

doi: 10.12029/gc20210601

苏晨, 张学庆, 费宇红, 李壮, 孟素花, 崔向向, 潘登, 杨培杰, 郭春艳, 田夏. 2021. 小浪底水库运行后黄河下游侧渗影响范围及对地下水环境的影响[J]. 中国地质, 48(6): 1669–1680.

Su Chen, Zhang Xueqing, Fei Yuhong, Li Zhuang, Meng Suhua, Cui Xiangxiang, Pan Deng, Yang Peijie, Guo Chunyan, Tian Xia. 2021. Lateral seepage scope of downstream of Yellow River after the operation of Xiaolangdi reservoir and its impact on groundwater environment [J]. *Geology in China*, 48(6): 1669–1680(in Chinese with English abstract).

小浪底水库运行后黄河下游侧渗影响范围 及对地下水环境的影响

苏晨^{1,2}, 张学庆^{1,2}, 费宇红^{1,2}, 李壮³, 孟素花^{1,2}, 崔向向^{1,2},
潘登⁴, 杨培杰³, 郭春艳^{1,2}, 田夏^{1,2}

(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. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 山东省地质环境监测总站, 山东 济南 250014; 4. 河南省地质环境监测院, 河南 郑州 450016)

摘要: 文章通过对 2019 年黄河下游平原区地下水流场的刻画, 结合黄河水和沿岸地下水的稳定同位素 ¹⁸O 和放射性同位素 ³H 的分布特征, 分析了小浪底水库运行 20 年后黄河下游侧渗影响带的范围及变化。结果表明: 小浪底水库运行 20 年后, 现状黄河下游影响带在 5~25 km, 在新乡—开封一带最大, 约 25 km, 在滨州一带最小, 约 5 km。相对于小浪底水库运行初期, 影响带在滨州以西增加 0.5~5 km, 尤其在新乡—郑州沿线增大最为显著, 而在滨州以东影响带略有缩小。黄河影响带主要由介质条件, 补给源条件和能量条件等因素控制。小浪底水库运行后, 河道下切, 河床渗透性增强, 降低了河床物质对黄河水的“吸附和净化”能力。黄河水的水质将对沿岸地下水产生更加明显的影响, 控制和改善黄河水质是保障黄河下游区生态环境高质量发展的基础。

关键词: 小浪底水库; 侧渗; 影响带; 水动力场; 同位素; 水文地质调查过程; 黄河下游; 河南省

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1669-12

Lateral seepage scope of downstream of Yellow River after the operation of Xiaolangdi reservoir and its impact on groundwater environment

SU Chen^{1,2}, ZHANG Xueqing^{1,2}, FEI Yuhong^{1,2}, LI Zhuang³, MENG Suhua^{1,2}, CUI Xiangxiang^{1,2},
PAN Deng⁴, YANG Peijie³, GUO Chunyan^{1,2}, TIAN Xia^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Science and Engineering, Ministry of Natural Resource, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 3. *Shandong Geological Environment Monitoring Station, Jinan 250014, Shandong, China*; 4. *Henan Province Geological Environment Monitoring Institute, Zhengzhou 450016, Henan, China*)

收稿日期: 2020-12-28; 改回日期: 2021-03-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190335)、中央级公益性科研院所基本科研业务费 (SK202112) 和国家自然科学基金 (41602268) 联合资助。

作者简介: 苏晨, 男, 1985 年生, 助理研究员, 主要从事同位素水文地质研究工作; E-mail: sc.1219@163.com。

通讯作者: 张学庆, 男, 1984 年生, 副研究员, 主要从事污染水文地质研究工作; E-mail: 364471331@qq.com。

Abstract: Based on the groundwater level measured in 2009 in the downstream of Yellow River plain, combined with the isotopic (^{18}O and ^3H) geochemistry of surface water and the groundwater, the lateral seepage scope and variation of downstream of Yellow River were analyzed after 20 years' operation of Xiaolangdi reservoir. The result indicates that in 20 years of operation of Xiaolangdi reservoir, the current scope of lateral seepage of the downstream of Yellow River will be between 5–25 km, with the largest scope of about 25 km in Xinxiang–Kaifeng and the smallest scope of 5 km in Binzhou. Compared with affected scope of lateral seepage in the initial operation of Xiaolangdi reservoir, the affected scope increased by about 0.5–5 km in the west of Binzhou, with most significant increment along Xinxiang–Zhengzhou, and slight decrement in the east of Binzhou. The affected scope of lateral seepage was mainly controlled by medium condition, recharge source condition and energy condition. After Xiaolangdi reservoir was put into operation, the channel was cut down, the permeability of the river bed was enhanced, and the "adsorption and purification" ability of the river bed material to the Yellow River water was reduced. Then, the water quality of Yellow River has a significant impact on the groundwater quality along the river. Hence, the control and improvement of water quality of Yellow River was the basis to ensure the high-quality development of the ecological environment in the basin of down–Yellow River.

Key words: Xiaolangdi reservoir; lateral seepage; influence zone; hydrodynamics; isotope; hydrogeological survey engineering; lower reaches of the Yellow River; Henan Province

About the first author: SU Chen, male, bore in 1985, assistant researcher, engaged in the research of isotope hydrogeology; E-mail: sc.1219@163.com.

About the corresponding author: ZHANG Xueqing, male, born in 1984, associate researcher, engaged in the research of contaminant hydrogeology; E-mail: 364471331@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190335), Central Institutes Fundamental Research Project (No. SK202112) and National Natural Science Foundation of China (No. 41602268).

1 引 言

黄河自桃花峪的出山口至垦利县的入海口称为黄河下游段。黄河下游河道为强烈堆积型河道,河水泥沙含量高且落淤强烈,致使黄河的河床高出背河地面数米,形成世界上著名的地上悬河(魏常兴等, 2002)。黄河水位高于两岸的地下水位,河水源源不断地渗漏进含水层补给地下水,黄河侧渗补给地下水的宽度被称为黄河影响带(赵云章等, 2003)。黄河影响带反映的是黄河水对两岸地下水的直接作用能力,黄河影响带的确定是地表水-地下水转换关系方面研究的重点与难点(刘昌明等, 2020)。黄河水的渗漏是引起黄河径流量损失的原因之一,影响带内的地下水水质水量对黄河水有积极的响应。黄河影响带的确定不仅是黄河下游区地下水系统划分和水循环研究的基础,同时也关系着沿黄区水资源的利用、水循环强度和区域发展等问题(曹剑峰等, 2005; 张金良等, 2018; 董战峰等, 2020)。

关于黄河下游侧渗影响带的研究主要集中在21世纪初,在小浪底水库建成前和刚建成的几年内,赵云章(2003, 2004)、平建华(2004)、崔亚莉(2005)等学者基于地下水流场、氢氧稳定同位素和氡同位素的分

析等进行了大量的研究,刻画出小浪底水库运行初期黄河侧渗影响带,为沿黄区水资源评价提供基础依据。当前,小浪底水库已运行20年,黄河下游平原下垫面发生了显著变化,黄河不再断流,河道下切明显(王英珍等, 2020; 余阳等, 2020)。在小浪底水库建立运行20年后,黄河水和两岸地下水联系程度是否发生变化? 决定黄河影响带变化的因素是什么? 掌握此类问题不仅可以提高对黄河下游区域水循环的认识,同时,有利于黄河下游区水资源的合理开发利用和生态环境的保护。

地下水动力场是地下水流动的直接表现,反映出地下水流动的驱动力。地下水中的稳定同位素 ^2H 、 ^{18}O 和放射性同位素 ^3H 的含量随着水体的运移和转化呈现出不同的特征,能够反映出不同水体的联系和转化过程。国内外大量的研究成果表明上述方法在水体运移和转化中的适用性(孙从建, 2018; Joshi et al., 2018; 陈松等, 2019; 苏晨等, 2019; Birks et al., 2019; Jiang et al., 2019; Su et al., 2020)。以往的黄河影响带研究也正是在地下水动力条件的基础上,结合此类同位素示踪而展开的,取得了丰硕的成果(赵云章等, 2004; 王福刚, 2006; 史超, 2009)。

本次基于2020年黄河下游平原区地下水位监测(5个点/100 km²的监测密度)和地下水-地表水样品的数据,以黄河下游平原区地下水的动力特征为基础,结合稳定同位素²H、¹⁸O和放射性同位素³H,确定小浪底水库运行后20年后黄河侧渗的影响范围及其变化,并分析黄河影响带演变控制因素,以及黄河对沿岸水环境的影响。本次研究可为黄河下游沿黄区地下水和地表水资源的科学管理提供依据,是黄河下游区生态环境可持续发展和高质量发展的基础内容。

2 研究区概况

黄河自河南桃花峪出山至山东垦利入海之间被称为黄河下游段(图1),此时的黄河主要在黄淮海平原内流动,黄河下游干流区北部为海河平原,南部为淮河平原。黄河下游段处于暖温带半湿润、半干旱季风气候区,多年平均气温11~14.5℃,多年平均降水量为571.0~762.9 mm(平建华等,2004)。

黄河水、大气降水和农业灌溉水为黄河下游两岸的地下水系统提供了丰富的水资源(崔亚莉等,2005)。

小浪底水库是黄河进入下游段之前的最后一道蓄水工程,自1999年运行以来,下游黄河来水来沙得到改善,最为突出的是黄河不再断流,河床得到普遍侵蚀下切,同流量下河水水位普遍降低,河床行洪能力较以前有所提高,黄河年内水位流量基本稳定(尚红霞等,2008;刘慰等,2020)。但是,黄河的地上悬河状态没有改变,河水仍然是沿岸地下水的主要来源。

黄河下游段两岸地区可分为剥蚀溶蚀丘陵、冲洪积平原、冲积扇平原、黄河冲积平原、冲积海积平原、海积平原、三角洲平原七种地貌单元(图1)。黄河侧渗主要发生在冲积平原和冲积扇平原浅部的松散岩类孔隙含水层内。浅部含水层主要由全新统、上更新统的砂层组成,含水层厚度30~80 m(图2)。浅部地下水主要接受大气降水的入渗、灌溉水

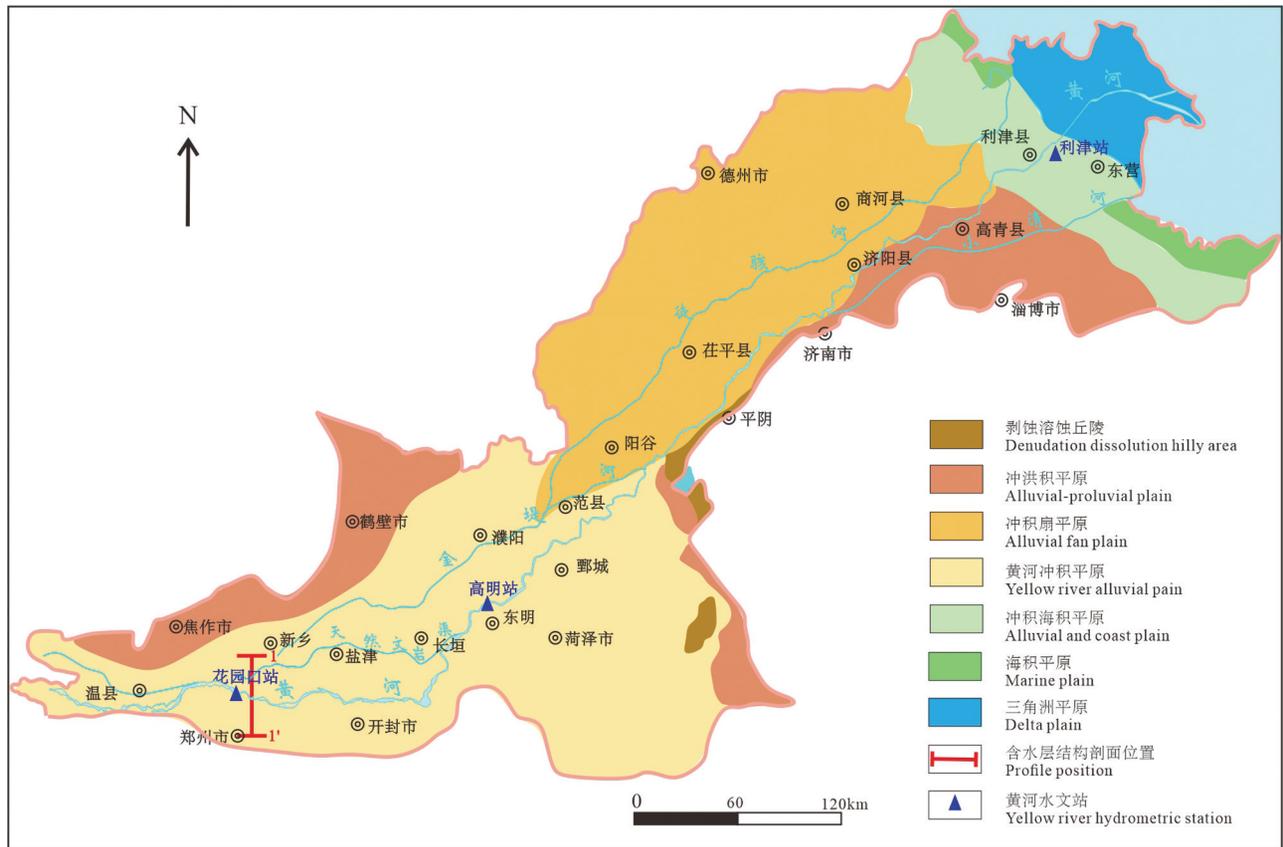


图1 研究区位置及地貌分布
Fig.1 Location and geomorphology of the study area

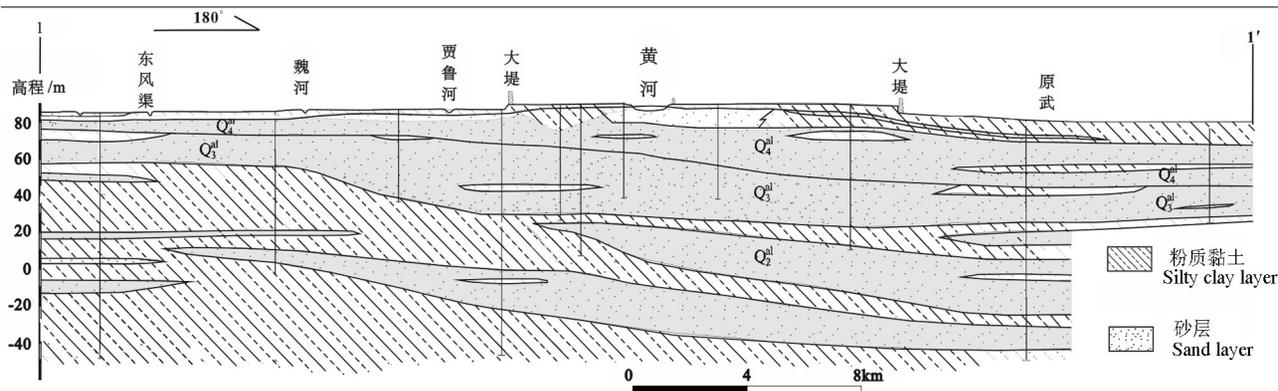


图2 花园口剖面含水层结构图

Fig.2 Hydrogeological profile along the Huayuankou section

的人渗和黄河水的渗漏等补给,地下水开采、潜水蒸发和侧向径流是浅层水的主要排泄方式。地下水总体流动方向呈现出以黄河为中心,向东北和西南方向流动的趋势。

3 研究方法及样品分析

3.1 地下水动力场分析

本次基于2019年5月对黄河下游区浅层地下水位的统测,刻画出黄河下游区地下水的流动方向和流动特征,进而判断地下水受到黄河影响的范围。本次统测在15 d内完成,对黄河下游两岸约70000 km²内3500多眼井的水位进行测量,地下水位点的测量基本基于浅层井完成。本次水位统测的时长符合要求,统测密度约为5个/100 km²,符合统测要求,能够较为准确地刻画出地下水的流动特征。

3.2 同位素样品的采集和分析

选取垂直黄河的剖面进行黄河影响带的研究。样品采集主要考虑:(1)在黄河从下游出山至黄河入海之间,在上段和下段均有样品的采集;(2)地下水样品主要沿着黄河南北两岸地下水的流动方向采集,以便能更加真实地反映黄河的影响特征;(3)样品的选取基本在浅层水,排除深层水对分析的影响。

在查明研究区内水文地质条件和地下水动力特征的基础上,于2019年5月在黄河下游平原内垂直黄河的2个剖面(剖面位置见图3)——A-A'剖面(花园口剖面)和B-B'剖面(济阳剖面)上,分别采取黄河水和沿岸地下水样品。本次共采集水体样品26组,其中包括浅层水样品24组,黄河水样品2组。水

样主要进行稳定同位素²H、¹⁸O和放射性同位素³H的测试。样品测试在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成,样品的采集、处理、分析测试均符合国家质量认证标准,误差在允许范围内。

4 结果与讨论

4.1 黄河影响带的分布

4.1.1 地下水流动特征反映的黄河影响带分布

黄河下游平原浅层地下水的流动特征为:以黄河为中心轴,地下水呈放射状向东南和东北方向流动(图3)。但在黄河近岸地区,受黄河水向两岸含水层侧渗的影响,地下水的流向表现出垂直黄河河道的特征。因此,基于黄河近岸区地下水的流动方向可判断黄河的侧渗影响范围(赵云章等,2003)。对于没有形成明显的局部地下水位降落漏斗的区域,黄河影响带主要为地下水流向近似垂直河道的区域。在黄河沿岸地下水开采程度强烈区,即已形成明显的局部地下水位降落漏斗的区域内,黄河影响带边界为地下水位降落漏斗外侧的地下水分水岭。

基于浅层地下水的流场特征(图3),北岸的影响带基本与天然文岩渠、金堤河、徒骇河等河流平行,且黄河侧渗影响已至此类河流的北侧。黄河南岸河南境内目前受地下水开采强度大的影响,已经形成了郑州漏斗和开封漏斗,在漏斗外侧存在分水岭。受到漏斗的影响,分水岭以北区域黄河渗透的水体向漏斗中心汇集。在济南以东的滨海地区,黄河水和地下水的联系程度减弱,黄河的侧渗影响范围相对于其上游明显较小,集中在河道南北两岸5 km以内的范围。

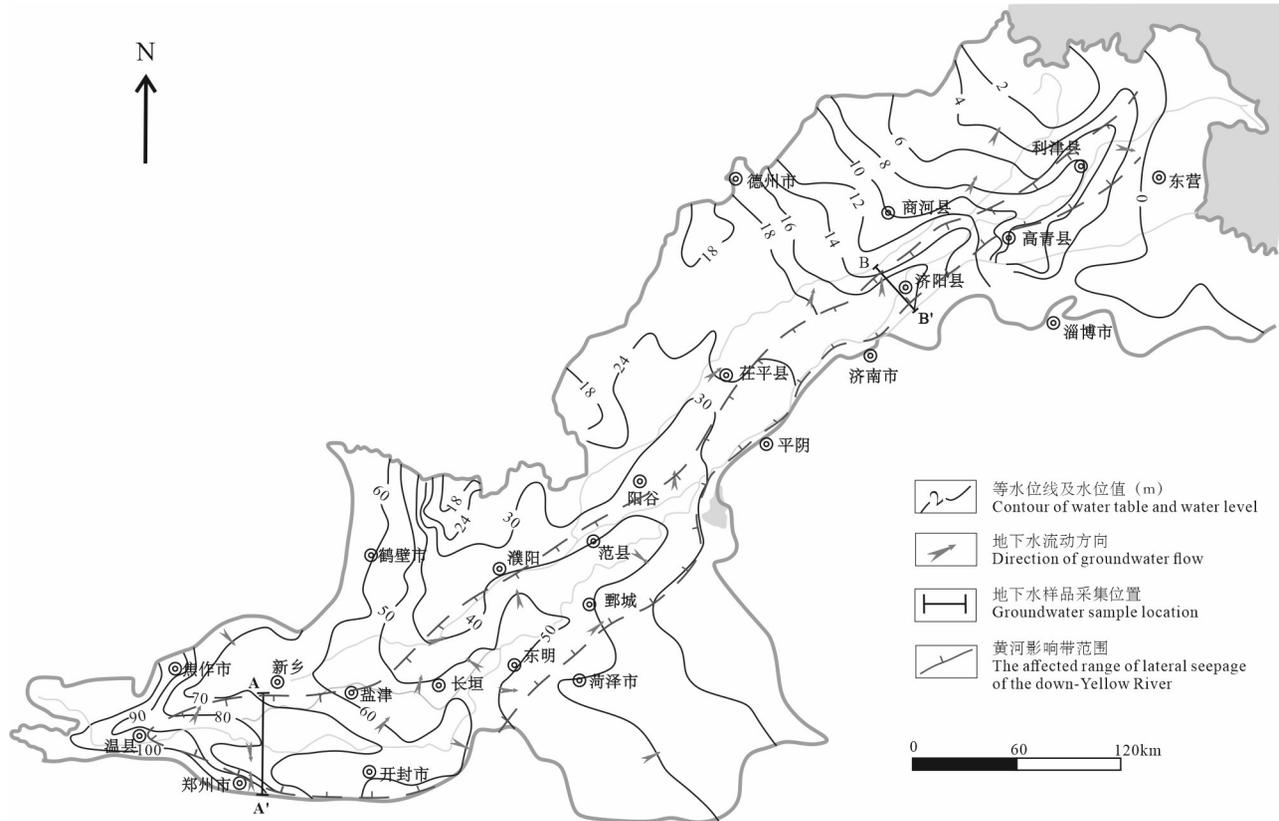


图3 黄河下游地下水流动特征及影响带范围

Fig.3 Groundwater level contour and the lateral seepage scope of the downstream of Yellow River water

当前,黄河以北的影响带范围大于黄河以南的区域,北部的影响带最大可至 25 km,南部的影响带最大可至 15 km;黄河河南段的影响带大于山东段的影响带,河南境内的影响带多位于 15~25 km 范围内,而山东境内的黄河影响带多位于 5~15 km 范围内;黄河在新乡—开封等区域的影响带最大,可至 25 km,而在黄河临海的区域最小,仅在 5 km 范围内。

4.1.2 同位素 ^{18}O 和 ^3H 反映的影响带分布

地下水中的同位素含量随着水体运移而发生规律性变化,是寻求不同水体联系和转化的重要手段(Su et al., 2018; Jung et al., 2019)。黄河水和大气降水是黄河下游段两岸地下水的主要补给源,两者在稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值和放射性同位素 ^3H 的含量上存在明显的差别,为研究黄河影响带的范围提供了依据(史超,2009)。影响带范围内,浅层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着距离变化的图形上,呈现出以黄河水为最低的“V”型变化;在 ^3H 含量随着距离变化的图形上,呈现出以黄河水为最高的“^”型变化。在影响带的边界,地下水基本呈现出大气降水的同位素特征。

从花园口剖面 A-A'(图4)可见,浅层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线和 ^3H 含量曲线均体现出“V”型变化和“^”型变化,虽然在变化过程中存在起伏,但总体趋势能反映出黄河的影响范围。在黄河北岸的 A1#点和 A2#点处,无论是同位素含量还是水化学类型均与北岸靠近黄河的地下水有明显的差别。A1#点和 A2#点处地下水的 ^3H 含量迅速增大至高于黄河水的氡值,而地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。由此可见,A2#点附近为黄河影响范围的北边界,花园口剖面处黄河影响带北部范围为 20~25 km。影响带范围外的地下水受降水入渗的影响,同位素特征明显向着大气降水靠近。

花园口剖面黄河南岸地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于黄河北岸地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,而 ^3H 含量却高于黄河北岸地下水值。南岸近岸地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 ^3H 含量更接近黄河水,表明黄河水对南岸近岸区地下水的影响程度较大。南岸地下水自 A11#点起向南(远离黄河的方向), $\delta^{18}\text{O}$ 值和 ^3H 含量基本呈现出稳定的状态,接近大气降水的同位素含量,反映出黄河南岸的影

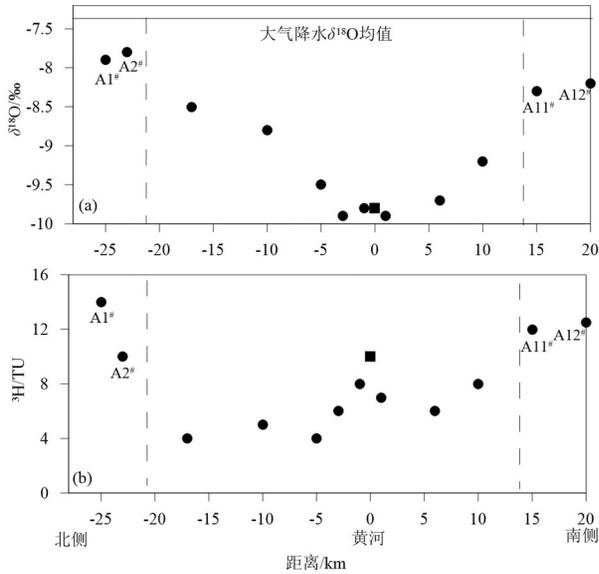


图4 花园口剖面A-A'地下水的同位素变化

Fig.4 The isotopic composition of groundwater along the section A-A'

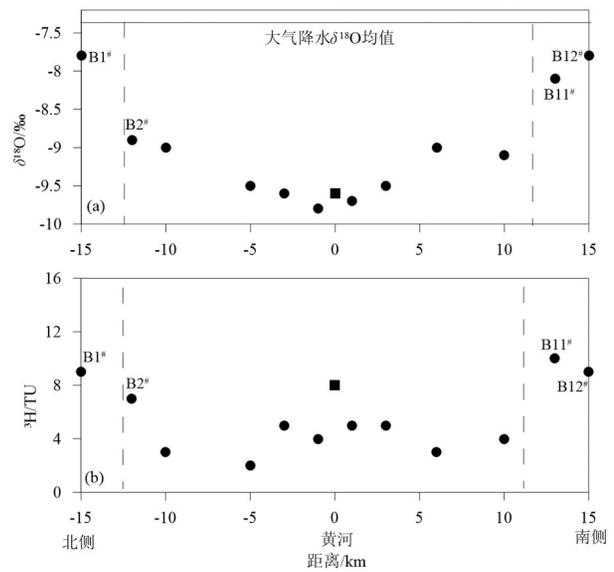


图5 济阳剖面B-B'地下水的同位素变化

Fig.5 The isotopic composition of groundwater along the section B-B'

带范围在A11#点附近,距离黄河约15 km。黄河南岸已形成地下水降落漏斗,降落漏斗的形成加速了黄河水渗漏补给的速率,强烈地袭夺黄河水,因此,南岸影响带内地下水同位素特征更加接近黄河水。南岸影响带边界主要受控于漏斗,地下水自南向北流动的天然特征和以漏斗为中心的流场达到平衡,因此,南岸影响带范围内的同位素含量均维持在较为稳定的水平。基于上述分析可知,花园口剖面内黄河影响带南部范围在15 km以内。

济阳剖面B-B'内,浅层水的 $\delta^{18}O$ 值曲线和 3H 含量曲线也体现出“V”型变化和“^”型变化(图5)。该剖面处于冲积平原和海积平原的过渡区,地下水的径流条件远不及其西部平原,相对于花园口剖面,地下水的 3H 含量较小, $\delta^{18}O$ 值较低。

从图5可见,在北岸B2#点和南岸B11#点之间,地下水的同位素含量比较稳定,同黄河水较为接近。在北岸B2#点北侧(远离黄河方向)和南岸B11#点南侧(远离黄河方向),地下水的 3H 含量显著增大, $\delta^{18}O$ 值向着大气降水的方向移动。由此可知,在济阳剖面,黄河的影响带范围在北岸B2#点和南岸B11#点之间,北岸影响带宽度约13 km,南岸宽度约10 km。

4.1.3 现状黄河影响带范围的界定

区域地下水流动特征反映的是黄河影响带的

整体分布情况,典型剖面仅是对影响带局部特征的进一步刻画和验证。从地下水流动特征反映的影响带可见,在花园口附近,黄河北岸的影响带为25 km左右,黄河南岸的影响带在15 km左右;在济阳附近,黄河北岸的影响带为15 km左右,黄河南岸的影响带在10 km左右。在花园口剖面 and 济阳剖面处,同位素信息反映的黄河影响带范围和水动力场表现出的影响带范围接近。由此可见,水动力场刻画的黄河影响带是合理和可靠的。

本次研究认为黄河影响带范围最大处在新乡—郑州方向,北岸的影响带最大达到25 km,最小的影响带范围在黄河入海前的海积平原,影响带范围在5 km以内。随着黄河出山至入海口,随着黄河悬河特征的减缓,影响带范围有减小的趋势。

4.2 黄河影响带范围的变化和影响因素

4.2.1 黄河影响带范围的变化程度

小浪底水库运行初期,黄河影响带的范围主要为(史超,2009;赵云章等,2014):河南境内10~20 km,山东境内10~15 km,黄河北岸的影响带在天然文岩渠、金堤河和徒骇河南侧,黄河南岸区受地下水开采的影响,黄河影响带在地下水降落漏斗南侧。相比于小浪底水库运行初期,当前的黄河影响带范围已经发生了一定的变化。在黄河下游段河南境内,黄河影响带有增大的趋势,尤其在黄河北

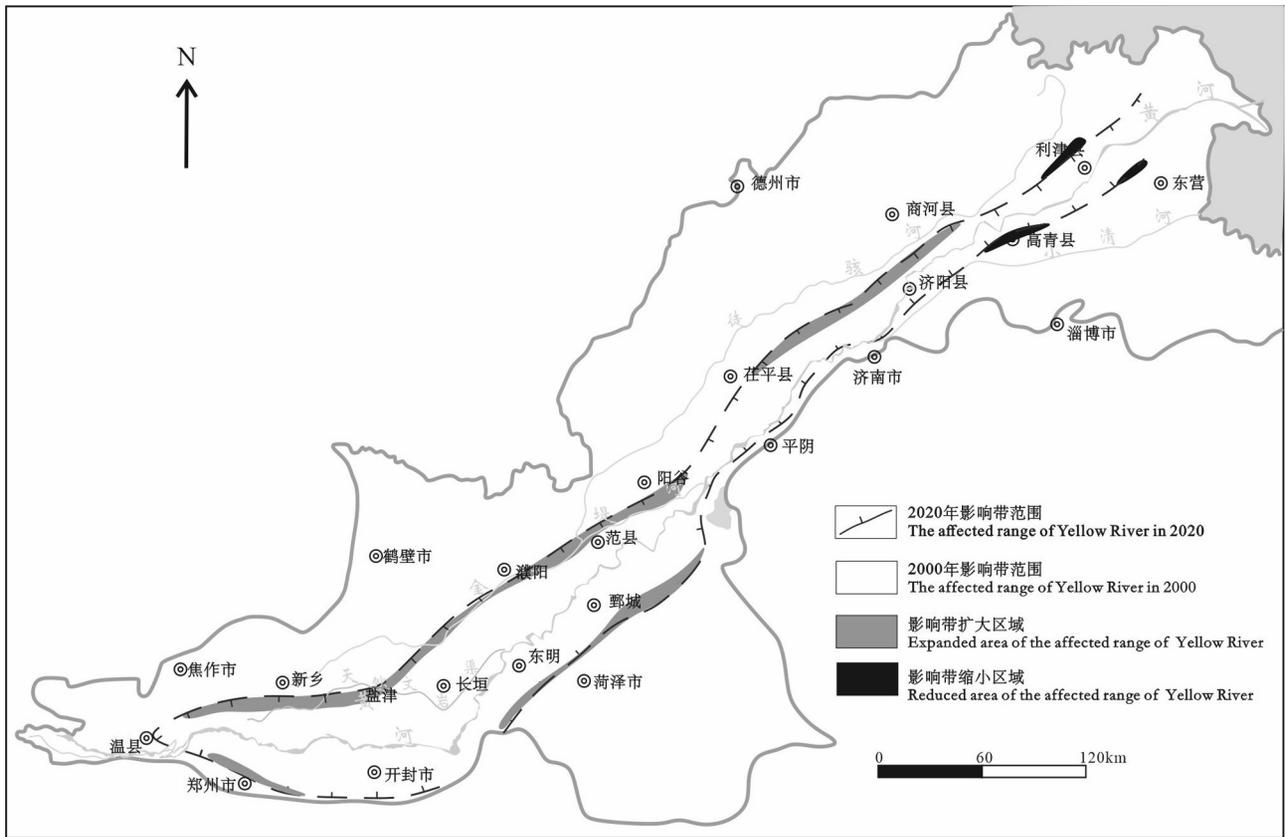


图6 黄河下游影响带的变化
Fig.6 The change of lateral seepage scope of the down-Yellow River water

岸的新乡县、开封县附近,影响带增大了5 km,当前的黄河影响带范围已达25 km左右。在黄河下游的济南以东区域,黄河影响带的范围变化不明显,而在鲁东沿海地区,黄河影响带范围甚至有减小的趋势(图6)。

4.2.2 黄河影响带变化的因素

(1) 黄河河床介质的变化

黄河河床是黄河向含水层渗漏的直接通道。受小浪底水库调水冲砂的控制,黄河河道淤积情况得到较为明显的改善,河道内沉积的渗透性较差的淤泥物质逐步被冲刷,河床逐渐粗化(彭红等, 2009)。

据黄河下游水文站监测数据(彭红等, 2009),在小浪底水库运行后,同一测站相同流量下的黄河的水位下降了1~2 m,反映出河道下切深度至少和此量相当(图7)。当前河床沉积物的中值粒径比值为1.5~2.1,全下游主槽床沙化明显。在小浪底水库运行后,黄河河道下切是明显的特征,由此带来的

直接影响就是河床沙化,渗透性增强,黄河侧渗断面增大。

(2) 黄河侧渗的能量变化

黄河水位和沿岸地下水的水头差,是黄河侧向流动的动力。基于黄河下游水文站实测资料的统计,小浪底水库运行以来,黄河水位呈现出逐年降低的趋势(图8)。2008—2018年,黄河水位累计下降2 m左右,不同水文站处有一定的差别,花园口水文站处黄河水位下降较大,利津水文站处下黄河水位下降较小。

黄河沿岸是人类活动的重要区域,地下水开采强烈,地下水位呈现出逐渐下降的趋势,尤其是黄河北岸的华北平原区,地下水位下降程度较大。在黄河入海前的海积平原内,由于两岸主要为矿化度大于2 g/L的咸水,地下水开发利用程度较低有关,地下水并没有表现出明显的下降趋势。从花园口站和利津站处不同年份的水位变化可看出黄河水和沿岸地下水的水位变化特征(图9)。

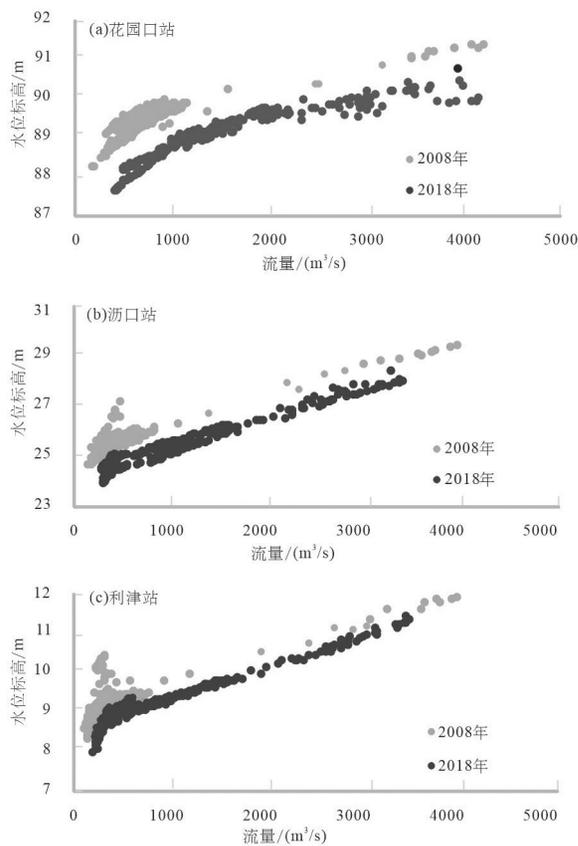


图7 黄河下游水文站黄河流量和水位变化图(根据水文站收集资料统计)

Fig.7 The runoff vs. river level of Yellow River in different hydrologic station

在黄河南北两岸的广大平原内,地下水的下降程度大于黄河水位的下降程度,使得黄河和地下水的水位差增大,黄河水的侧向流动动力增强。此外,黄河南北两岸冲积平原内,含水层主要以砂层为主,渗透系数相对较大,地下水流动能力较强,因此,黄河水的侧向流动范围扩大。在黄河入海前的海积平原内,虽然黄河水位下降约1 m,但沿岸地下水的水位没有明显的变化。黄河水和沿岸地下水的水头差变小,地下水的侧向径流动力减弱,因此,在黄河入海前的区域内,黄河的影响带范围呈现出逐渐变小的趋势。

(3) 黄河侧渗的补给源变化

黄河水在径流途中,逐步下渗补给地下水,然后随着地下水向远离河岸的方向流动。黄河水是黄河影响带范围内地下水的重要补给源。

在小浪底水库运行前,黄河下游经常性出现断

流现象(陈霁巍,2000)。枯水期河道干枯,黄河水对地下水基本不产生直接影响,不能提供黄河侧向流动的物质来源。

在小浪底水库运行后,黄河下游现断流的现象不复存在。小浪底水库的调蓄作用,控制黄河径流量平缓而稳定(图10),黄河水源源不断地向含水层渗漏,为地下水侧向径流提供了持续的物质来源。

(4) 黄河影响带变化的决定因素

黄河影响带主要由介质条件,补给源条件和能量条件影响。在小浪底水库运行后,黄河下游河床沙化明显,河床渗透性增强,提高了黄河水的渗漏能力。此外,黄河不再断流,黄河水可源源不断地渗漏补给沿岸的地下水,提高了黄河水的物质来源持续时间。介质条件和补给条件为黄河侧渗提供了物质和流通基础。但是,在黄河下游入海前的海积平原内,黄河的影响带范围并没有发生明显的扩大现象,甚至出现影响带范围缩小的趋势。在海积平原内,黄河水位和沿岸地下水的水头差减小,黄河侧渗的能量条件变弱。由此可见,黄河水和沿岸地下水的水头差,是黄河影响带的决定因素,即能量条件是决定黄河影响带的决定因素。

4.3 黄河对地下水环境的影响

小浪底水库运行后,黄河下游段最为明显的特征为黄河河道下切、黄河河床沙化、黄河水位降低和黄河流量持续。在此类河道和水文条件变化的基础上,除东部海积平原,黄河下游平原普遍发生黄河侧渗影响带扩大的现象。黄河水渗漏能力的增强,也增强了黄河对沿岸含水层水质水量的影响。

黄河水是黄河影响带内地下水的主要补给源,黄河水渗漏到含水层中,其本身的水化学组分也进入到含水层中。当前,黄河下游的水质类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型。沿着黄河流动的方向,黄河水的矿化度、总硬度、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子含量都呈增加之势。在小浪底水库运行后,黄河河道下切和河床沉积物的沙化,意味着河床对黄河水的“过滤和净化”能力减弱,区域地下水水质对黄河水的积极响应将更加明显。

虽然黄河水的水质只是影响沿黄区地下水质量的一方面,水质背景含量和沿黄区的人类生产和生活带来的废水也是直接影响地下水水质的重要因素(高宗军等,2010; Sun et al., 2017; Yang et al.,

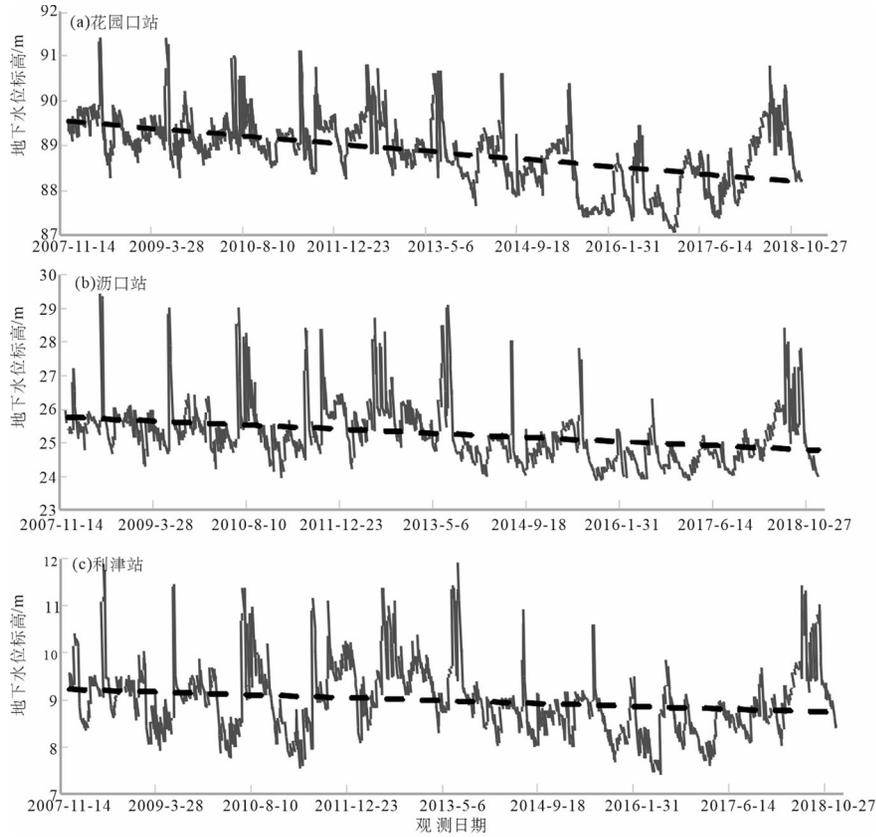


图8 黄河下游水文站实测黄河水位变化(根据水文站收集资料统计)
 Fig.8 The runoff of Yellow river in different hydrologic station

2017)。但是,源头的水质控制和改善是提高沿黄区水质的起点。黄河侧渗影响带的扩大意味着黄河水质的影响范围增大。此外,黄河两岸引黄灌区分布众多,此类地区主要靠黄河水直接灌溉,若黄河水质没有得到有效的控制和改善,则相当于将“差水”直接远源补给进入含水层中,进一步影响地下水水质。因此,黄河水质的改善和控制,是当前亟需解决和重点关注的问题(石建省等,2000;吕振豫等,2017)。

当前,黄河流域高质量发展是目标,黄河下游区发展是重点,而保质保量的水资源是发展的基础(刘昌明等,2020;贾绍凤等,2020)。黄河水渗漏补给及引黄灌溉渗漏补给是黄河影响带内特有的地下水补给方式。在控制和改善黄河水质的基础上,适当地增加浅层地下水的开采量,可促进地下水的循环,缩短地下水的更新周期,从而降低蒸发浓缩作用以及人类活动产生的污水和废水对浅层地下水质量的影响,可为黄河下游区发展提供可靠的水源保障。

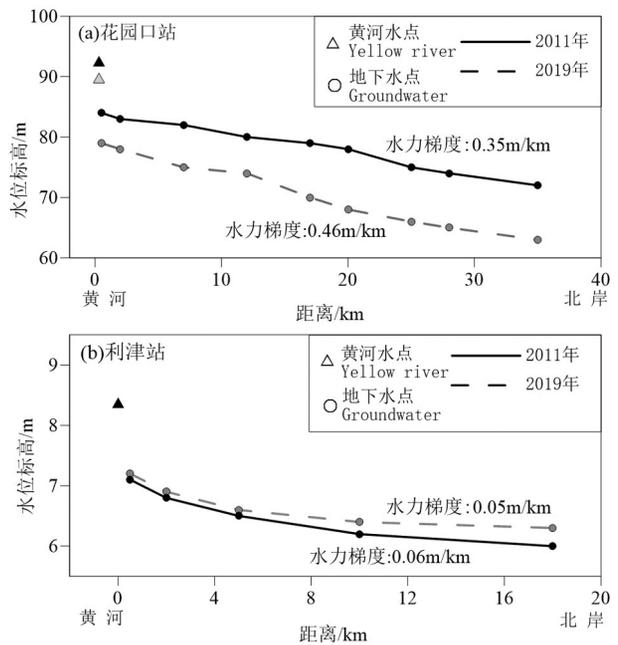


图9 黄河水位和沿岸地下水位的变化
 Fig.9 Changes of water level of the Yellow River and groundwater level along the coast

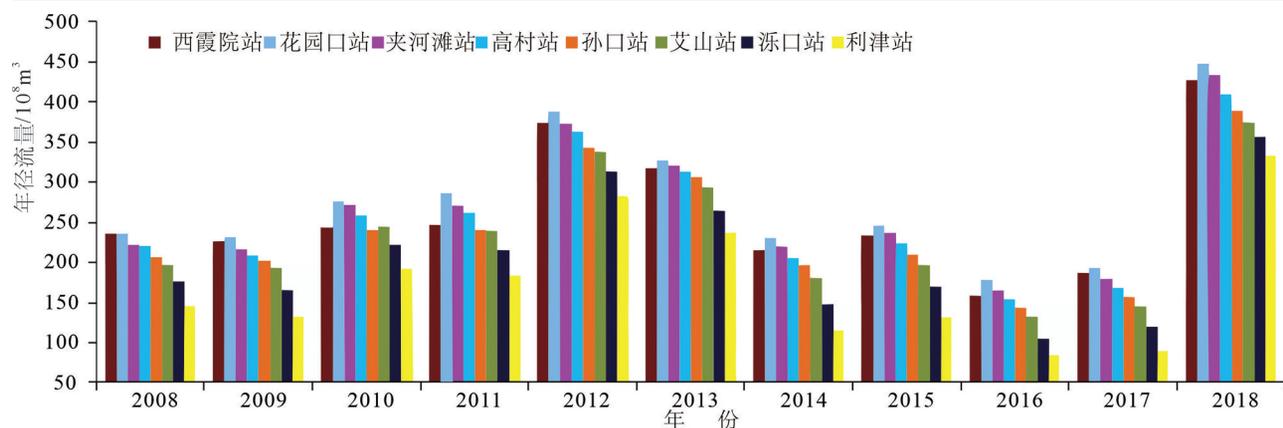


图10 黄河下游水文站实测年径流量变化(根据水文站收集资料统计)

Fig.10 Annual measured runoff in different hydrological stations in the lower reaches of the Yellow River

5 结 论

基于地下水动力场的刻画,地下水-地表水的¹⁸O和³H同位素含量分布特征的分析,本次研究认为:

(1)在小浪底水库运行20年后,黄河影响带在济南以西地区有明显增大,在济南以东地区有略微减小的趋势。当前黄河下游侧渗影响范围主要为5~25 km,最大的影响带位于郑州—新乡方向,可至25 km,最小的影响带在东部沿岸区域,影响带范围仅5 km。

(2)黄河河道的介质条件和黄河的补给条件为黄河侧渗提供了物质和流通基础。黄河水和沿岸地下水的水头差,是黄河影响带的决定因素。

(3)小浪底水库运行后,河道下切,河床渗透性增强,降低了河床物质对黄河水的“吸附和净化”能力。保护和控制黄河的水质,是黄河下游区地下水资源保护的基础,是黄河流域高质量发展的基础。

References

- Birks S J, Fennell J W, Gibson J J, Yi Y, Moncur M C, Brewster M. 2019. Using regional datasets of isotope geochemistry to resolve complex groundwater flow and formation connectivity in northeastern Alberta, Canada[J]. *Applied Geochemistry*, 101: 140–159.
- Cao Jianfeng, Ye Xueyan, Jiang Jiyi, Ping Jianhua, Li Sheng. 2005. Influences of the Yellow River downstream beaking on ground water resources of the watershed[J]. *Resources Science*, 05: 77–83 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiwei, Mu Xingmin. 2000. The situation, causes and scientific

- countermeasures on cut-off of the yellow river[J]. *Journal of Natural Resources*, 15(1): 31–35 (in Chinese).
- Chen Song, Gui Herong. 2019. The age and isotopic characteristics of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifer of the Huaibei coalfield[J]. *Geology in China*, 46(2): 337–345 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yali, Zhao Yunzhang, Shao Jingli, He Guoping. 2005. On infiltration of the Yellow River in perched section under pumping conditions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 32(1): 57–60 (in Chinese with English abstract).
- Derrien Morgane, Kim Min-Seob, Ock Giyoung, Hong Seongjin, Cho Jinwoo, Shin Kyung-Hoon, Hur Jin. 2018. Estimation of different source contributions to sediment organic matter in an agricultural-forested watershed using end member mixing analyses based on stable isotope ratios and fluorescence spectroscopy[J]. *Science of The Total Environment*, 618: 569–578.
- Dong Zhanfeng, Qu Aiyu, Ji Yunqing. 2020. On ecological environment protection of lower reaches of Yellow River with high-quality development strategy[J]. *Science & Technology Review*, 38(14): 109–115 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zongjun, Pang Xugui, Wang Min, Bian Jianchao, Dai Jierui, Zhang Zhaoxiang. 2010. The relationship between endemic fluoride disease and geological environment of several cities in the lower Yellow River basin of Shandong Province[J]. *Geology in China*, 37(3): 627–632 (in Chinese with English abstract).
- Jia Shaofeng, Liang Yuan. 2020. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. *Resources Science*, 42(1): 29–36 (in Chinese with English abstract).
- Joshi Suneel Kumar, Rai Shive Prakash, Sinha Rajiv, Gupta Sanjeev, Densmore Alexander Logan, Rawat Yadhvir Singh, Shekhar Shashank. 2018. Tracing groundwater recharge sources in the northwestern Indian alluvial aquifer using water isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$

- and ^3H][J]. *Journal of Hydrology*, 559: 835–847.
- Jung Youn-Young, Koh Dong-Chan, Yoon Yoon-Yeol, Kwon Hong-Il, Heo Joonghyeok, Ha Kyoochul, Yun Seong-Taek. 2019. Using stable isotopes and tritium to delineate groundwater flow systems and their relationship to streams in the Geum River basin, Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 573: 267–280.
- Liu Changming, Liu Xiaomang, Tian Wei, Xie Jiabin. 2020. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin urgently need to solve the water shortage problem. [J]. *Yellow River*, 421(9): 20–23 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Wang Suiji, Wang Yanjun. 2020. Variation of morphological parameters of channel cross-sections and their response to water-sediment processes in the Lower Yellow River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 40(9): 1563–1572 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhenyu, Mu Jianxin. 2017. Study on spatial and temporal evolution feature of water quality in Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 39(4): 66–70, 77 (in Chinese with English abstract).
- Peng Hong, Qu Shaojun, Sun Zanying. 2009. Analysis on scour and fill of Gaocun-Aishan section after operation of the Xiaolangdi reservoir[J]. *Yellow River*, 31(1): 28–29 (in Chinese with English abstract).
- Ping Jianhua, Cao Jianfeng, Su Xiaosi, Ye Xueyan, Jiang Jiyi. 2004. Application of isotopic technique in the research of the affected range of lateral seepage of the down-Yellow River water[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, (3): 399–404 (in Chinese with English abstract).
- Richards Laura A, Magnone Daniel, Boyce Adrian J, Casanueva-Marenco Maria J, Dongen Bart E van, Ballentine Christopher J, Polya David A. 2018. Delineating sources of groundwater recharge in an arsenic-affected Holocene aquifer in Cambodia using stable isotope-based mixing models[J]. *Journal of Hydrology*, 557: 321–334.
- Wang Fugang. 2006. The Application of Isotope Techniques in the Hydrological Cycle of Overground Section (Henan Section) of the Lower Reaches of Yellow River[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Wang Yingzhen, Xia Junqiang, Zhou Meirong, Deng Shanshan. 2020. Variations in Bankfull area and discharge in the braided reach of the Lower Yellow River over the past 30 years[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 28(3): 177–190 (in Chinese with English abstract).
- Wei Changxing, Liu Hailing, Huang Dingcheng, Zhang Yixiang. 2002. Study on the formation and evolution of the Yellow River suspension[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (1): 42–45 (in Chinese with English abstract).
- Shang Hongxia, Shen Guanqing, Li Guixi. 2008. Analysis on scour and fill effects of the Lower Yellow River in initial debris retaining of the Xiaolangdi reservoir[J]. *Yellow River*, 30(11): 24–26 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jianxing, Zhang Fawang, Qin Yisu, Li Ruimin, Ye Hao, Liu Zuzhi, An Lizhong, Pei Hanhua, Guo Zhenzhong, Zhao Yunzhang, Wang Yanjun. 2000. Groundwater resources and main environment-geological problems in the Huanghe river valley as well as some countermeasures[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2): 114–120 (in Chinese with English abstract).
- Shi Chao. 2009. The Application of Isotope Compartmental Mixing Cell Model in Hydrologic Cycle of Shallow Water in the Overground Section (Henan Section) in Lower Reaches of the Yellow River[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Su Chen, Cheng Zhongshuang, Zheng Zhaoxian, Chen Zongyu. 2019. Groundwater age and renewability in the north of Muling-Xingkai plain[J]. *Geology in China*, 46(2): 116–124 (in Chinese with English abstract).
- Su Chen, Cheng Zhongshuang, Wei Wen, Chen Zongyu. 2018. Assessing groundwater availability and the response of the groundwater system to intensive exploitation in the North China Plain by analysis of long-term isotopic tracer data[J]. *Hydrogeology Journal*, 26(5): 1401–1415.
- Su Chen, Zhang Fenge, Cui Xiaoshun, Cheng Zhongshuang, Zheng Zhaoxian. 2020. Source characterization of nitrate in groundwater using hydrogeochemical and multivariate statistical analysis in the Muling-Xingkai Plain, Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7): 456. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08347-6>.
- Sun Congjian, Chen Wei. 2018. Relationship between groundwater and surface water based on environmental isotope and hydrochemistry in upperstream of the Haihe River basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 38(5): 790–799 (in Chinese with English abstract).
- Sun Wenguang, Sun Zhigao, Mou Xiaojie, Sun Wanlong, Hu Xingyun. 2017. Nitrous oxide emissions from intertidal zone of the Yellow River estuary in autumn and winter during 2011–2012[J]. *Estuaries and Coasts*, 40(1): 145–159.
- Yang Shiqi, Wang Yongsheng, Liu Ruliang, Zhang Aiping, Yang Zhengli. 2017. Effect of nitrate leaching caused by Swine manure application in fields of the Yellow River irrigation zone of Ningxia, China[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 13693. DOI:10.1038/s41598-017-12953-9.
- Yu Yang, Xia Junqiang, Li Jie, Zhang Xiaolei. 2020. Influences of the Xiaolangdi Reservoir on the channel geometry and flow capacity of wandering reach in the Lower Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 45(1): 7–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinliang. 2018. Study on ecological water volume of the Lower Yellow River based on perched-river characteristics—"Study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the Lower Yellow River[J]. *Yellow River*, 40(9): 1–4 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Yunzhang, Shao Jingli, Yan Zhenpeng, Cui Yali, Jiao Hongjun, He Guoping. 2003. A preliminary study on the lateral seepage range of the lower Yellow River water[J]. Yellow River, 25(1): 3-5 (in Chinese).
- Zhao Yunzhang, Shao Jingli, Yan Zhenpeng, Cui Yali, Jiao Hongjun, He Guoping. 2004. Comprehensive approach to groundwater System Boundaries along the zone affected by the lower reaches of the Yellow River[J]. Acta Geoscientica Sinica, (1): 99-102 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹剑峰, 冶雪艳, 姜纪沂, 平建华, 李升. 2005. 黄河下游悬河段断流对沿岸地下水影响评价[J]. 资源科学, (5): 77-83.
- 陈松, 桂和荣. 2019. 淮北煤田太原组灰岩水年龄及同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 46(2): 337-345.
- 陈霖巍, 穆兴民. 2000. 黄河断流的态势、成因与科学对策[J]. 自然资源学报, 15(001): 31-35.
- 崔亚莉, 赵云章, 邵景力, 贺国平. 2005. 黄河下游地上悬河段开采条件下侧渗量变化研究[J]. 水文地质工程地质, 32(1): 57-60.
- 董战峰, 臧爱玉, 冀云卿. 2020. 高质量发展战略下黄河下游生态环境保护[J]. 科技导报, 38(14):109-115.
- 高宗军, 庞绪贵, 王敏, 边建朝, 代杰瑞, 张兆香. 2010. 山东省黄河下游部分县市地氟病与地质环境的关系[J]. 中国地质, 37(3): 627-632.
- 贾绍凤, 梁媛. 2020. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 42(1): 29-36.
- 刘昌明, 刘小莽, 田巍, 谢佳鑫. 2020. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题[J]. 人民黄河, 42(9): 20-23.
- 刘慰, 王随继, 王彦君. 2020. 黄河下游河道断面形态参数变化及其水沙过程响应[J]. 地理科学, 40(9): 1563-1572.
- 吕振豫, 穆建新. 2017. 水质污染时空演变特征研究[J]. 人民黄河, 39(4): 66-70, 77.
- 彭红, 曲少军, 孙赞盈. 2009. 小浪底水库运用以后高村-艾山河段冲淤分析[J]. 人民黄河, 31(1): 28-29.
- 平建华, 曹剑峰, 苏小四, 冶雪艳, 姜纪沂. 2004. 同位素技术在黄河下游河水侧渗影响范围研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), (3): 399-404.
- 王福刚. 2006. 同位素技术在黄河下游悬河段(河南段)水循环特征研究中的应用[D]. 吉林大学.
- 王英珍, 夏军强, 周美蓉, 邓珊珊. 2020. 近30年黄河下游游荡段平滩面积及流量变化特点[J]. 应用基础与工程科学学报, 28(3): 177-190.
- 魏常兴, 刘海龄, 黄鼎成, 张毅祥. 2002. 黄河悬河的形成演化研究[J]. 水文地质工程地质, (1): 42-45.
- 尚红霞, 申冠卿, 黎桂喜. 2008. 小浪底水库拦沙初期黄河下游冲淤效果分析[J]. 人民黄河, 30(11): 24-26.
- 石建省, 张发旺, 秦毅苏, 李瑞敏, 叶浩, 刘祖植, 安立忠, 裴捍华, 郭振中, 赵云章, 王彦俊. 2000. 黄河流域地下水资源、主要环境地质问题及对策建议[J]. 地球学报——中国地质科学院报, 21(2): 114-120.
- 史超. 2009. 同位素混合单元模型在黄河下游悬河段(河南段)浅层地下水循环研究中的应用[D]. 长春: 吉林大学.
- 苏晨, 程中双, 郑昭贤, 陈宗宇. 2019. 穆兴平原北部地下水年龄及更新性[J]. 中国地质, 46(2): 116-124.
- 孙从建, 陈伟. 2018. 基于稳定同位素的海河源区地下水与地表水相互关系分析[J]. 地理科学, 38(5): 790-799.
- 余阳, 夏军强, 李洁, 张晓雷. 2020. 小浪底水库对下游游荡河段河床形态与过流能力的影响[J]. 泥沙研究, 45(1): 7-15.
- 张金良. 2018. 基于悬河特性的黄河下游生态水量探讨——“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之三[J]. 人民黄河, 40(9): 1-4.
- 赵云章, 邵景力, 闫震鹏, 崔亚莉, 焦红军, 贺国平. 2003. 黄河水对两侧地下水补给范围的初步研究[J]. 人民黄河, 25(1): 3-5.
- 赵云章, 邵景力, 闫震鹏, 崔亚莉, 焦红军, 贺国平. 2004. 黄河下游影响带地下水系统边界的划分方法[J]. 地球学报, (1): 99-102.