrams, USSL diagrams, and Doneen diagrams were used to evaluate the suitability of groundwater quality for drinking and irrigation. The results showed that the Weihe and Jinghe River catchments are dominated by fresh and weakly alkaline water. Groundwater ion concentration in the Weihe River are higher than in Jinghe River except for Na^+, and the major groundwater types are HCO_3-Ca-Mg (accounted for 50%), and HCO_3-Ca-Mg and HCO_3-Na-K (accounted for 32.5%), respectively. The hydrochemistry of the Weihe and Jinghe River catchments is mainly controlled by rock weathering, primarily silicate weathering. Moreover, the groundwater chemistry in the research area is affected by mining and chemical fertilizer application for agriculture. Furthermore, the hydrochemistry of the Weihe River catchment is affected by cation exchange, although this was not obvious in some regions of the Jinghe River catchment. The overall groundwater quality of the two catchments was good, with the Jinghe River water quality being better than in the Weihe River catchment. Based on SSP, SAR, and PI, the groundwater in some parts of the study area cannot be directly used for irrigation as this would result in salinization and, thus, inhibit plant growth. Overall, the groundwater quality in the south of the study area is better than in the north, and is better in the Jinghe River catchment than in the Weihe River catchment according to these three indicators. This study provides a basis for the sustainable development of two catchments, providing baseline data for groundwater quality management.

Key words: groundwater; water quality assessment; hydrochemistry; Chinese Loess Plateau; Yellow River; Weihe River; Jinghe River

地下水是全球和区域水文循环的重要组成部分,对于维持水圈生态系统正常运转、工农业发展及人类生存具有重要意义[1~4]. 过去几十年,极度脆弱的生态环境和日益增加的人类活动,使得干旱半干旱的黄土高原地区地下水面临水量减少和水质恶化的双重威胁[5]. 渭河和泾河流域位于黄土高原中西部,处于干、湿两区过渡带上[6],是黄河流域的重

收稿日期: 2020-11-08; 修订日期: 2020-11-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(41877017, 41630860); 西北农林科技大学基本科研业务费(2452017317)
作者简介: 刘鑫(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水文,E-mail: Liuxin213@nwafu.edu.cn
* 通信作者,E-mail: xiangwei2016@126.com

要支流.然而两流域均面临矛盾极为突出的水资源供需和水质恶化问题[7],对其生态环境及社会发展造成了重要影响.因此,弄清渭河和泾河流域地下水水化学组成及控制因素是该地区地下水资源管理的关键,也是流域科学治理开发、水资源可持续利用的核心[8].

地下水补给是非常复杂的生态水文过程,受大气沉降、蒸发浓缩及岩石风化等多因素的影响[9].水化学组成可以反映气候变化[10]、土地利用类型[11]、人类活动[12]和岩石风化[13]对水文循环的影响,利用 Piper 图、Gibbs 模型、Na 端元图和离子相关关系可以表征流域地下水水化学组成特征及其控制因素[5].例如,张宏鑫等[14]利用地下水水化学和氢氧稳定同位素特征探究雷州半岛岭北地区水化学演化过程及控制因素.李军等[15]利用地下水水化学组成研究会仙岩溶湿地主要离子特征及成因分析.因此,分析研究区地下水水化学组成以探究流域水化学特征及控制因素,对于流域水资源管理具有重要指示意义.此外,由于渭河和泾河流域气候干旱少雨,且地表水水质不断恶化,因而该地区的生活用水和农业灌溉极大地依靠地下水水资源,其水质状况如何直接影响着当地的人类生存和社会发展[16].众所周知,地下水中的离子对于植物生长具有重要作用[17],然而当利用水质较差的地下水进行灌溉时,反而会造成抑制植物生长、破坏土壤结构或通透性的恶果[18].例如,Naser 等[19]在孟加拉国评估了各地区地下水水化学组成与其饮用者的收缩压和舒张压之间的关系.Wu 等[20]的研究发现中国西南喀斯特地区中 Ca^{2+} 含量过高会影响当地的植物群落的分布,尤其是在石灰性的土壤环境中.Munns 等[21]的研究发现 Na^+ 对植物生长具有重要作用,如 C_4 植物,但含量过高会抑制甚至对植物产生毒害作用.Xu 等[16]的研究发现长期使用富含 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的地下水灌溉,会改变土壤的渗透性,进而影响作物生长.因此,评价地下水水质的饮用和灌溉适宜性对于人类生存和农业灌溉具有重要意义.

对于黄土高原地区地下水而言,诸多研究主要关注于其水化学特征演化及其地下水补给来源与方式的研究,而对流域浅层地下水水化学组成及其控制因素和水质评价还缺乏相关的研究[22,23].本研究通过对渭河和泾河流域浅层地下水水化学组成进行分析,揭示了两流域的地球化学变化演化过程及形成机制,并评价其饮用和灌溉的适宜性,以期为渭河和泾河流域地下水水资源可持续利用及科学开发治理提供依据,并为黄土高原主要流域和其他类似地区水质管理及评价提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

渭河流域位于东经 103°55′ ~ 110°20′,北纬 33°40′ ~ 37°25′(图 1),是黄河流域最大的支流,干流全长 818 km,面积达 3.0×10^4 km^2,流域岩系主要包括古生界以来的碳酸盐、长石和铝硅酸盐等组成[24].该流域属于典型的大陆性季风气候,多年平均气温介于 6 ~ 13℃,年降水量介于 304 ~ 816 mm,多年平均降水量为 501.9 mm,年潜在蒸散量为 1 015 mm[25].地貌以黄土阶地区、黄土丘陵沟壑区、土石山区和河谷冲击平原为主,景观以农田,草地和林地为主[5].泾河流域位于东经 106°20′ ~ 108°42′,北纬 34°46′ ~ 37°19′,是渭河流域最大的支流,干流全长 455 km,面积达 4.3×10^4 km^2.也属于典型的大陆季风性气候,年平均气温为 8℃,年降水介于 350 ~ 600 mm,主要集中在 5 ~ 9 月(占全年总降水的 80%),年平均降水为 527.2 mm,年潜在蒸发量为 999.9 mm[26].流域地貌属于典型的黄土高塬沟壑区,景观以农地、草地和林地为主[27].

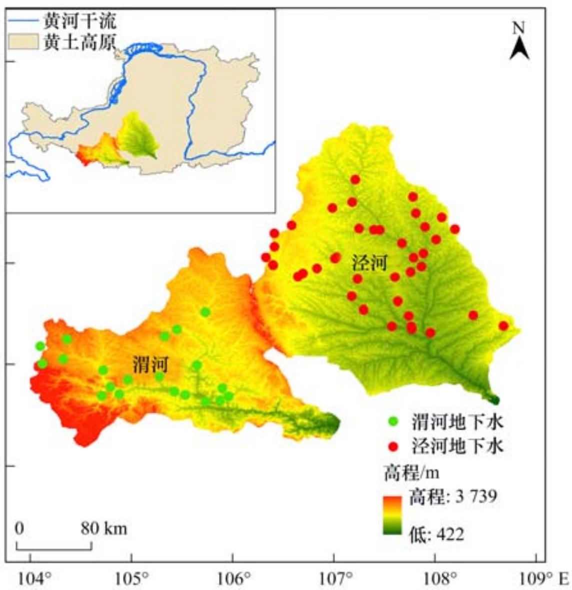

图 1 研究区地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Geographical location of the study area and the distribution of sampling sites

1.2 样品采集与测定

2019 年 6 ~ 7 月,在渭河和泾河流域各收集 20 和 40 个浅层地下水水样(主要为泉水和井水,井深大多小于 30 m),具体采样点分布状况如图 1 所示.取样时,首先经过仔细调查确定所取样品为浅层地下水,其次排除工业废水和生活污水等污染物的影响.此外,泉水是直接在泉眼处取样,而井水取样排除前期滞留的水,确保是新抽取的水.取样前先将性

质稳定、耐酸碱腐蚀的 250 mL 聚乙烯样品瓶充分涮洗,取样后立即密封瓶口,避免水样泄漏或被污染,并尽快将样品带回室内 4℃冷藏.

地下水 pH 测定使用梅特勒-托莱德 pH 计; 地下水总固体溶解量(TDS)和电导率(EC)使用梅特勒-托莱德 TDS 计测定; 地下水 K^+、Ca^{2+}、Na^+ 和 Mg^{2+} 的测定采用电感耦合等离子体发射光谱仪(USA, ThermoFisher Scientific, ICAP6300),精度为 20 μg·L^{-1}; 地下水 SO_4^{2-}、NO_3^- 和 Cl^- 测定采用离子色谱仪(USA, ThermoFisher Scientific, ICS-1100),精度为 20 μg·L^{-1}; 地下水 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用酸碱平衡法测定. 以上所有实验分析均在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院进行.

1.3 数据分析

1.3.1 地下水离子影响因素

首先利用 Piper 图分析地下水的水化学类型[28]. 其次,利用 Gibbs 模型定性判断地下水水化学组成的来源,包括蒸发浓缩、岩石风化和大气输入[9],并利用 Na 端元图分析地下水中 Ca^{2+}/Na^+ 与 HCO_3^-/Na^+、Mg^{2+}/Na^+ 元素比值差异以判断不同岩性岩石对地下水化学特征的影响,如硅酸盐岩、碳酸盐岩及蒸发盐岩[5]. 此外,利用 SO_4^{2-}/Ca^{2+} 与 NO_3^-/Ca^{2+} 相对关系可以分析人类活动对地下水中离子的影响[29],并利用 Cl^- 与 NO_3^- 的相对关系可以提供硝酸根来源的证据[30]. 最后,利用指标 A(指标 $A = Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}$)与指标 B(指标 $B = Na^+ - Cl^-$)的相关比值判断是否发生阳离子交替吸附作用[31].

1.3.2 地下水水质评价

首先,本研究根据《地下水质量标准》GB/T 14848-2017,采用 WQI 法对两流域浅层地下水进行饮用适宜性评价:

$$WQI = \sum \left[W_i \times \left(\frac{c_i}{S_i} \right) \times 100 \right] \qquad (1)$$

式中,i 表示样品编号; $W_i = w_i \Big/ \sum w_i$ 表示各参数权重的相对比例; w_i 表示参数的权重,其依据各参数对人体健康影响程度进行取值[32],本研究所选取参数及其取值如表1所示; c_i 表示各参数的测定值[33]; S_i 表示世界卫生组织 WHO 的离子浓度标准[33, 34]. 根据各样品的 WQI 值将地下水分为 5 类[34, 35]: Ⅰ类(WQI < 50)、Ⅱ类(50 ≤ WQI < 100)、Ⅲ类(100 ≤ WQI < 200)、Ⅳ类(200 ≤ WQI < 300),和Ⅴ类(WQI ≥ 300),其中Ⅰ～Ⅲ类地下水可直接饮用.

表 1　WQI 法中不同指标的 w_i、W_i 和 S_i 参数

Table 1　Parameter values of w_i, W_i, and S_i for different indicators in the WQI method

参数	pH	TDS	EC	Ca^{2+}	$K^+ + Na^+$	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-
w_i	3	5	4	3	2	3	4	3	5	3
W_i	0.085 7	0.142 9	0.114 3	0.085 7	0.057 1	0.085 7	0.114 3	0.085 7	0.142 9	0.085 7
S_i	8.5	1 000	1 500	200	200	150	250	250	20	500

其次,利用 Wilcox 图(钠百分比和 EC)分析地下水水质对土壤和作物的影响,进行灌溉水水质分类[36]. 另外,利用 USSL 图中钠吸附比与 EC 的相关关系,综合考虑地下水碱害与盐害对土壤的影响[16]. 最后,利用 Doneen 图(总盐浓度和渗透率)评估地下水中的矿物离子对土壤的渗透性的影响,以反映灌溉的适宜性[37].

$$SSP = \frac{(Na^+ + K^+) \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \qquad (2)$$

$$SAR = Na^+ \Big/ \sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}} \qquad (3)$$

$$PI = \frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}) \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \qquad (4)$$

式中,SSP 表示钠百分比,SAR 表示钠吸附比,PI 表示渗透率,离子单位为meq·L^{-1}.

2 结果与讨论

2.1 地下水基本参数特征

在空间分布上,渭河流域浅层地下水 pH 明显小于泾河流域,而 TDS 整体上大于泾河流域[图 2(a)～2(b)]. 两流域浅层地下水均呈弱碱性,以泾河流域西部 pH 最大,南部其次,而渭河流域中部地区最小[图 2(a)],渭河流域地下水 pH 介于 7.36～8.02,平均值为 7.63; 泾河流域地下水 pH 介于 7.43～8.53,平均值为 7.82(表 2). 由图 2(b)可知,渭河流域 TDS 整体上大于泾河流域,其中以渭河流域中部及泾河流域北部最大,而泾河流域南部最小; 渭河流域地下水以淡水(TDS < 1 000 mg·L^{-1})为主,占 60%,同时微咸水(1 000 < TDS < 3 000 mg·L^{-1})和咸水(3 000 mg·L^{-1} < TDS)各占 35% 和 5%,该流域 TDS 介于 232～5 320 mg·L^{-1},平均值为 1 234 mg·L^{-1},远大于该流域地表径流的 664 mg·L^{-1}[5]; 泾河流域地下水淡水占比更高,达 87.5%,此外,微咸水和咸水各占 10% 和 2.5%,该地区流域 TDS 介于2 227～5 460 mg·L^{-1},平均值为 712 mg·L^{-1},也明显高于该流域地表径流的 287 mg·L^{-1}[38]. 此外,渭河流域总阳离子电荷(TZ$^+$ =

$Na^{+}+K^{+}+2Mg^{2+}+2Ca^{2+}$）介于 3 ~ 76 meq·$L^{-1}$，平均值为 17 meq·$L^{-1}$；总阴离子电荷（$TZ^{-}=NO_3^{-}+Cl^{-}+2SO_4^{2-}+HCO_3^{-}$）介于 3 ~ 81 meq·$L^{-1}$，平均值为 18 meq·$L^{-1}$；泾河流域 TZ^{+} 介于 5 ~ 46 meq·L^{-1}，平均值为 12 meq·L^{-1}；TZ^{-} 介于 5 ~ 50 meq·L^{-1}，平均值为 14 meq·L^{-1}，$R^2=0.92$，说明两流域的 TZ^{+} 和 TZ^{-} 值有较好的相关性，也表明了本研究数据的可靠性.

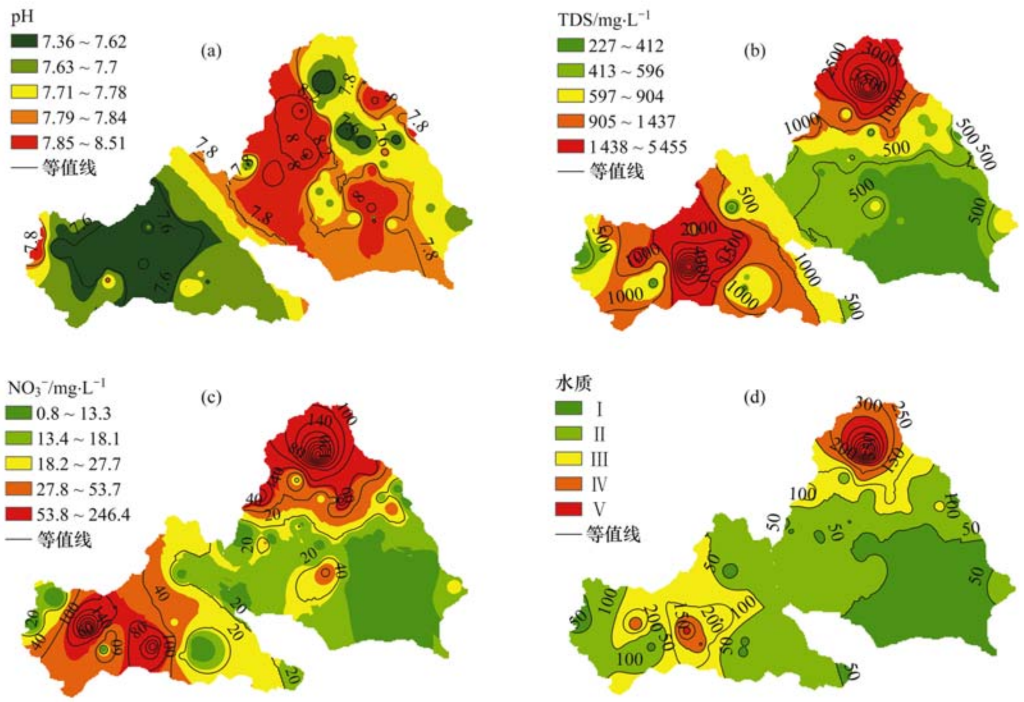

图 2 渭河和泾河流域浅层地下水化学参数及主要离子的空间分布

Fig. 2 Spatial variations of chemical parameters and major ions in shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments

表 2 渭河和泾河流域浅层地下水基本参数和水化学组成统计特征

Table 2 Analytical results of shallow groundwater parameters and chemistry in the Weihe and Jinghe River catchments

流域	项目	pH	TDS /mg·L^{-1}	Cl^{-} /mg·L^{-1}	SO_4^{2-} /mg·L^{-1}	NO_3^{-} /mg·L^{-1}	HCO_3^{-} /mg·L^{-1}	Ca^{2+} /mg·L^{-1}	K^{+} /mg·L^{-1}	Mg^{2+} /mg·L^{-1}	Na^{+} /mg·L^{-1}
渭河	最小值	7.36	232	3.0	10.3	0.8	157.7	39.4	0.5	5.3	3.4
	最大值	8.02	5 320	1 306.4	1 807.2	172.6	561.8	225.2	12.0	234.0	1 041.2
	平均值	7.63	1 234	189.6	295.1	38.9	356.4	87.6	4.9	52.8	191.8
	标准偏差	0.16	1 222	308.0	427.8	44.5	107.9	46.0	3.3	56.4	249.2
泾河	最小值	7.43	227	3.0	3.4	0.0	9.5	11.4	0.4	7.2	17.3
	最大值	8.53	5 460	1 913.9	3 802.3	246.6	1 135.7	387.8	12.7	519.2	1 311.0
	平均值	7.82	712	190.9	274.7	31.0	349.2	54.7	3.2	53.4	176.3
	标准偏差	0.23	864	365.8	615.8	44.1	175.2	59.4	2.3	86.0	221.2

2.2 地下水离子特征及控制因素

渭河与泾河流域地下水阴阳离子按浓度大小排序均呈现：阴离子 $HCO_3^{-}>SO_4^{2-}>Cl^{-}>NO_3^{-}$，阳离子 $Na^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+}$，泾河流域除 Na^{+} 浓度高于渭河外，其余离子均比渭河低(图 3). 两流域的优势阴离子均为 HCO_3^{-}，各自占该流域地下水阴离子总量的 40% 和 41%；同时优势阳离子均为 Na^{+}，各自占该流域地下水阳离子总量的 57% 和 61%（表 2），这与黄土高原地区主要流域地下水的研究观测结果相同[23]. 地下水中优势阴离子为 HCO_3^{-}，这可能与研究区黄土中富含丰富的碳酸盐有关[39]. 根据 Piper 图（图 4），渭河流域 4 种地下水水类型 HCO_3-Ca-Mg、HCO_3-Na-K、Cl-SO_4-Na-K 和 Cl-SO_4-Ca-Mg 分别占比 50%、10%、15% 和 25%，同时泾河分别占比 32.5%、32.5%、12.5% 和 22.5%，地下水水化学类型由北部的 Cl-SO_4-Ca-Mg 逐渐向南部的 HCO_3-Ca-Mg和 HCO_3-Na-K 转变，原因在于地下水流经的环境由厚厚的黄土层逐渐转变为富含硅酸盐的地层，地下水运移过程经过一系列的水岩作用逐渐引起地下水中的 Na^{+} 富集[40]. 此外，不难发现 Piper 图中泾河流域地下水较渭河流域更为分散，表明其地下水水化学特征变异较大，受到更多因素的影响[13].

通过图 5(a) ~ 5(b) 可知，研究区渭河流域取

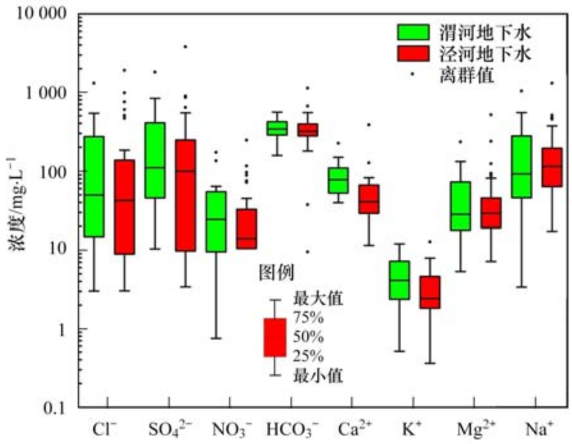

图 3　渭河和泾河流域浅层地下水主要离子浓度箱型图

Fig. 3　Box plots of major ions in shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments

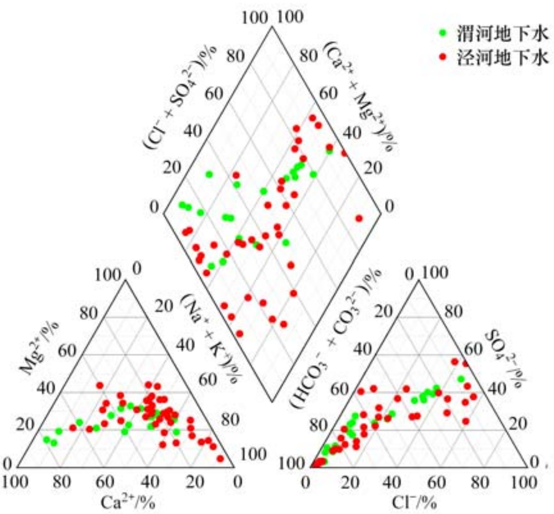

图 4　渭河和泾河流域浅层地下水 Piper 三线图

Fig. 4　Ternary diagrams for ions in shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments

样点大多分布在泾河之上，表明渭河流域的地下水矿化度高于泾河. 其次，大多数取样点均位于岩石风化区，说明研究区地下水水化学组成主要受岩石风化作用的控制. 值得注意的是，一些点位于蒸发浓缩区，表明蒸发浓缩也对研究区的地下水水化学特征起了重要影响，而取样点均远离大气沉降区域，说明大气降水对地下水水化学的影响较小. 此外，可以发现泾河流域部分取样点位于三角区域外，这些样点均具有较高 NO_3^- 含量，表明其水化学特征可能受到人类活动的直接影响[13]. 根据 Ca^{2+}/Na^+ 与 HCO_3^-/Na^+、Mg^{2+}/Na^+ 元素比值差异可以发现[图 5(c) ~5(d)]，地下水取样点分布以硅酸盐岩分布为中心，向蒸发盐岩和碳酸盐岩两端延伸，表明研究区的地下水水化学特征主要受硅酸盐岩风化的控制，同时蒸发盐岩和碳酸盐岩也起了重要的作用，这与研究区分布大量的硅酸盐类岩石有关，如页岩或泥板岩等[40].

根据图 6(a)可知，许多取样点的 SO_4^{2-}/Ca^{2+} 比值高于 NO_3^-/Ca^{2+}，表明受到工矿活动影响较大，这与研究区上世纪 80 年代以来快速工业化及大规模采矿活动是相关的[5]. 同时，可以发现许多采样点也受到农业活动以及生活污水的影响，这与该地区农耕活动较为发达是吻合的. 此外，根据生活污水、粪便及肥料中不同 NO_3^- 与 Cl^- 的比值关系[41]，从图 6(b)可以发现大部分地下水取样点聚集在肥料周围，表明肥料是控制研究区水化学成分的主要因素，这与黄河干流[42]和渭河[5]地表水流域的研究是一致的，同时一些点落在三角区域以外，可能是受到其他因素的影响[16]. 值得注意的是，研究区在 1980 年后才开始进行大规模施用化肥[43]，而本研究中许多地下水取样点中 NO_3^- 含量较高[图 2(c)]，远超饮用水标准值的 20 $mg \cdot L^{-1}$[13]，说明研究区地下水受到化肥施用的影响. 而研究表明黄土高原地区地下水补给过程是非常缓慢的[1]，因此在以后的研究中可以利用 NO_3^- 变化特征，进一步探究地下水补给机制，以期更全面地了解该地区地下水补给特征及水质演化过程. 此外，从图 6(c)可知，研究区渭河全部和泾河大部分取样点均位于阳离子交换区，说明研究区地下水在运移过程中发生了强烈的阳离子交替吸附作用，同时泾河流域部分取样点较为分散，说明这些地区地下水该作用并不明显. 此外，进一步分析可知，渭河流域地下水指标 A(Ca^{2+} + Mg^{2+} −

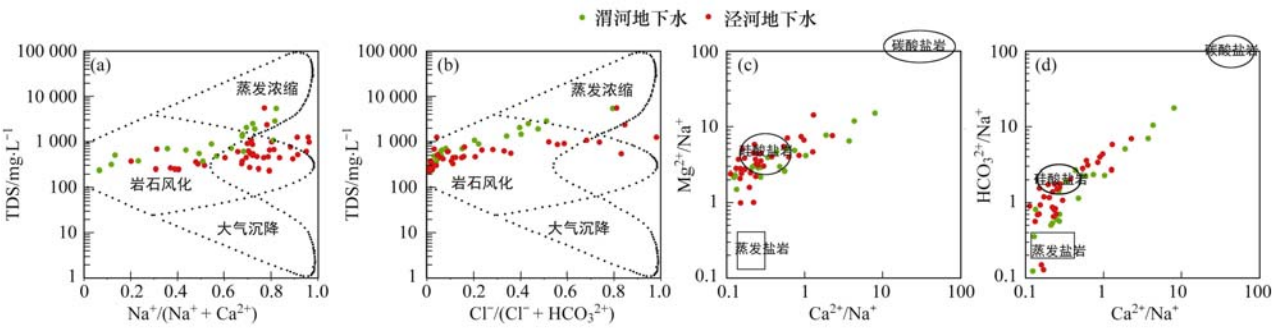

图 5　渭河和泾河流域浅层地下水 Gibbs 和 Na 端元

Fig. 5　Gibbs diagram and Na-normalized molar ratios of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments

$HCO_3^- - SO_4^{2-}$)与指标 B($Na^+ - Cl^-$)拟合方程为:指标 A = -1.17×指标 B + 0.29, R^2 = 0.92;而泾河流域为:指标 A = -0.49×指标 B - 3.28, R^2 = 0.24,渭河流域拟合方程的斜率非常接近 -1[44],更深入地说明了渭河流域地下水在运移过程中发生了非常明显的阳离子交替吸附作用,进而引起了该地区地下水中 Na^+富集.而泾河流域部分地区取样点却没有发生阳离子交替吸附作用,这可能是由于其他外来物源的影响,如人类活动和钠铝硅酸盐的溶解等[45].

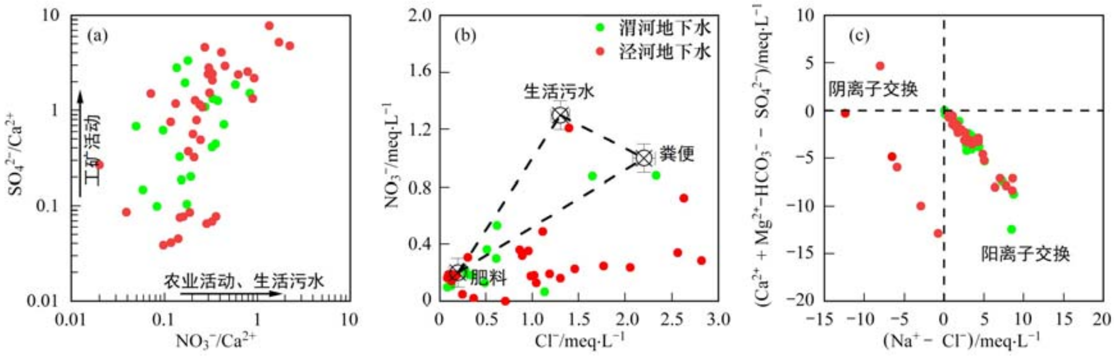

图 6 渭河和泾河流域浅层地下水离子相关关系

Fig. 6 Ion correlation diagram of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments

2.3 地下水饮用及灌溉适宜性评价

2.3.1 地下水饮用适宜性评价

根据图 2(d)可知,渭河流域中部水质最差,泾河流域由北向南水质逐渐好转.根据 WQI 法计算可知,研究区地下水水质整体较好,大多数地区地下水可以作为直接饮用水来源,且泾河流域地下水整体上优于渭河流域.其中渭河流域Ⅰ~Ⅲ类地下水占比 80%(Ⅰ~Ⅲ类分别占比 30%、35% 和 15%),Ⅳ~Ⅴ类地下水占比 20%(Ⅳ和Ⅴ类分别占比 15% 和 5%),而泾河流域Ⅰ~Ⅲ类地下水占比 90%(Ⅰ~Ⅲ类分别占比 42.5%、35% 和 12.5%),Ⅳ~Ⅴ类地下水占比 10%(Ⅳ和Ⅴ类分别占比 7.5% 和 2.5%).此外,对比图 2(c)~2(d)可以发现,水质较差的地区 NO_3^- 含量也较高,表明人类活动对地下水水质有重要的影响.

2.3.2 地下水灌溉适宜性评价

水质评估在农业灌溉中起着重要的作用,对研究区地下水进行灌溉适宜性评估主要采用以下 3 种重要指标(SSP、SAR 和 PI)[16].首先,钠百分比 SSP 是钠危害的重要指标,其含量过高会对土壤结构、通透性以及渗透产生重要的影响[46],流域地下水水质根据 SSP 值可以分为 5 类[36]:优秀(SSP < 20%)、良好(20% ≤ SSP < 40%)、一般(40% ≤ SSP < 60%)、较差(60% ≤ SSP < 80%)和极差(80% ≤ SSP).渭河流域浅层地下水 SSP 值介于 6.41%~64.08%,平均值为 38.49%;泾河流域 SSP 值介于 15.28%~91.33%,平均值为 49.48%.此外,根据 Wilcox 图可知(图 7),渭河流域位于水质优秀区、良好区、可接受区、保留区及不适宜区的取样点分别占比 20%、40%、5%、15% 和 20%,而泾河流域分别为 32.5%、35%、17.5%、10% 和 5%,表明两条流域大部分地区地下水是可以直接灌溉的,并且泾河流域的灌溉水水质整体上是优于渭河流域.然而值得注意的是,渭河流域 35% 的取样点,泾河流域 15% 的取样点处于水质保留区及不适宜区,表明了这些采样地区的地下水不可直接用于灌溉,否则会对土壤和作物带来危害[16];其次,采样点较高的 Na^+ 含量最可能就是地下水运移过程中发生了强烈的水-岩作用,通过阳离子交替吸附作用,引起地下水中 Na^+的富集;此外,农业活动也会增加地下水中 Na^+的含量[47].此外,空间上水质较差的水样主要集中在流域北部,南部的水质相对较好,这可能与当地生态环境及气象因素有关[25].

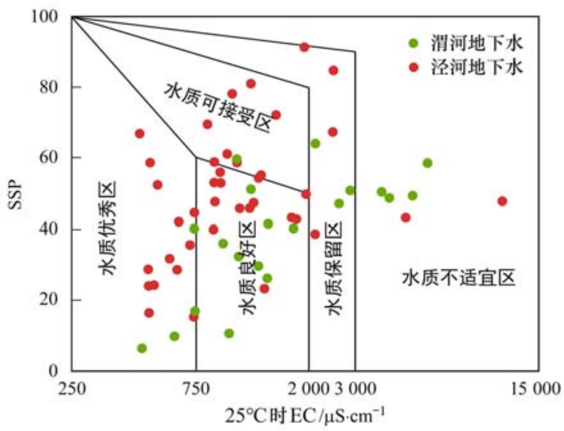

图 7 泾河和渭河流域灌溉水水质分类的 Wilcox 图

Fig. 7 Wilcox diagram for irrigation water classification in the Weihe and Jinghe River catchments

其次,钠吸附比 SAR 主要用于表征地下水对土壤的钠害,其通过降低土壤的渗透性,进而抑制作物对水的吸收[48],地下水水质根据 SAR 值可以分为 4

类[49]: 优秀(SAR < 10)、良好(10 ≤ SAR < 18)、较差(18 ≤ SAR < 26)和极差(26 ≤ SAR). 渭河流域的 SAR 值介于 0.12 ~ 11.54, 平均值为 3.31; 泾河流域介于 0.50 ~ 18.46, 平均值为 4.25. 此外, 利用 SAR 与 EC 相关关系的 USSL 图进一步评估灌溉用水的适宜性, 根据图 8 可知, 渭河与泾河流域位于适宜灌溉的盐度中等低钠的 C2S1 区各占比 20% 和 30%, 而位于不适宜灌溉高盐度的 C3 ~ C4 区域分别占比 80% 和 70%, 表明两流域地下水都有较为严重钠害, 其中泾河相对好于渭河流域. 因此, 在利用两流域地下水进行灌溉时应注意控制钠害对土壤及作物的影响[46].

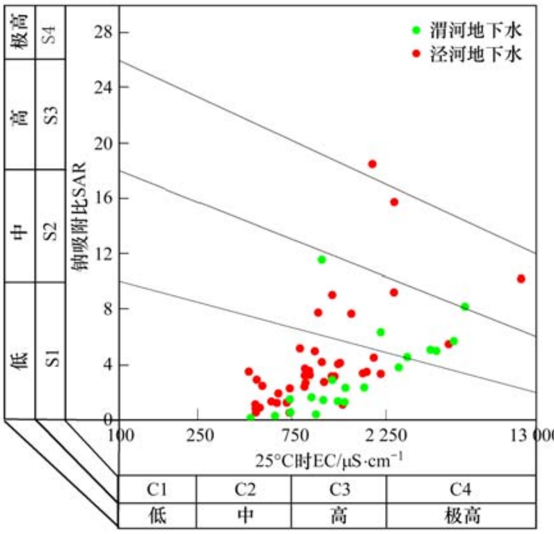

图 8　渭河和泾河流域灌溉水水质的 USSL

Fig. 8　USSL diagram for assessing irrigation water quality in the Weihe and Jinghe River catchments

此外, 长期使用离子含量较高(如 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+} 和 HCO_3^-)的地下水会降低土壤的渗透性, 从而影响植物的生长[47], 常用渗透率 PI 反映地下水对灌溉目的的适宜性. 根据 PI 值的大小主要分为 3 类[16]: 当 PI > 75% (Ⅰ级)表明水质最好, 可以直接灌溉; 当 25% < PI ≤ 75% 时(Ⅱ级)表明水质尚可, 也可用于灌溉; 当 PI ≤ 25% (Ⅲ级)时, 表明水质很差不适合灌溉. 渭河流域 PI 值介于 43.30% ~ 80.43%, 平均值为 62.06%; 泾河流域 PI 值介于 46.62% ~ 114.01%, 平均值为 74.08%, 表明泾河流域地下水整体相对好于渭河流域. 进一步通过反映总盐浓度和 PI 相关关系的 Doneen 图分析可知(图 9), 两流域大部分取样点水质位于 Ⅰ ~ Ⅱ 级区, 其中, 渭河流域渗透率 Ⅰ ~ Ⅲ 级分别占比 15%、85% 和 0%; 而泾河流域分别为 37.5%、45% 和 17.5%, 表明两流域大部分地下水属于Ⅱ级灌溉水质. 因此, 研究区大多数地区地下水水质能够满足灌溉需求, 可以直接进行农业灌溉, 但部分地区灌溉时应考虑地下水中较高的离子含量, 尤其是泾河流域, 这与该流域地下水 Na^{+} 浓度整体高于渭河流域是一致的(图 3). 此外, 高 PI 值与 Na^{+} 和 HCO_3^- 有关, 这可能是由于阳离子交替吸附作用和碳酸盐岩(如方解石或白云岩等)的溶解[16].

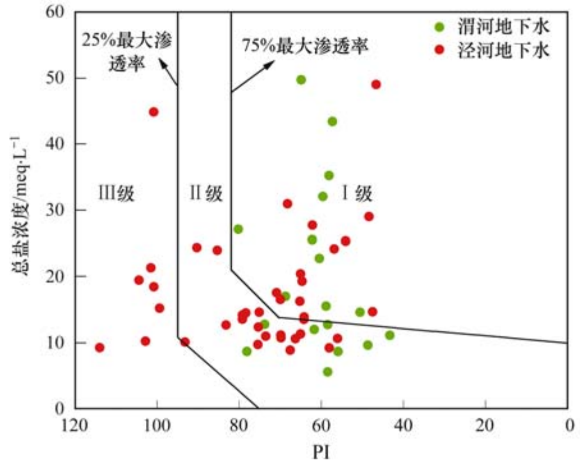

图 9　渭河和泾河流域基于渗透指数对灌溉用水分类的 Doneen

Fig. 9　Classification of irrigation water based on the permeability index of the Doneen diagram for the Weihe and Jinghe River catchments

3　结论

(1) 渭河和泾河流域浅层地下水均以淡水为主, 呈弱碱性; 除 Na^{+} 外, 渭河流域地下水离子浓度整体上均大于泾河流域; 两流域优势阴阳离子均为 HCO_3^- 和 Na^{+}; 渭河流域水化学类型以 HCO_3-Ca-Mg 为主, 占 50%, 而泾河流域以 HCO_3-Ca-Mg 和 HCO_3-Na-K 为主, 各占 32.5%.

(2) 渭河和泾河流域水化学组成均主要受岩石风化作用控制, 其中又以硅酸盐岩石风化为主; 其次, 研究区地下水水化学组成受到工矿活动的影响, 且农业活动中化肥施用也是其重要的控制因素; 此外, 渭河流域的浅层地下水水化学特征受到了明显的阳离子交替吸附作用的影响, 而泾河流域有些地区却并不明显.

(3) 对于饮用水水质评价而言, 两流域地下水水质整体较好, 且泾河流域地下水整体上优于渭河流域; 根据 SSP、SAR 和 PI 指标对地下水作为灌溉水水质评价表明, 研究区部分地区地下水不能直接进行灌溉, 否则会造成盐害进而引起抑制植物生长, 且南部的水质优于北部; 此外, 3 种灌溉水质评判方法均表明泾河流域地下水作为灌溉水水质整体上优于渭河流域.

参考文献:

[1] Wu Q F, Si B C, He H L, *et al*. Determining regional-scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS[J]. Remote Sensing, 2019, **11**(2), doi: 10.3390/rs11020154.

[2] Brauman K A, Richter B D, Postel S, *et al*. Water depletion: an

improved metric for incorporating seasonal and dry-year water scarcity into water risk assessments[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2016, **4**, doi: 10.12952/journal.elementa.000083.

[3] Chen J S, Wang F Y, Meybeck M, *et al.* Spatial and temporal analysis of water chemistry records (1958-2000) in the Huanghe (Yellow River) basin[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**(3): doi: 10.1029/2004GB002325.

[4] Aeschbach-Hertig W, Gleeson T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion[J]. Nature Geoscience, 2012, **5**(12): 853-861.

[5] Li Z, Xiao J, Evaristo J, *et al.* Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113006.

[6] 李琦. 渭河流域地下水对气候变化的响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
Li Q. Mechanism of groundwater response to climate change in Weihe River basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

[7] Zhang X P, Zhang L, Zhao J, *et al.* Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Research, 2008, **44**(7), doi: 10.1029/2007WR006711.

[8] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, **31**(3): 313-323.
Wang G Q, Zhang J Y, Guan X X, *et al.* Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. Advances in Water Science, 2020, **31**(3): 313-323.

[9] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process[J]. Science, 1971, **172**(3985): 870-872.

[10] Zhai Y Z, Lei Y, Zhou J, *et al.* The spatial and seasonal variability of the groundwater chemistry and quality in the exploited aquifer in the Daxing District, Beijing, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(2), doi: 10.1007/s10661-014-4249-9.

[11] Scanlon B R, Reedy R C, Stonestrom D A, *et al.* Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US[J]. Global Change Biology, 2010, **11**(10): 1577-1593.

[12] Desta H, Lemma B, Gebremariam E. Identifying sustainability challenges on land and water uses: the case of Lake Ziway watershed, Ethiopia[J]. Applied Geography, 2017, **88**: 130-143.

[13] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1739-1749.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotope characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River basin and indicative siginificance[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1739-1749.

[14] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4924-4935.
Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, *et al.* Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei area, Leizhou Peninsula[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4924-4935.

[15] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1750-1760.
Li J, Zou S Z, Zhao Y, *et al.* Major ionic characteristics and factors of Karst groundwater at Huixian Karst Wetland, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1750-1760.

[16] Xu P P, Feng W W, Qian H, *et al.* Hydrogeochemical characterization and irrigation quality assessment of shallow groundwater in the central-western Guanzhong basin, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(9), doi: 10.3390/ijerph16091492.

[17] Barbier-Brygoo H, Vinauger M, Colcombet J, *et al.* Anion channels in higher plants: functional characterization, molecular structure and physiological role[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 2000, **1465**(1-2): 199-218.

[18] Kumar M, Kumari K, Ramanathan A, *et al.* A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India [J]. Environmental Geology, 2007, **53**(3): 553-574.

[19] Naser A M, Clasen T F, Luby S P, *et al.* Groundwater chemistry and blood pressure: a cross-sectional study in Bangladesh[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(13), doi: 10.3390/ijerph16132289.

[20] Wu G, Li M T, Zhong F X, *et al.* *Lonicera confusa* has an anatomical mechanism to respond to calcium-rich environment [J]. Plant and Soil, 2011, **338**(1-2): 343-353.

[21] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, **59**: 651-681.

[22] 华琨, 李洲, 李志. 黄土区长武塬地下水水化学特征及控制因素分析[J]. 环境化学, 2020, **39**(8): 2065-2073.
Hua K, Li Z, Li Z. The hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Changwu loess tableland [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(8): 2065-2073.

[23] 华琨. 黄土高原主要河流水化学和水质的时空特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Hua K. Spationtemporal characteristics and controlling factors of water chemistry and water quality in the main rivers of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[24] 张荣华. 渭河流域蒸散发特征及水量变化分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2013.
Zhang R H. Characteristics of evapotranspiration based on remote sensing and analysis of weater changes in Weihe River basin, China[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2018.

[25] Liang W, Bai D, Wang F Y, *et al.* Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau [J]. Water Resources Research, 2015, **51**(8): 6500-6519.

[26] Gao X R, Yan C S, Wang Y B, *et al.* Attribution analysis of climatic and multiple anthropogenic causes of runoff change in the Loess Plateau—A case - study of the Jing River Basin[J]. Land Degradation & Development, 2020, **31**(13): 1622-1640.

[27] 寇永朝. 泾河水化学特征及其影响因素分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Kou Y C. Chemical characteristics of Jinghe River and analysis of its influencing factors [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

[28] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-923.

[29] 左禹政, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州省都柳江流域水化学特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2684-2690.
Zuo Y Z, An Y L, Wu Q X, *et al.* Study on the hydrochemical characteristics of Duliu River basin in Guizhou Province[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2684-2690.

[30] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Assessment of the sources of nitrate in the Changjiang River, China using a nitrogen and oxygen

isotopic approach[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(5): 1573-1578.

[31] Charfi S, Zouari K, Feki S, *et al*. Study of variation in groundwater quality in a coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis[J]. Quaternary International, 2013, **302**: 199-209.

[32] Rabeiy R E. Assessment and modeling of groundwater quality using WQI and GIS in Upper Egypt area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **25**(31): 30808-30817.

[33] WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum[R]. Geneva: World Health Organization, 2017.

[34] Zhang Q Y, Xu P P, Qian H. Assessment of groundwater quality and Human Health Risk (HHR) evaluation of nitrate in the central-western Guanzhong basin, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(21), doi: 10.3390/ijerph16214246.

[35] Xiao J, Wang L Q, Deng L, *et al*. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of The Total Environment, 2019, **650**: 2004-2012.

[36] Wilcox L V. Classification and use of irrigation water[R]. Washington, DC: Agriculture Circular, 1955.

[37] Singh A K, Tewary B K, Sinha A. Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in part of NOIDA metropolitan city, Uttar Pradesh[J]. Journal of the Geological Society of India, 2009, **78**(6): 523-540.

[38] 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.

[39] Huang T M, Ma B Q. The origin of major ions of groundwater in a loess aquifer[J]. Water, 2019, **11**(12), doi: 10.3390/w11122464.

[40] 何姜毅, 张东, 赵志琦. 黄河流域河水水化学组成的时间和空间变化特征[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(5): 1390-1401.
He J Y, Zhang D, Zhao Z Q. Spatial and temporal variations in hydrochemical composition of river water in Yellow River basin, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, **36**(5): 1390-1401.

[41] Meng Z L, Yang Y G, Qin Z D, *et al*. Evaluating temporal and spatial variation in nitrogen sources along the lower reach of Fenhe River (Shanxi Province, China) using stable isotope and hydrochemical tracers[J]. Water, 2018, **10**(2), doi: 10.3390/w10020231.

[42] Liu T, Wang F, Michalski G, *et al*. Using ^{15}N, ^{17}O, and ^{18}O to determine nitrate sources in the Yellow River, China[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(23): 13412-13421.

[43] Huang T M, Ma B Q, Pang Z H, *et al*. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers[J]. Journal of Hydrology, 2020, **583**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124532.

[44] 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.

[45] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4543-4552.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al*. Hydrochemical characteristics of karst groundwater in the mountains of northern Bazhong city, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4543-4552.

[46] Kawo N S, Karuppannan S. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia[J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, **147**: 300-311.

[47] Khanoranga, Khalid S. An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick Kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, **197**: 14-26.

[48] Tahmasebi P, Mahmudy-Gharaie M H, Ghassemzadeh F, *et al*. Assessment of groundwater suitability for irrigation in a gold mine surrounding area, NE Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(22), doi: 10.1007/s12665-018-7941-1.

[49] Kaka E A, Akiti T T, Nartey V K, *et al*. Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the southeastern Volta river basin: manya krobo area, Ghana[J]. Agriculture, 2011, **39**: 4793-4807.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 6

Jun. 15, 2021

CONTENTS