

doi: 10.12029/gc20210402

韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 48(4): 1001–1019.

Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yuan Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin [J]. *Geology in China*, 48(4):1001–1019(in Chinese with English abstract).

## 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题

韩双宝<sup>1,2</sup>, 李甫成<sup>1</sup>, 王赛<sup>1</sup>, 李海学<sup>1</sup>, 袁磊<sup>1</sup>, 刘景涛<sup>3</sup>, 申豪勇<sup>4</sup>, 张学庆<sup>3</sup>,  
李长青<sup>5</sup>, 吴玺<sup>1</sup>, 马涛<sup>1</sup>, 魏世博<sup>1</sup>, 赵敏敏<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 南方科技大学, 广东 深圳 518055; 3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 5. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:**黄河流域是中国重要的生态屏障和经济地带, 上中下游面临着不同生态环境问题, 水在生态环境问题的形成演化过程中起着重要作用。本文从黄河流域地下水动态特征、地下水资源的数量、质量及开发利用等方面, 分析了黄河流域地下水资源及饮水安全状况。黄河流域年度地下水资源量 393.55 亿 m<sup>3</sup>, 银川平原、河套平原等 7 处主要平原(盆地)地下水资源量为 81.91 亿 m<sup>3</sup>, 占比超过 20%; 黄河流域地下水质量以 I~IV 类为主, 劣质地下水主要受总硬度、硫酸盐、铁、溶解性总固体等天然原生组分影响, 砷、氟、硒、碘等原生组分超标是流域部分地区地下水饮水安全的主要威胁; 2020 年与 2019 年同期相比, 黄河流域地下水位呈上游稳定、中游局部上升、下游下降的态势, 主要地下水降落漏斗形态基本稳定。针对黄河源区、宁蒙河套平原等重点区段, 分析了存在的主要生态环境问题, 提出了全面开展流域水文地质与水资源调查评价, 深入开展黄河流域及重点地区水平衡分析等工作建议。

**关键词:**黄河流域; 地下水资源; 地下水位; 生态环境问题; 水平衡分析

中图分类号: TV213.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1001-19

## Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin

HAN Shuangbao<sup>1,2</sup>, LI Fucheng<sup>1</sup>, WANG Sai<sup>1</sup>, LI Haixue<sup>1</sup>, YUAN Lei<sup>1</sup>, LIU Jingtao<sup>3</sup>,  
SHEN Haoyong<sup>4</sup>, ZHANG Xueqing<sup>3</sup>, LI Changqing<sup>5</sup>, WU Xi<sup>1</sup>, MA Tao<sup>1</sup>, WEI Shibo<sup>1</sup>,  
ZHAO Minmin<sup>1</sup>

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 4. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China; 5. China Institute for GeoEnvironmental Monitoring, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2021-06-16; 改回日期: 2021-07-07

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190333)资助。

作者简介: 韩双宝, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事水文地质与水资源调查研究工作; E-mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 李甫成, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事地下水资源调查评价工作; E-mail: lifucheng@mail.cgs.gov.cn。

**Abstract:** The Yellow River basin is an important ecological barrier and economic zone in China. The upper, middle and lower reaches of the Yellow River are faced with different ecological environmental problems. Water plays an important role in the formation and evolution of ecological environmental problems. Based on the quantities, qualities, settlements and dynamic characters of groundwater, the groundwater resources and the drinking water safety of the YRB were analyzed. The results show that total avenue groundwater resource of the YRB in 2019 is  $3.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$ . Groundwater resources in seven key plain regions, such as Yinchuan plains and Hetao plains, is  $8.19 \times 10^9 \text{ m}^3$ , contributing more than 20% groundwater resources of the whole basin. The groundwater qualities in YRB dominated is mainly classified as I–IV grade. The concentration of total hardness, sulfate, iron, TDS and  $\text{Cl}^-$  exceed the groundwater standard at high rate. Excessive arsenic, fluoride, selenium, iodine and other primary components threaten the local drinking water safety. Compared with the same period in 2019, the groundwater table kept stable in the upper reach, local rising in the middle reach and decreasing in the lower reach in 2020. The morphological characters of main groundwater depression cone kept basically stable. Focusing on the key regions of the YRB, such as the sources area, Hetao Basin, etc., based on the analysis of the eco–environmental problems, it is proposed to carry out the whole basin resource survey and assessment, deeply develop water balance research in the whole basin and key regions.

**Key words:** Yellow River Basin; groundwater resources; groundwater table; eco–environmental problem; water balance research

**About the first author:** HAN Shuangbao, male, born in 1983, senior engineer, engaged in the research of hydrogeology and water resources; E–mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn.

**About the corresponding author:** LI Fucheng, male, born in 1985, senior engineer, engaged in the investigation and evaluation of groundwater resources; E–mail: lifucheng@mail.cgs.gov.cn.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190333).

## 1 引 言

黄河是中国第二大河,流域位置介于  $95^{\circ}54' \sim 119^{\circ}13'E$ ,  $32^{\circ}09' \sim 41^{\circ}50'N$ 。黄河干流全长 5464 km,水面落差 4480 m,流域总面积 79.45 万  $\text{km}^2$  (含内流区 4.2 万  $\text{km}^2$ ) (图 1)。黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省(自治区),穿越黄土高原及华北平原,在山东垦利县注入渤海。黄河流域自北向南横跨干旱、半干旱、半湿润三个气候分区,大部分区域位于干旱半干旱区,流域多年平均气温为  $9.5^{\circ}\text{C}$ ,降水量为 466.5 mm,蒸散量为 653.6 mm (肖风劲等, 2021)。

黄河流域生态保护和高质量发展已成为国家重大战略,但黄河流域水资源条件先天不足,人均年水资源量仅为全国平均的 1/5。黄河年均河川天然径流量约 560 亿  $\text{m}^3$ , 占全国河川径流的 2%, 却担负着全国 15% 的耕地面积和 12% 人口的供水任务,此外,黄河每年还需向外流域大规模调水 (马柱国等, 2020)。黄河流域地表水资源开发利用率高达 80%, 水资源净消耗率达 70%, 远超黄河水资源承载能力, 水资源短缺仍是黄河当前与未来的最大挑战

(刘昌明等, 2019)。地下水资源具有储量稳定、水质较好等特点,在调节水资源循环演化、维系生态系统健康、保障优质水源等方面起着重要作用。摸清黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题对流域水资源可持续利用与经济社会高质量发展具有重要意义。

本文基于中国地质调查局组织实施的“黄河流域水文地质调查”工程,在流域地下水统测监测、重点区水文地质与水资源调查、年度地下水资源评价、综合研究等工作基础上,通过解析黄河流域近年来地下水位变化及降落漏斗分布状况、年度地下水资源分布及开发利用状况、地下水质量与饮水安全的主要影响因素,研判流域不同区段主要生态环境问题,给出黄河流域亟待解决的基础科学问题及相关工作建议,为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

## 2 研究区水文地质概况

### 2.1 水文地质条件

黄河流域由西向东横跨青藏高原、黄土高原、华北平原三个地理阶梯,流域三大阶梯对气候、自然景观以及水资源形成演化都起着决定性的作

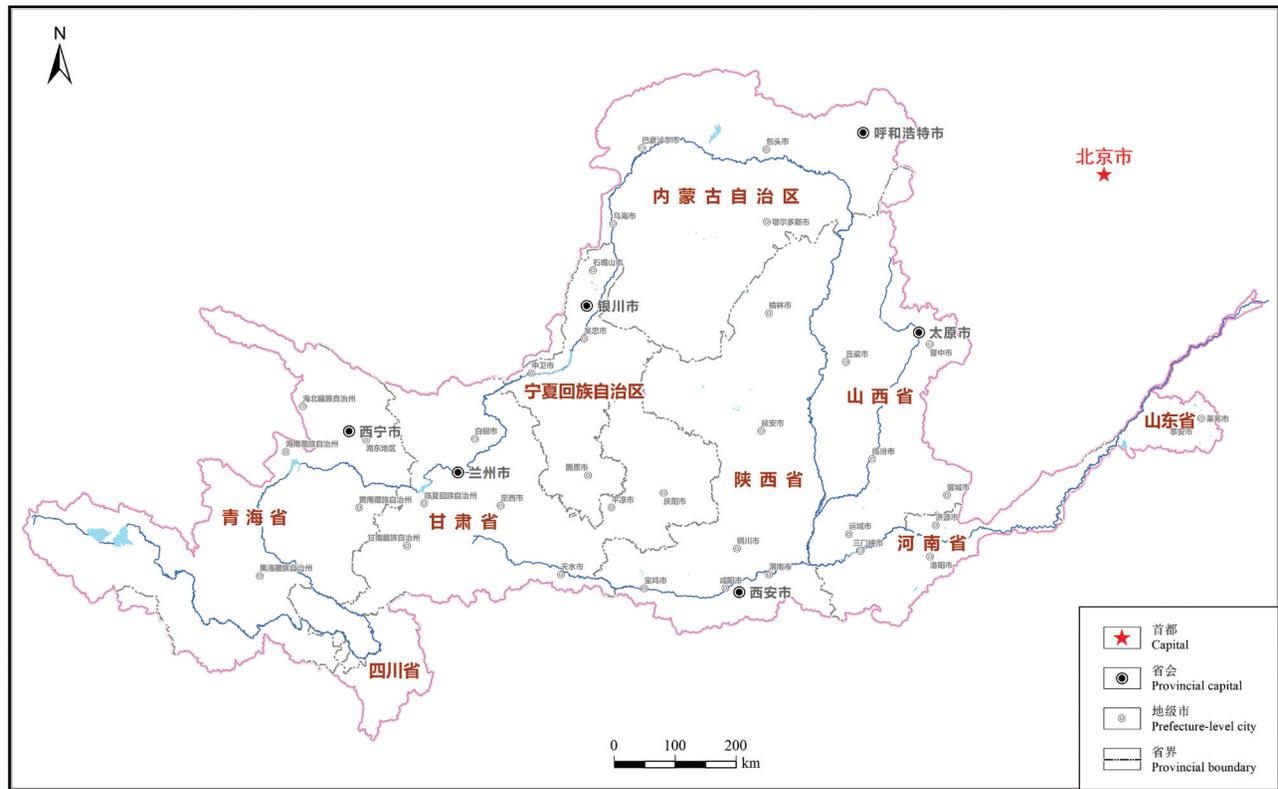


图1 黄河流域地理位置图

Fig.1 Location of the YRB (the Yellow River Basin)

用。根据地下水的主要赋存介质,黄河流域地下水类型可划分为松散岩类孔隙水(包括松散岩类平原盆地孔隙水、黄土高原孔隙水)、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩裂隙岩溶水、岩浆岩和变质岩类基岩裂隙水、冻结层水5类(图2)。其中,松散岩类平原盆地孔隙水主要分布于干支流平原河谷区、鄂尔多斯盆地北部沙漠滩区,含水层以冲积、洪积、冲洪积砂砾卵石层为主,常具多层结构,是流域最富水的含水层;松散岩类黄土高原孔隙水广泛分布于流域中部陇东、陕北等地,富水性差且分布不均,局部黄土塬区具有一定的分散供水意义;碳酸盐岩裂隙岩溶水主要分布在吕梁山、中条山、西秦岭、太行山、泰山以及渭北岩溶区等地,含水层以寒武—奥陶系碳酸盐岩为主,富水性较好,分布有诸多城镇集中供水水源地;碎屑岩孔隙裂隙水主要分布于流域上游山地区和鄂尔多斯盆地,水量分布不均且水质较差;岩浆岩与变质岩类裂隙水广泛分布于丘陵山区,以大青山及秦岭地区最为集中,富水性一般较差;冻结层水主要分布于黄河源和祁连山,是黄河

流域重要的水源涵养区,对流域水资源循环演化起重要的调节作用。

丘陵山区基岩裂隙水补给方式较为单一,以大气降水为主,由于地形切割强烈,地下水多以泉形式排泄,或通过河谷潜流转化成地表水。岩溶裂隙水除大气降水补给外,地表水渗漏也是重要补给源,地下水沿岩溶裂隙通道循环较深,常形成与地表不完全一致的地下水流域,多以大泉形式排泄,有时也以侧向径流或顶托形式补给地表水或其他含水层。

平原盆地区地下水主要接受降水入渗、地表水渗漏、基岩山区地下水侧向径流或顶托补给。地下水由山区向平原盆地径流过程中转化极为复杂,山前洪积扇为重要补给区,除接受降水入参与山区地下水的侧向补给外,地表水常大量漏失补给地下水,在洪积扇前缘复溢出成泉或侧向补给平原盆地区地下水;进入平原盆地后,含水层中常隔有稳定的厚层粘土层,形成潜水与承压水上下叠置的多层含水系统结构,地下水向下游径流过程中,河水多

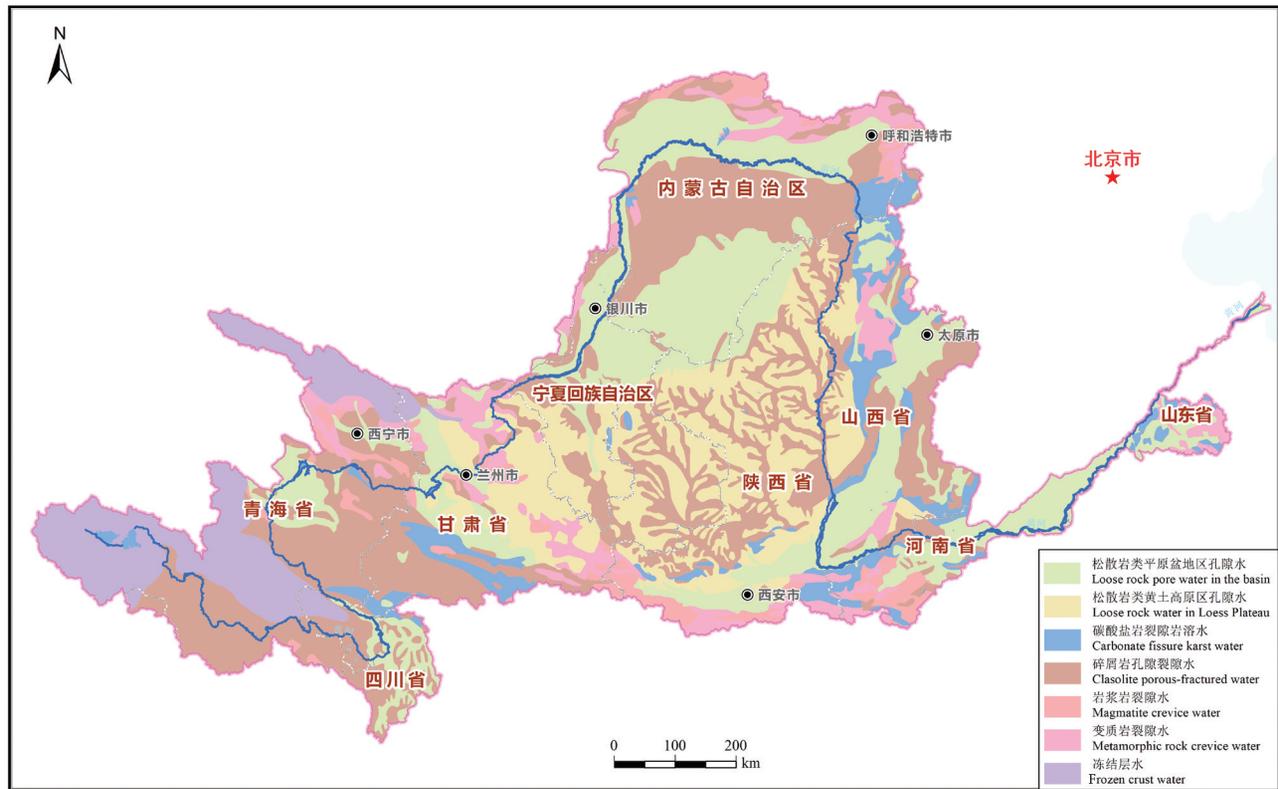


图2 黄河流域地下水类型分区图

Fig.2 Division of groundwater types of the YRB

构成地下水的最低排泄基准面,人工开采、垂向蒸发和侧向径流排泄是主要排泄方式。此外,灌区大量灌溉水回归补给,促使潜水位进一步抬高,蒸发排泄随之加剧。尽管局部地区存在潜水补给承压水、河水补给潜水,但总的趋势是由山前洪积扇至盆地下游依次形成补给区、径流区和排泄区。鄂尔多斯盆地北部沙漠滩区主要依靠大气降水及凝结水补给,除蒸发排泄外,潜水以泉和地下径流形式补给地表水。

## 2.2 地下水资源分区

地下水资源分区是地下水资源评价的基础,本次地下水资源区划分在黄河一级流域边界基础上,充分吸收《新一轮“中国地下水资源”》中水文地质单元划分成果,综合考虑不同层级水文地质单元的含水层介质、地下水赋存特征、地下水补径排条件等,在同一尺度及精度上重新构建了黄河流域地下水资源分区。本次划分对银川平原、河套平原、关中盆地、太原盆地等具有盆山结构特征的水文地质单元界线进行了精细刻画,参考近20年以来区域水文地质调查的相关成果,厘定了山西岩溶泉域(梁

永平等,2010)、鄂尔多斯盆地北部闭流区(侯光才等,2008)、渭北隐伏岩溶区等水文地质单元的地下水分水岭。黄河流域共划分为地下水资源二级区4个,三级区11个,四级区31个,五级区109个(图3、表1)。

## 2.3 区域地下水水位动态特征

### 2.3.1 地下水位变化

从20世纪70年代开始,随着人口增长和城市化发展,强烈的人类活动和气候变化导致流域内主要平原盆地和干支流河谷区地下水位出现局部或区域性下降(林学钰等,2006),总体可以划分为快速下降—缓慢下降—稳定或水位回升3个阶段。尤其是随着城市规模的扩大、工业生产和农业灌溉用水量增加,城市水源地和农业灌溉区地下水位均出现不同程度下降,比如汾渭盆地和下游干流区呈现区域性地下水位下降(石建省等,2000),西安城区承压水水源地与天然流场相比地下水位累计降幅超过120 m(陶虹等,2013)。21世纪初期以来,随着城市水源地和工业生产开采量的减少和用水结构的调整,地下水位下降的趋势得到明显改善,局部

表1 黄河流域地下水资源分区表  
Table 1 Groundwater resources division of The YRB

二级分区	三级分区	四级分区	五级分区及序号
兰州以上区	龙羊峡以上区	河源至玛曲	扎陵湖区(1)、玛曲地区(2)、川西高山高原(3)
		玛曲至龙羊峡	兰木措曲(4)、玛沁地区(5)、泽库地区(6)、同德地区(7)、共和地区(8)
	龙羊峡至兰州区	龙羊峡至兰州干流区	贵德地区(9)、同仁地区(10)、尖扎地区(11)、化隆地区(12)、循化地区(13)、庄浪河(14)
		湟水	湟水河(15)、大通河(16)
兰州—河口镇区	龙羊峡至兰州区	大夏河	夏河(17)、夏河-双城(18)、临夏-银川(19)
		洮河	碌曲(20)、博拉河(21)、下巴沟—岷县(22)、岷县—李家村(23)、广通河(24)、洮河下游(25)
	兰州至河口镇区	兰州至下河沿	宛川河(26)、乌金峡东(27)、祖厉河(28)、靖远黄河东(29)、白银黄河西(30)
		下河沿至石嘴山	宁南黄土丘陵及河谷平原(31)、宁中山地及山间平原(32)
中游区	闭流区(上游)	石嘴山至河口镇	贺兰山(33)、银川平原(34)、都思兔河—苦水河(35)
		摩林河	桌子山(36)、河套平原(37)、阴山南麓基岩山区(38)、库布齐沙漠(39)
	闭流区(中游)	盐海子	摩林河(40)
		盐池	盐海子(41)
中游区	闭流区(中游)	苏贝淖	盐池(42)
		窟野河—秃尾河	苏贝淖(43)
	河口镇至龙门区	无定河	皇甫川(44)、窟野河(45)、窟野河沙漠滩区(46)、秃尾河沙漠滩区(47)、秃尾河(48)
		吕梁山西麓	无定河沙漠滩区(49)、无定河(50)、延河(51)
中游区	龙门至三门峡区	渭河流域上游	吕梁山西麓北部基岩山区(52)、天桥岩溶(53)、柳林岩溶(54)、吕梁山西麓南部基岩山区(55)
		泾河	渭河陇西段(56)、榜沙河(57)、散渡河(58)、葫芦河(陇水)(59)、牛头河(60)、通关河(61)、渭河上游河谷段(62)
	中游区	泾河	马连河西川上段(63)、西川黄土丘陵(64)、东川黄土丘陵(65)、茹河(66)、马莲河(67)、泾河上游(68)、泾河中游(69)
		洛河	纳河(70)、达溪河—黑河(71)、千河(72)
中游区	龙门至三门峡区	关中盆地	北洛河上游(73)、北洛河中下游(74)、葫芦河(华水)(75)、沮河(76)、濛水河(77)
		宏农—青龙涧河	关中平原(78)、渭北岩溶(79)、秦岭北麓基岩山区(80)
	中游区	涑水河	中条山南麓西侧基岩山区(81)、宏农—青龙涧河(82)
		汾河	运城盆地(83)、运城盆地基岩山区(84)
下游区	花园口以下干流区	三门峡至小浪底干流区	太原盆地(85)、太原盆地基岩山区(86)、临汾盆地(87)、临汾盆地西侧基岩山区(88)、临汾盆地东侧基岩山区(89)
		小浪底至花园口干流区	中条山南麓东侧基岩山区(90)、黛眉山基岩山区(91)
	三门峡至花园口	沁丹河	蟒河(92)、汜水河(93)
		伊洛河	沁河上游基岩山区(94)、三姑岩溶(95)、延河岩溶(96)、沁丹河(97)
下游区	花园口以下干流区	金堤河和天然文岩渠	伊洛河中上游(98)、伊洛盆地(99)、伊洛盆地北部基岩山区(100)、伊洛盆地南部基岩山区(101)、伊河(102)
		大汶河	花园口以下干流区(103)
下游区	大汶河	泰山基岩山区	金堤河和天然文岩渠(104)
		泰山基岩山区	东平湖(105)、大汶口盆地(106)、莱芜盆地(107)、新泰盆地(108)
			泰山基岩山区(109)

地区水位开始回升。尤其是2015年以后,沿黄各省大力推进地下水超采区治理、实施水源置换工程和地下水限采禁采措施,城市区地下水位总体呈现稳中有升态势,但部分农业井灌区仍然呈下降趋势。

银川平原:受地下水水源地开采影响,2014—2019年,银川平原银川市、石嘴山市水源地附近和贺兰山山前等出现小范围的水位明显下降区,面积约532 km<sup>2</sup>。近年来,由于引黄灌区渠系衬砌率的提高等因素,灌区入渗补给量减少,浅层地下水位呈稳中有降趋势。

河套平原:受城市生活、工业生产开采地下水影响,2010—2019年,河套平原呼和浩特市、包头市城区等区域均出现地下水位下降区,面积约249 km<sup>2</sup>。引黄灌区浅层地下水位总体稳定,但部分井灌区仍然存在水位下降。

鄂尔多斯盆地:2007—2020年,鄂尔多斯北部沙漠高原地下水位总体稳定,局部地区因煤矿开采破坏含水层结构和农业灌溉开采等,造成地下水位快速下降,引发地表植被枯萎、湖泊萎缩等生态环境问题。

汾河流域:2003—2019年,汾河流域太原、临汾

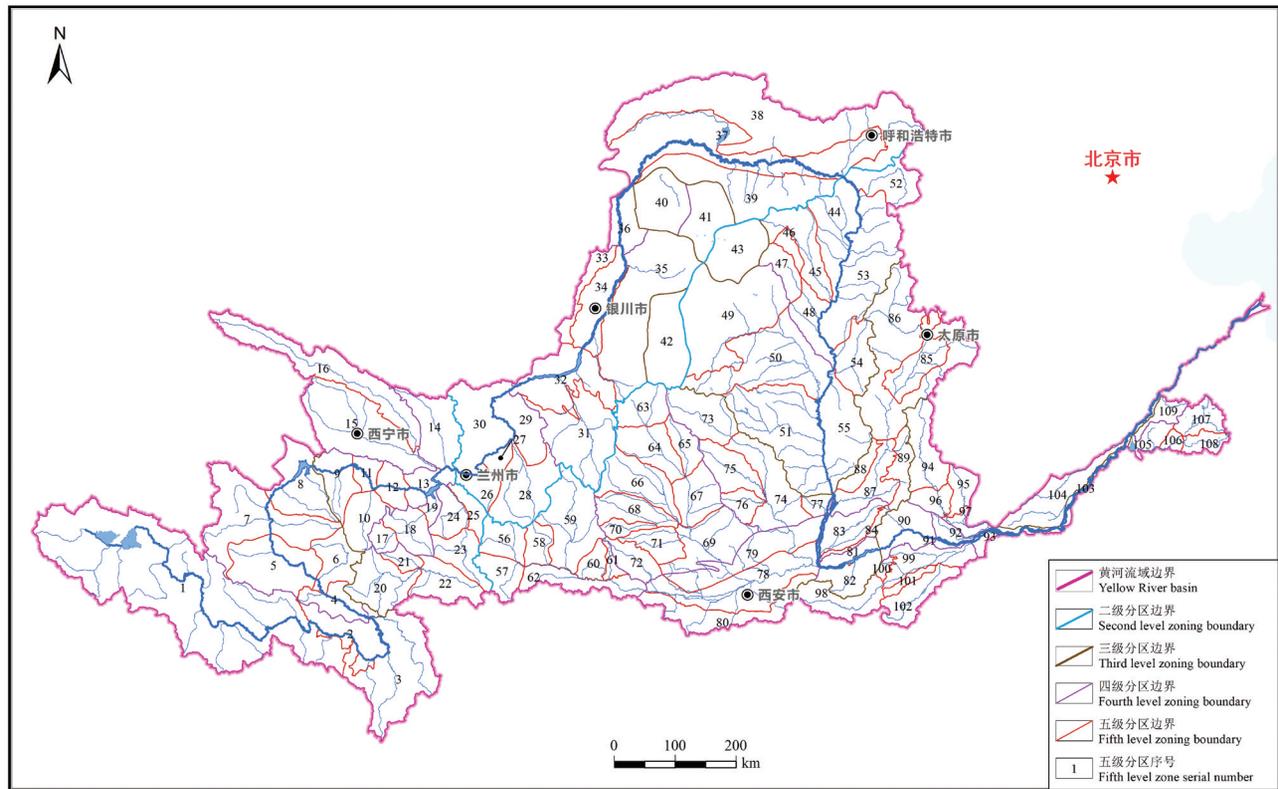


图3 黄河流域地下水资源分区图(五级分区名称及序号见表1)

Fig.3 Division of groundwater resources of the YRB (Table 1 shows the zone name corresponding to the fifth level zone serial number)

和运城盆地地下水位总体稳定,临汾市西南部和介休宋古等地区存在小面积的下降区。近两年受地下水控采影响,中深层地下水位总体上升。

关中盆地:2013—2020年,受城镇供水和农业开采双重影响,关中盆地北山山前黄土台塬、兴平—咸阳一带渭河二级阶地水位下降区约1054 km<sup>2</sup>;东部大荔沙苑地区受农业开采影响,水位下降区面积约88 km<sup>2</sup>。

下游干流区:2010—2019年,下游干流区及影响带受农业灌溉及工业生产开采地下水影响,地下水位下降区面积约3044 km<sup>2</sup>,主要分布在温县—孟州—沁阳和原阳—封丘—长垣一带。近两年下游区域浅层地下水位降幅0~2 m,但郑州市、焦作市等部分城市由于水源置换减少了地下水开采量,市区地下水位均有所回升。

2019—2020年同期地下水统测结果表明,黄河流域主要平原盆地地下水位整体稳定,上游河谷盆地、银川平原潜水平均地下水位下降分别约为0.11 m、0.5 m,河套平原和鄂尔多斯盆地浅层地下水位基本无变化;中游汾渭盆地潜水和承压水地下水位上升

大于0.5 m的区域面积分别占61%和54.5%;下游干流区地下水位下降大于0.5 m区域面积占50.7%。大气降水、地下水开采及限采压采、水利工程建设等均会对区域地下水位变化产生较大影响。

### 2.3.2 地下水降落漏斗

结合主要平原盆地区地下水位埋深和地下水流场特征,对比历史流场数据,圈定黄河流域主要地下水降落漏斗21处,总面积3542 km<sup>2</sup>。其中,中型漏斗(大于1000 km<sup>2</sup>)1处,中小型漏斗(50~1000 km<sup>2</sup>)7处,其余为小型降落漏斗(表2)。黄河流域降落漏斗多形成于20世纪80年代,总体呈面积减小、中心水位逐渐恢复态势,水源集中开采为降落漏斗最主要的成因。

黄河上游地下水降落漏斗多分布于河谷平原水源地周边,漏斗剖面呈“圆锥”状,面积一般小于30 km<sup>2</sup>,受地表水入渗补给等影响,大部分漏斗处于相对稳定或恢复态势。上中游大型平原盆地区银川、西安、太原等城市集中供水水源地附近的降落漏斗主要以潜水—承压水含水层多层叠置型为主,剖面形状剖面由“圆锥”状逐渐演变为或“浅盘”状,

表2 黄河流域2020年主要地下水降落漏斗基本信息

Table 2 Basic information of groundwater depression cone in the YRB

序号	漏斗名称	漏斗面积/km <sup>2</sup>		中心水位埋深/m		地下水位	漏斗成因
		2019年	2020年	2019年	2020年	变化	
1	西宁市新安庄漏斗	6.34	6.34	11.87	12.11	上升	城市水源地开采
2	西宁市杜家庄漏斗	8.19	8.19	15.32	21.81	上升	城市水源地开采
3	西宁市徐家寨漏斗	12.59	12.59	14.37	14.68	上升	城市水源地开采
4	西宁市塔尔漏斗	6.89	6.89	8.50	9.80	基本稳定	城市水源地开采
5	西宁市石家庄漏斗	4.14	4.14	14.82	14.85	基本稳定	城市水源地开采
6	西宁市丹麻寺漏斗	28.02	28.02	14.62	22.09	基本稳定	城市水源地开采
7	西宁市多巴漏斗	27.01	27.01	14.12	13.60	上升	城市水源地开采
8	定西市内官镇漏斗	—	8.12	—	100.40	—	城市水源地和农业灌溉开采
9	白银市平川平原漏斗	—	16.36	—	118.20	—	城市水源地和农业灌溉开采
10	银川市北郊水源地漏斗	170.20	66.00	20.10	4.40	上升	城市水源地开采
11	石嘴山市大武口水源地漏斗	53.50	34.00	15.70	9.70	上升	城市水源地开采
12	包头市土右旗漏斗	43.48	43.48	26.51	28.03	下降	城市水源地和农业灌溉开采
13	呼和浩特市水源地漏斗	160.77	160.77	54.60	54.60	基本稳定	城市水源地开采
14	渭南市大荔南部沙苑漏斗	195.20	147.60	30.08	36.94	下降	农业灌溉开采
15	西安城区自备井漏斗	70.90	70.90	76.29	74.42	基本稳定	城市水源地开采
16	西安市灞河水源地	9.69	9.69	63.58	67.05	下降	城市水源地开采
17	宝鸡城区	87.10	87.10	71.51	70.55	基本稳定	城市水源地开采
18	太原城区漏斗	86.15	120.87	52.98	49.63	基本稳定	城市水源地开采
19	介休市宋古乡漏斗	222.10	234.01	139.75	139.50	基本稳定	城市水源地和农业灌溉开采
20	临汾尧都区—襄汾县漏斗	131.10	168.20	61.62	64.11	基本稳定	工农业开采
21	濮阳市清丰南乐漏斗	2233.48	2281.80	39.14	39.66	基本稳定	城市水源地和农业灌溉开采
22	合计	3556.85	3542.08				

面积一般30~200 km<sup>2</sup>,除汾河流域降落漏斗略微增大外,大部分漏斗区基本稳定,中心水位以稳中有升为主;农业井灌区降落漏斗多为“平底锅”状,面积一般大于150 km<sup>2</sup>。下游干流及影响带浅层地下水位普遍下降,形成跨流域的水位下降区,对比历史资料,清丰—南乐等长期存在的区域降落漏斗中心水位回升、漏斗面积略有增加。

以关中盆地地下水降落漏斗进行重点剖析。关中盆地主要分布4处降落漏斗,面积9.6~147.6 km<sup>2</sup>(图4)。其中,西安和宝鸡城区降落漏斗受水源地长期开采影响,呈区域性椭圆形“平底锅状”、“浅盘状”;灞河水源地、大荔沙苑降落漏斗多为近“圆锥状”。与2019年相比,西安及宝鸡城区降落漏斗面积基本无变化,中心水位分别上升1.87 m、0.87 m;灞河水源地降落漏斗中心水位下降4.8 m;大荔沙苑漏斗面积减小47.76 km<sup>2</sup>,漏斗中心水位较去年同期下降5.86 m,达36.94 m。

关中盆地潜水和承压水年际水位平均变幅为+

0.8 m、+0.53 m,强上升区主要分布在渭河河谷阶地和秦岭北部冲洪积扇区,强下降区主要分布在水源地和扶风—岐山井灌区、西安灞河水源地和东部大荔县沙地区。2020年关中盆地年降雨量同比增加18.6%,是区域地下水位上升的主要原因,地下水水源地持续强采是漏斗区水位下降的主要因素。

### 3 地下水资源分布及开发利用状况

#### 3.1 地下水资源量及其分布特征

依据自然资源部中国地质调查局《全国地下水资源评价技术要求(试行稿)》,采用水均衡法、补给量总和法、水文分割法等多种方法联合开展黄河流域2019—2020年度地下水资源评价,本次评价的地下水资源量为TDS≤2 g/L的地下水天然补给量。

采用GPM全球卫星降水测量数据,估算黄河流域年度大气降水量为457.51 mm,折合降水资源量约3798亿m<sup>3</sup>。黄河流域年度地下水总补给量为444.90亿m<sup>3</sup>,地下水资源量为393.55亿m<sup>3</sup>,平均地

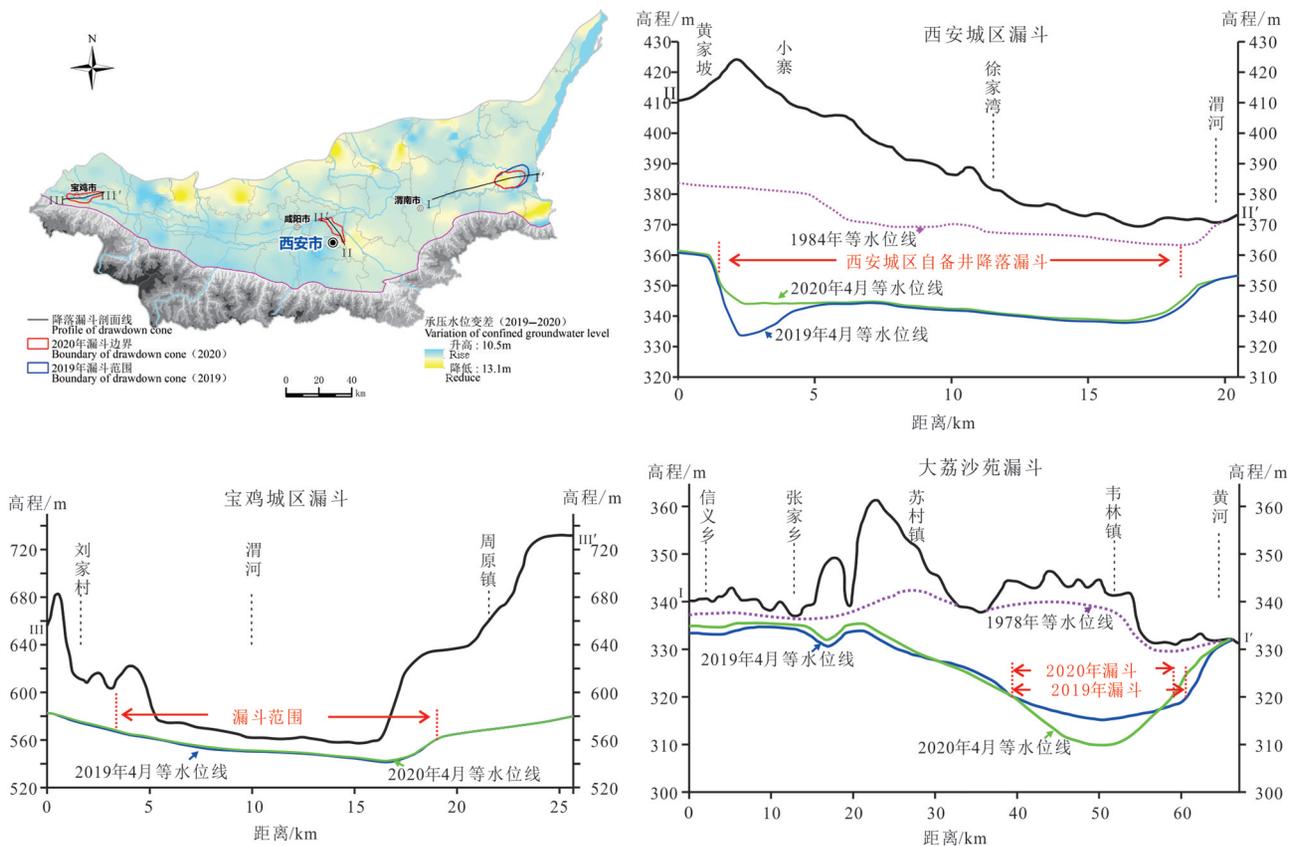


图4 关中平原地下水位变差与降落漏斗空间分布图

Fig.4 Groundwater level variation and spatial distribution of depression cone in Guanzhong Basin

下水资源模数为  $5.12 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。其中,平原区地下水资源量  $145.32 \text{ 亿 m}^3$ ,山丘区地下水资源量  $266.27 \text{ 亿 m}^3$ ,重复量  $18.04 \text{ 亿 m}^3$ 。龙门至三门峡区、龙羊峡以上区、龙羊峡至兰州区地下水资源量相对较丰富。地下水资源模数分布呈上、下游最高,中游及中上游偏低特征,花园口以下干流区地下水资源模数最高,为  $15.23 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ;闭流区(上游)地下水资源模数最低,为  $1.53 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ (表3)。

黄河流域平原盆地地下水资源最为丰富,其中银川平原、河套平原、关中平原、太原盆地、运城盆地、临汾盆地、下游干流区等7处主要平原盆地的地下水资源量为  $81.91 \text{ 亿 m}^3$ ,地下水资源模数多大于  $9 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。7处平原盆地区面积约  $6.79 \text{ 万 km}^2$ ,仅占黄河流域的  $9.3\%$ ,但其地下水资源量占比超过  $20\%$ (表4,图5)。

### 3.2 主要平原盆地地下水储变量

已有研究表明,2003—2015年间黄河流域地下

水储量总体呈年均递减态势(Zhang et al., 2019)。地下水储量时间上主要受地下水开采、植被作物类型等人为因素控制,空间上受控于地理位置和城市化水平(Mi et al., 2020)。依据《全国地下水资源评价技术要求(试行稿)》,基于黄河流域2019—2020年同期地下水水位数据,采用体积法计算了流域24处平原盆地(包括上游河谷区)年度地下水储变量,总体上呈上游稳定、中游增加、下游减少的态势。

流域上游湟水河主要河谷平原区地下水储量总体上基本稳定,年度地下水储量减少  $0.39 \text{ 亿 m}^3$ ,应为地下水自然波动;银川平原地下水储量减少  $2.82 \text{ 亿 m}^3$ ,初步分析为灌溉入渗补给量减少等影响;河套平原地下水储量与开采活动密切相关,地下水储量减少  $2.37 \text{ 亿 m}^3$ ;中游汾渭盆地主要受大气降水增多影响,地下水储量增加约  $13.96 \text{ 亿 m}^3$ ,其中潜水增加  $12.93 \text{ 亿 m}^3$ ;下游干流区主要受工农业生产开采地下水影响,地下水储量减少约  $1.90 \text{ 亿 m}^3$ (表5)。

表3 黄河流域三级分区地下水资源量  
Table 3 Groundwater resources quantities in the third level zone of the YRB

地下水资源三级分区	评价面积/万 km <sup>2</sup>	地下水资源量/亿 m <sup>3</sup>				地下水资源模数 /(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ·a)
		山丘区	平原区	重复量	合计	
龙羊峡以上区	10.92	74.38	-	-	74.38	6.81
龙羊峡至兰州区	8.66	56.45	-	-	56.45	6.52
兰州至河口镇区	16.45	15.07	41.10	5.69	50.48	3.07
闭流区(上游)	2.40	0.32	3.35	0	3.67	1.53
闭流区(中游)	0.75	0.00	3.22	0	3.22	4.30
河口镇至龙门区	12.01	26.76	26.78	0	53.54	4.46
龙门至三门峡区	19.24	61.05	38.20	9.22	90.03	4.68
三门峡至花园口区	4.15	26.69	11.02	0.26	37.45	9.01
花园口以下干流区	0.42	-	6.32	-	6.32	15.23
金堤河和天然文岩渠	0.74	-	7.79	-	7.79	10.50
大汶河	1.11	5.55	7.54	2.88	10.21	9.19
合计		266.27	145.32		393.55	5.12

### 3.3 地下水质量与饮水安全

#### 3.3.1 地下水质量评价

依据《全国地下水资源评价技术要求(试行稿)》,基于国家地下水监测工程1639组地下水水质测试数据,采用35项常规单指标评价和多指标综合评价相结合的方法,开展黄河流域地下水质量评价,单项指标评价参照《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)限值。

黄河流域潜水散点水化学类型以HCO<sub>3</sub>型为主,占比44.21%;HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>型、SO<sub>4</sub>·Cl型次之,占比分别为18.87%、16.68%;承压水化学类型仍以HCO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub>·Cl、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>型为主,占比分别为31.92%、16.97%、21.77%。黄河流域地下水质量以I~IV类为主,占比73.95%,其中,I~III类水质点230个,IV类水质982个,分别占比14.03%、59.92%。从区域地下水水质特征看,丘陵山地区地下水水质优于平原盆地区。

黄河流域地下水中总硬度、硫酸盐、铁、溶解性总固体、氯化物等天然原生组分超标率较高,主要

受原生沉积环境影响。在人类活动集中区,生活污染物排放等导致地下水水质局部异常,总硬度、硫酸根、氯离子等指标呈升高态势。三氮污染多分布在城镇区、污染地表水体两侧,呈面状分布,主要为生活污染所致。局部地区存在重金属污染,多分布在工矿集中区和尾矿库周边,以Cr(VI)、Cd、Hg等为主,主要受矿产开发冶炼等影响。

#### 3.3.2 饮水安全

地下水是黄河流域居民生活的重要水源,近45%的生活用水由地下水供给,饮水水质安全和健康风险极为重要。地下水原生环境污染中,砷、氟等组分超标可能引发砷中毒、氟中毒等饮水型地方病。黄河流域存在砷、氟、硒、碘等区域性原生地下水环境问题(张福存等,2010;Wen et al., 2013),依据《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)等,选取地下水中与饮水型地方病关系比较紧密的砷、氟、硒、碘四种组分,按照从劣原则进行流域地下水质量区划(表6)。

黄河流域地下水砷氟硒碘质量区划覆盖了主

表4 黄河流域主要平原盆地地下水资源量  
Table 4 Groundwater resources quantities of the main plains basin in the YRB

主要平原盆地	评价面积/万 km <sup>2</sup>	地下水资源量/亿 m <sup>3</sup>	地下水总补给量/亿 m <sup>3</sup>	地下水资源模数/(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ·a)
银川平原	0.77	12.72	15.46	16.52
河套平原	2.53	25.84	36.30	10.21
关中平原	1.35	23.58	25.68	17.47
运城盆地	0.52	2.24	6.35	4.31
太原盆地	0.61	5.91	7.15	9.69
临汾盆地	0.59	5.30	5.82	8.98
下游干流区	0.42	6.32	8.85	15.05
合计	6.79	81.91	105.61	

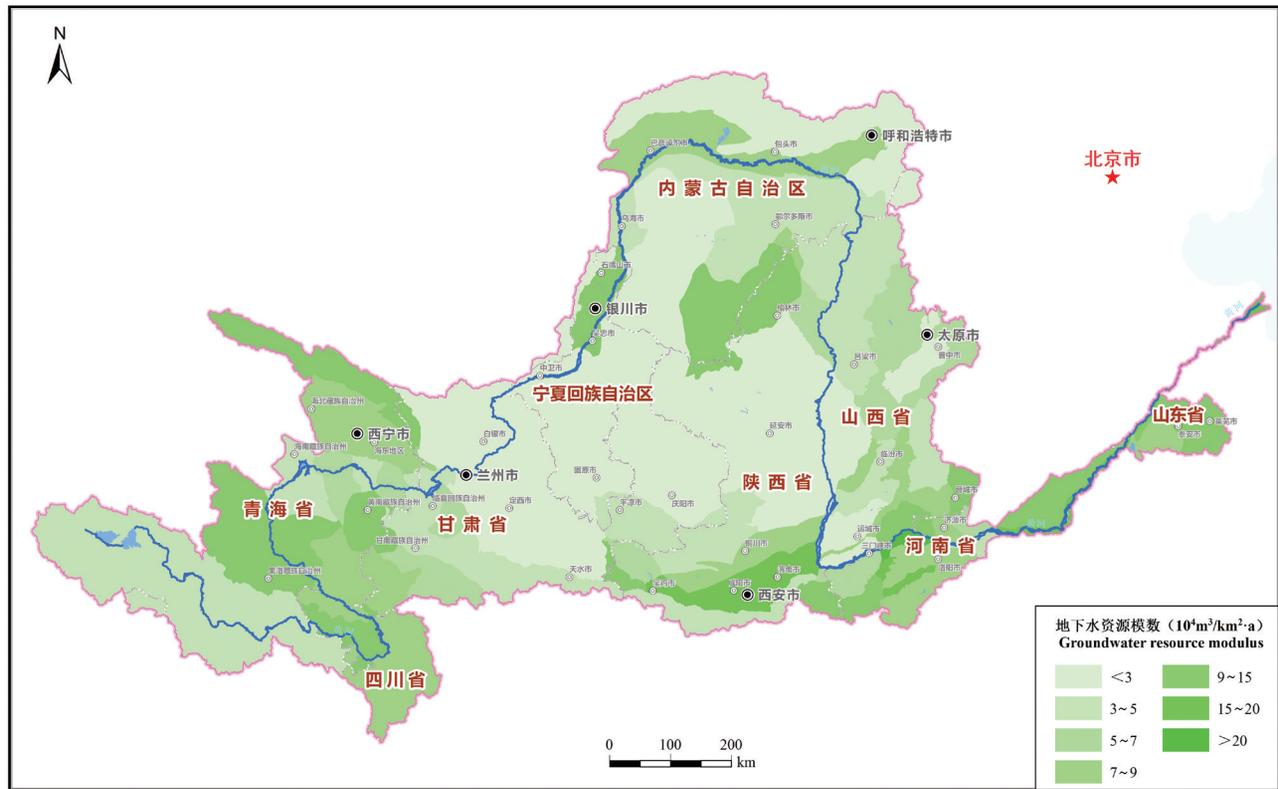


图5 黄河流域地下水资源模数分布图(五级分区)

Fig.5 Distribution of groundwater resources modulus in The YRB (in the fifth levels)

要的平原盆地及人类活动区。评价结果表明,黄河流域大部分地下水中砷、氟、硒、碘处于适宜及较适宜区。不适宜区主要分布于银川平原东部、河套平原、鄂尔多斯盆地西部、关中盆地东部、太原盆地、临汾盆地、运城盆地及下游干流区局地分布,即该区域某一或多个含水层中存在一种或多种组分超标现象,作为饮用水源时应当注意健康风险。

高砷地下水主要分布于河套平原的后套平原以及呼包平原,余太盆地、三湖河平原和黄河南岸分布相对较少;银川平原北部平罗县、大武口区、惠农县等地、鄂尔多斯盆地中部吴旗县头道川等地、黄河下游新乡一带零星分布。区域富含有机质的冲-湖积含水层、地下水径流滞缓、弱碱性及强还原的水环境等均有利于地下水中的砷富集。

高氟地下水分布较为广泛,上游西宁一带的湟水河河谷区、白银等黄河河谷区、银川平原、卫宁平原、河套平原、鄂尔多斯盆地西部、关中盆地中东部、太原盆地、临汾盆地、运城盆地等均有分布。平原盆地排泄区相对滞留的地下水径流条件和干旱一半干旱的气候环境有利于高氟地下水的形成,蒸

发浓缩作用会造成地下水中氟的进一步富集。

高碘地下水主要分布于河套平原、太原盆地、关中盆地东部以及下游干流区的部分地区。冲湖积沉积物中粘土和腐殖质等易于积聚,导致有机质含量增多、吸附碘的能力增强,易在还原环境下随同有机质分解而解析出碘。此外,下游地区海侵沉积环境也会对碘富集产生一定影响。

黄河流域地下水中硒含量较低,尚未发现高硒地下水分布。

### 3.4 地下水开发利用状况及历史变化

依据《黄河水资源公报》,黄河流域水资源多年平均开采量(2003—2019年)为503.0亿 $\text{m}^3$ ,其中地表水开采量(含跨流域调出水量)374.8亿 $\text{m}^3$ ,地下水开采量128.2亿 $\text{m}^3$ ,分别占总开采量的74.5%、25.5%。地下水资源行业用水结构中,农田灌溉开采量始终占比最大,多年平均为59.3亿 $\text{m}^3$ ,占比46.8%,工业、居民生活和林牧渔畜用水次之,城镇公共和生态环境用水占比最小。

随着黄河流域人口增长、生态保护和经济社会的全面发展,流域地下水的开采量和用水结构发生

表5 黄河流域主要平原(盆地)地下水储变量及主要原因

序号	主要评价区	面积/万 km <sup>2</sup>	储变量/亿 m <sup>3</sup>	储量变化原因分析	
1	湟水河谷(西宁扎麻隆至乐都郎家村段)	0.047	-0.08	自然波动	
2	湟水支流北川河	0.027	-0.24	自然波动	
3	湟水支流南川河	0.010	-0.18	自然波动	
4	湟水支流西纳川河	0.006	-0.16	自然波动	
5	湟水支流沙塘川河	0.018	-0.07	自然波动	
6	湟水流域海晏盆地—青稞滩	0.013	0.01	自然波动	
7	湟水流域海晏盆地—包忽图河	0.014	-0.09	自然波动	
8	湟水支流大通河门源盆地	0.035	0.42	自然波动	
9	兰州新区	0.044	0.003	自然波动	
10	董志塬	0.037	0.02	自然波动	
11	平凉泾河河谷	0.021	0.06	自然波动	
12	银川平原	潜水	0.67	-2.82	灌溉入渗补给量减少
13		承压水	0.53	0.001	限采压采
14	关中盆地	潜水	1.95	4.45	区域降雨量同比增加18.6%
15		承压水	1.95	0.01	
16	太原盆地	潜水	0.62	2.94	
17		承压水	0.62	0.13	
18	临汾盆地	潜水	0.63	3.26	降雨量增大;限采压采
19		承压水	0.63	0.46	
20	运城盆地	潜水	0.31	2.51	
21		承压水	0.49	0.43	
22	河套平原	2.83	-2.37	开采量增大	
23	无定河荒漠滩区	1.45	-0.23	农业开采	
24	黄河下游干流区	1.65	-1.90	降雨量减少和农业灌溉	

了明显的变化(Liu et al., 2012; Xie et al., 2020)。20世纪80年代至90年代初,流域地下水开采量约为97.0亿m<sup>3</sup>,至20世纪末,地下水开采量显著增大,年均开采量达130亿m<sup>3</sup>左右;进入21世纪后,地下水开采量呈缓慢下降态势,至2019年减少为114.35亿m<sup>3</sup>。地下水资源开采减少的同时,用水结构也发生了较大改变,农田灌溉和工业取水量占比不断减小,所节约的地下水资源转向居民生活、林牧渔畜与公共生态方面,较大缓解了黄河流域水资源的供需矛盾。

沿黄各省节水农业的推广也极大提高了地下水资源的用水效率,大水漫灌方式比例不断下降,微灌、滴灌、根灌等节水灌溉方式占比不断上升。1998年以来,黄河流域地下水灌溉耗水率(地下水灌溉耗水量与地下水灌溉取水量比值)呈减小趋势,2019年灌溉耗水率已降至47%,地下水入渗补给量和回归河道的水量所占比例增大,土壤与植物蒸发等消耗的地下水损失量减少(图6)。

## 4 不同区段主要生态环境问题

### 4.1 黄河源区

#### 4.1.1 冰川退缩

本文黄河源区是指黄河唐乃亥水文站以上的流域范围。进入21世纪,黄河源区气候暖湿化加快,降水量显著增加(Wang et al., 2015; Jiang et al., 2019; 杨昭明等, 2019; 刘彩红等, 2021; 肖风劲等, 2021)。1960—2019年,黄河源区平均气温增温率为0.37℃/10a, 2000—2019年升温速率达0.61℃/10a(刘彩红等, 2021)。1961—2019年,流域降水量总体呈减少趋势,但黄河源区显著增加,2001—2019年平均降水量为578.6 mm,相比1961—2000年增加29.8 mm(保广裕等, 2021)。

黄河源区气候暖湿化加速了冰川退缩的过程。黄河源区阿尼玛卿山一带发育冰川74条,面积102.68 km<sup>2</sup>,分别占黄河流域的45.12%和81.03%(刘时银等, 2015; Guo et al., 2015)。对比中国冰川第一

表6 黄河流域地下水中砷氟硒碘质量区划分级

**Table 6 Quality division of arsenic, fluorine, selenium and iodine in groundwater of the Yellow River Basin**

水质指标	适宜			较适宜	不适宜
	I类/(mg/L)	II类/(mg/L)	III类/(mg/L)	IV类/(mg/L)	V类/(mg/L)
砷	≤0.001	≤0.001	≤0.01	≤0.05	>0.05
氟	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.2	>2.0
碘	≤0.04	≤0.04	≤0.08	≤0.5	>0.5
硒	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.1	>0.1

次(20世纪60至80年代)和第二次编目(2014年)数据,阿尼玛卿山发育冰川数量由61条增加到74条,但面积由124.03 km<sup>2</sup>减少到102.68 km<sup>2</sup>(Guo et al., 2015),主要冰川均显著退缩,退缩幅度在8%~13%(肖风劲等,2021)。

气候暖湿化效应引发了冰川退缩,多分支复合型冰川演变为独立的小冰川,导致冰川数量增加,但冰川整体面积减少。尽管黄河源区冰川面积较小,冰川退缩对流域地表径流及下游湖泊的影响程度相对较轻(杨建平等,2003),但仍应加强对冰川的长期动态监测,以防冰川短期内迅速退缩,冰川融水增加,进而导致冰湖溃决、洪水等一系列次生灾害。

4.1.2 冻土退化

黄河源分布有黄河流域近80%的冻土,不连续多年冻土、岛状冻土和季节冻土交错分布(Luo et al., 2018),冻土对流域的水资源循环演化具有重要的调节作用。受气候变暖的影响,黄河源区冻土呈区域性退化状态(杨建平等,2013),一是多年冻土分布范围缩小,多年冻土区由片状分布逐渐变为岛状、斑状分布,季节冻土和融区范围扩大。20世纪

70年代至90年代,玛多县城附近多年冻土分布界线向西扩延约15 km,黄河沿多年冻土界线向北推移2 km(王绍令等,1991;金会军等,2010)。2003—2019年,黄河源区冻土面积减少了4.82%(Cao et al., 2021);二是多年冻土层变薄,冻土下界抬升,季节性融化层厚度增大。与90年代初相比,星星海湖岸、黑河桥南滩地、野牛沟沟口段等地多年冻土层已消融,巴颜喀拉山北坡融区范围扩大,冻土下界由海拔4320 m上升到4370 m,巴颜喀拉山南坡多年冻土下界由4490 m上升到4560 m(张森琦等,2004)。1961—2019年,黄河源区季节性冻土年退化速率为3.2 cm/10 a(肖风劲等,2021)。

黄河源区冻土退化进一步引发了一系列次生生态环境问题:一是高原草甸土壤层以冻土上界面为滑床,向下滑移,引起高原草甸破坏;二是引起冻结层上水水位下降,水资源调蓄能力下降,沼泽湿地退化、“黑土滩”扩大、荒漠化加剧(图7)(张森琦等,2004; Wang et al., 2020)。

4.2 宁蒙河套平原

宁蒙河套平原由宁夏境内的西套平原(即银川

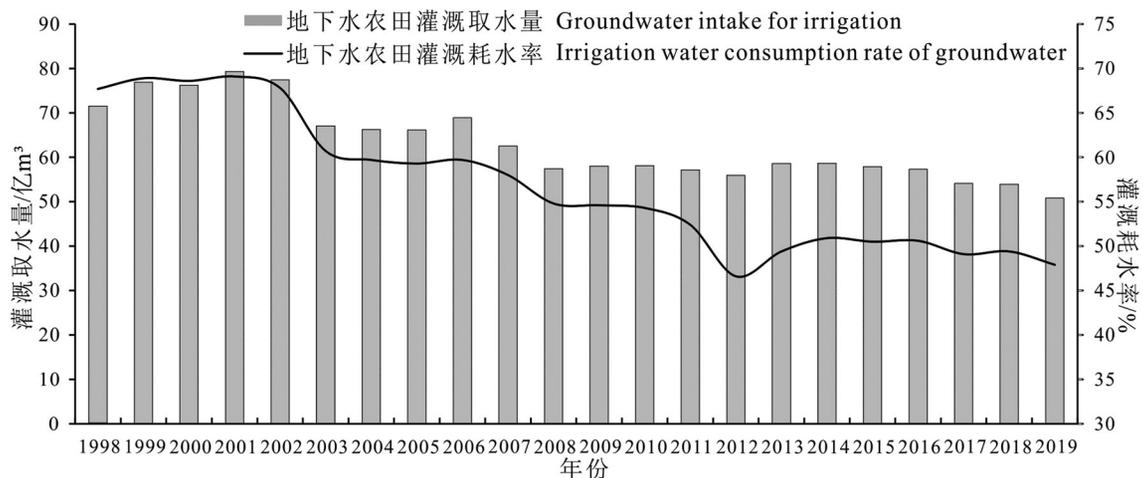


图6 黄河流域地下水灌溉取水量及耗水率图

Fig.6 Quantities and consumption rate of irrigation water from groundwater in the YRB

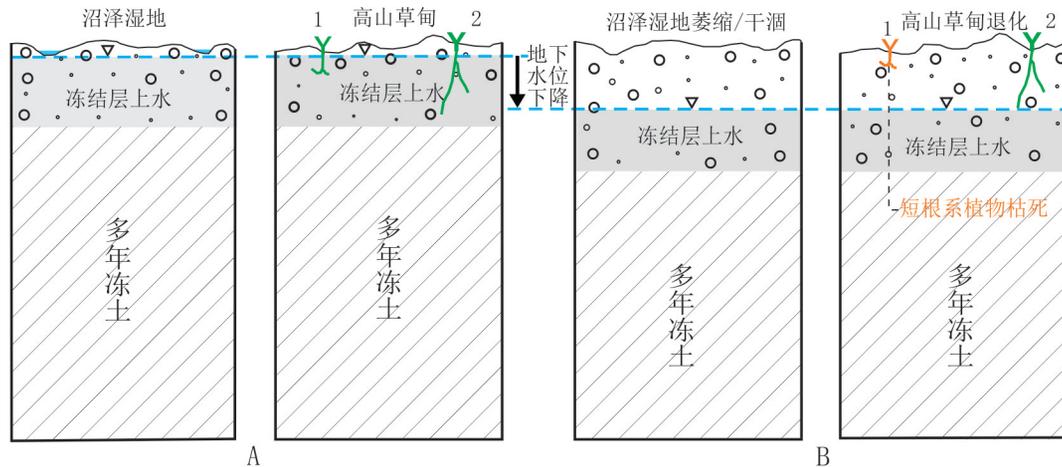


图7 黄河源区多年冻土退化引发的生态环境问题

1—浅根系植物;2—深根系植物;A—多年冻土退化前;B—多年冻土退化后

Fig.7 Eco-environmental problems caused by the permafrost degradation in the sources area of the Yellow River

1—Shallow rooted plants; 2—Deep rooted plants; A—Before the permafrost degradation; B—After the permafrost degradation

平原),内蒙古境内的河套平原(包括后套平原和土默川平原)组成。银川平原及河套平原具有相似的地质、气候和水文条件,一是两者均位于黄河“几”字湾,为环鄂尔多斯地块分布的断陷盆地,积累了巨厚的新生代沉积地层;二是均处于温带干旱区,降雨量稀少,但区内农业开发历史悠久,渠系灌溉系统发达;三是黄河贯穿盆地,且由于历史上河流的不断改道,形成了众多的洪泛平原湿地。

#### 4.2.1 湿地生态退化

宁蒙河套平原湖泊湿地众多,其形成演化主要受控于黄河河道摆动及引黄灌溉(何彤慧,2016)。以河套平原乌梁素海为例,原为1850年黄河改道形成的河迹湖,现已成为河套灌区灌溉排水系统的重要组成部分。长期以来,上游生活污水、工业废水的无序排放以及农田退水的大量输入,氮磷等营养元素不断进入乌梁素海,水面蒸发强烈,水中矿物质不断累积,水质咸化、富营养化等导致乌梁素海湿地生态功能退化严重。2011—2016年,乌梁素海湿地水质一直为IV类~V类;水体氮磷元素超标、富营养化严重;湖底生物淤积,沼泽化加剧;鱼群种群减少,鸟类栖息地遭到破坏等(田伟东,2016)。2008—2010年,乌梁素海黄苔年平均覆盖度分别达到了14.43%,14.06%,12.56%(鲁飞飞等,2019)。近年来,地方政府对乌梁素海等湖泊湿地进行了生态补水、污染源治理等综合整治工作,取得了一定的成效,但湿地生态系统退化问题仍然严峻。

银川平原湿地遥感监测结果表明,1987—2010年,湿地面积由766.8 km<sup>2</sup>减少至667.13 km<sup>2</sup>,其中,自然湿地面积减少了215.34 km<sup>2</sup>,人工湿地面积增加了34.72 km<sup>2</sup>(闫军,2018)。强烈的人类活动导致自然湿地的面积萎缩,同时人工湿地面积的不断扩大的也导致了无效蒸发量的增加,需要依靠人工补水维持湖泊的生态功能。

#### 4.2.2 土地盐碱化

宁蒙河套平原是我国土地盐碱化较为严重的区域之一,宁夏平原盐碱化耕地总面积约18.33万hm<sup>2</sup>,约占引黄灌区面积的33%;内蒙古河套灌区盐碱化耕地面积达32.3万hm<sup>2</sup>,约占引黄灌区面积的45%(Wang et al., 2016;陈怡平,2021)。内蒙古后套平原2006—2014年监测数据表明,非盐碱耕地和轻度盐碱耕地、重度盐碱耕地面积呈现减少的趋势,减少幅度分别为6.23%、7.68%;中度盐碱耕地面积呈先降后增的趋势,增加幅度为22.40%(王俊枝等,2019)。

宁蒙河套平原地降雨量少、蒸发强烈、地下水位埋深浅(多小于5 m)、不合理的灌溉方式等都是土地盐碱化的主要因素,尽管近年来部分地区盐碱化有减轻趋势,但区域上来看,盐碱耕地仍然分布较广,合理利用水资源,科学防治土地盐碱化是维护宁蒙河套地区粮食安全的重要保障。

#### 4.2.3 天然劣质水广泛分布

受古沉积环境等地质背景影响,宁夏银川平原

北部、内蒙古河套平原高砷高氟等天然劣质地下水广泛分布。银川平原天然劣质地下水主要表现为潜水TDS、总硬度、砷、氟等含量超标,承压水水质较好。潜水砷含量最高值达0.3 mg/L,砷超标区主要分布在黄河以西、银川市以北地区,呈散点状分布。潜水氟超标区在黄河以东呈区域分布,黄河以西零散点状分布。

河套平原潜水水质普遍较差,高砷地下水、高氟地下水和高碘地下水广泛分布。砷超标区主要分布于后套地区的黄河冲湖积平原北部和狼山山前冲洪积平原东部,土默特右旗以南的黄河冲湖积平原以及土默特左旗以南、托克托县以北的大黑河冲湖积平原中部。氟超标区主要分布于后套平原、奈太盆地以及呼包平原西南部。碘超标区分布于后套平原的北部、中东部,三湖河平原和呼包平原的大部分地区。

### 4.3 黄河中游

#### 4.3.1 黄土高原水土流失

黄土高原主要位于黄河流域中部,水土流失面积达46.5万km<sup>2</sup>,是中国水土流失最为严重的区域,也是黄河泥沙的源头区(王浩等,2020;肖风劲等,2021)。自20世纪50年代开始,黄土高原开展了一系列的综合治理工作,区域生态系统服务整体向健康方向发展(金钊,2019;Geng et al., 2020)。1999—2018年,黄土高原植被覆盖率由32%增加到63%;潼关水文站年平均径流量和输沙量从1919—1959年的426.4亿m<sup>3</sup>/a、16.0亿t/a减少到2000—2018年的236.4亿m<sup>3</sup>/a、2.5亿t/a,分别减少45%和85%(胡春宏等,2018)。黄土高原植被覆盖率提高在改善水土流失状况的同时,也造成了区域水循环要素的改变(Han et al., 2020)。尽管近年来黄土高原区域生态环境在向好的趋势发展,局部地区水土流失得到控制,但水土流失问题仍然存在,且面临区域治理不平衡、治理程度区域差异大、水沙关系不协调、水资源配置格局不合理等问题,整体区域生态环境依然脆弱(Fu et al., 2017;胡春宏等,2019)。

#### 4.3.2 汾渭盆地岩溶大泉衰减

汾渭盆地为黄河流域主要岩溶分布区,发育多处岩溶大泉。汾河流域雷鸣寺泉、晋祠泉、兰村泉、洪山泉、郭庄泉、霍泉、龙子祠泉和古堆泉8处岩溶大泉,20世纪60年代总流量达27.09 m<sup>3</sup>/s,2017年总

流量已衰减至8.56 m<sup>3</sup>/s,兰村泉、晋祠泉、古堆泉、洪山泉等岩溶大泉断流。汾河流域岩溶泉水流量衰减或断流主要是岩溶地下水过量开采、泉域内矿产开发疏干排水等人类活动的影响,此外,大气降水量减少、河水渗漏补给量减少也具有一定的影响。

渭河流域渭北岩溶区分布有筛珠洞泉、袁家坡泉、温汤泉群、处女泉群等多处岩溶大泉,20世纪80年代以来,渭北岩溶区开始修建大量岩溶地下水源地,受水源地强采影响,区域“380岩溶水”水位已降至360 m左右;岩溶泉水流量明显衰减,筛珠洞泉、袁家坡泉已断流;温汤泉群流量由1986年的3700 m<sup>3</sup>/h降至2019年400 m<sup>3</sup>/h,流量减少约9倍;处女泉群中流量最大的漠泉,由1990年的2592 m<sup>3</sup>/h衰减为2019年130 m<sup>3</sup>/h,流量减少约20倍。

#### 4.3.3 汾河流域水环境污染

汾河流域由于地表径流量减少、煤矿开采、三废排放等原因,水质恶化非常严重。汾河干流河水水质的主要污染物为氨氮、COD、挥发酚等。兰村断面以下河段氨氮几乎全部超标,其中太原市控制断面小店桥氨氮超标最大达70.1倍;挥发酚超标河段8处,临汾断面挥发酚超标最大为43.2倍(郝琳茹,2016)。

区内岩溶地下水也存在一定污染风险,尤其是地下水中硫酸盐、多环芳烃等指标含量近年来上升趋势明显(Wu et al., 2021)。晋祠泉岩溶地下水2017年测试结果,硫酸根含量为458 mg/L,超过饮用水标准(250 mg/L)1.8倍,地下水中TDS、硫酸根含量整体上呈升高趋势;龙子祠泉水20世纪80年代泉水的硫酸根含量为320mg/L,2013年泉水的硫酸根含量已达443 mg/L。地层中石膏溶解是岩溶地下水中硫酸根原生含量超标的主要原因,煤矿“老窑水”是造成近年来岩溶地下水主要水化学组分含量快速增加,硫酸根含量升高的主要原因(梁永平等,2021)。

### 4.4 黄河下游

#### 4.4.1 悬河稳定性及滩地安全

黄河下游悬河段河床及漫滩高于河流两侧堤外地面3~5m,最大10 m以上(刘桂仪等,1998;张连胜等,2001),悬河稳定性及洪水风险仍是下游最主要的威胁。黄河下游活动断裂较为发育(杨询昌等,2010),可能诱发堤基地裂下沉变形、堤坝滑塌等破

坏,危及河道安全;另一方面,黄河携带而来的泥沙在下游宽阔平坦的河道不断淤积,年均淤积量达 $2.5 \times 10^8 \text{t}$ (刘桂仪等,1998),河床抬高,在高水位下极易引发溃决险情。此外,黄河下游还存在大量串沟、临河洼地、半自然堤、生产堤等微地貌和不良土体(杨询昌等,2010),也是影响河道稳定性的因素。

黄河下游滩地总面积约为 $3828 \text{ km}^2$ ,主要分布于主河槽与大堤之间,滩区既是黄河行洪、滞洪、沉积的重要区域,也是百万群众赖以生存的场所(谢羽倩等,2019)。滩区河段的河道游荡性强,水利设施完善程度较低,河滩变化和漫滩的威胁频繁,滩区受到“悬河”问题的影响严重。1955年以来,黄河滩区遭受水患灾害14次(鲁详磊等,2011)。自小浪底水库运行以来,进入黄河下游的泥沙含量大幅减少,导致下游河床发生剧烈冲刷,河道频繁变迁,威胁滩地安全。近20年来花园口至柳园口段河道变迁累计导致约 $32 \text{ km}^2$ 耕地被侵蚀(陈怡平,2021)。同时,受黄河来水减少、滩区生产生活污染负荷重等因素影响,滩区水资源短缺、农业面源污染、水污染、水生态环境恶化等问题日益凸显(鲁详磊等,2011;王尧等,2021)。

#### 4.4.2 三角洲生态系统退化

自20世纪80年代以来,黄河上游用水量剧增,下游多次断流,作为尾间的三角洲地区来水量不断减少,引发了湿地退化、土壤次生盐渍化、生物多样性受损等一系列生态环境问题,三角洲地区生态系统结构功能面临严峻挑战和威胁(杨薇等,2018)。黄河三角洲湿地资源丰富,总面积约 $43 \text{ 万 km}^2$ ,其中天然湿地占湿地总面积的52%,人工湿地占48%,1985—2012年,自然湿地面积减少了 $3.4 \text{ 万 km}^2$ 。

此外,黄河流域还存在上游黄河源、甘南和祁连山等水源涵养区草地沙化、湿地草甸缩小(王尧等,2021),鄂尔多斯盆地能源基地开发破坏含水层结构、引发地面塌陷及地下水污染,内流区天然湖泊湿地萎缩,中下游平原盆地地面沉降,三角洲地区水土环境污染及岸线蚀退等一系列生态环境问题。

## 5 讨论与建议

(1)黄河流域地表水-地下水转化关系极为复杂,地下水资源在流域水资源量中占有极其重要的地位,花园口断面河川基流量大约占河川径流总量

的44%,其中兰州以上区域是黄河干流基流的主要来源区(林学钰等,2006)。近年来,受气候变化和人类活动双重影响,黄河流域水资源循环条件发生了显著改变。因此,全面系统开展黄河流域水资源调查监测评价,尤其是地下水资源调查监测评价,揭示“大气降水-地表水-地下水”三水转化关系,合理评价流域地表水-地下水重复量,加强地表水与地下水资源的统一规划、联合开发,统筹考虑流域生产、生活、生态用水需求,是缓解流域水资源矛盾、提高水资源利用效率的重要手段。

(2)地下水含有较丰富的矿物质,大部分地区分布有优质矿泉水,在“让黄河成为造福人民的幸福河”这一历史进程中,应让更多的人饮用上水质更为稳定的优质地下水。除饮用水外,含有矿物质的天然温泉也广泛分布(黄光寿等,2020),合理开发温泉有利于当地经济发展和人民身体健康。根据近两年的地下水统测监测数据,黄河流域区域地下水位总体稳定,区域主要地下水降落漏斗分布面积相对较小,且大部分降落漏斗区范围、地下水位均无明显扩大及下降趋势。2019年,黄河流域地下水取水总量为 $114.35 \text{ 亿 m}^3$ ,居民生活用水 $21.42 \text{ 亿 m}^3$ ,仅占地下水取水总量的18.73%,占比较低,且包含了饮水和生活用水两个方面。在诸多地区,长久来看,如果相应的管理措施到位,采用优质地下水供应居民饮用是可以实现的,而不应一刀切式禁采、限采地下水。建议采取傍河取水、山前洪积扇地下水人工补给等手段,合理利用地下含水层调蓄能力和战略储备能力,充分发挥地下水含水层自净能力,以提供水量稳定的优质地下水供水水源;在宁夏中南部、陕北黄土高原等缺水地区,地表水资源相对匮乏且难以利用地表水大规模集中供水,开展地下水饮用水源地勘察并采用分散式供水模式,将可解决绝大部分地区的饮水困难。在地下水资源管理中,应注意水源地论证中地下水可开采量评估的准确性,地下水源地开采井布设及地下水位下降阈值设置的合理性。

(3)黄河流域水资源行业用水结构中,农田灌溉用水量始终最高,2019年占比为63.8%。流域内农田灌溉水有效利用系数一般低于0.6,远低于世界先进水平。宁蒙河套灌区为黄河流域主要的引黄灌区,用水方式比较粗放,大水漫灌仍是最主要的

灌溉方式,灌溉定额偏高(杜森,2020)。黄河流域宁夏、甘肃、内蒙古、山西四省(区)的农业可节水比例都超过了40%,节水潜力巨大(崔永正等,2021)。宁蒙河套灌区应充分考虑粮食-水-生态互馈关系,推行井渠联合的灌溉方式,合理配置地表水与地下水资源,加大灌区地下水资源的开发利用,有序推进喷灌、滴灌、管灌、微喷灌等高效灌溉技术的应用。宁蒙河套灌区地下水位埋深极浅(一般小于5 m),加大灌区地下水的开采,一方面可以减少潜水的无效蒸发量,本次地下水资源评价宁蒙河套平原潜水蒸发量达28亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ;另一方面还可以有效降低地下水位,有利于盐碱地的防治。

(4)黄河流域上中下游面临的主要生态环境问题各有不同,应以问题为导向聚焦水循环关键过程,系统全面开展黄河流域及重点地区的水平衡分析工作,动态评估黄河流域生态系统承载能力(王尧等,2020)。围绕保护黄河水源涵养区的生态功能与水源涵养能力,促进宁蒙河套灌区、汾渭盆地等粮食主产区水资源高效利用与河湖湿地健康,鄂尔多斯盆地等能源基地开发、水资源利用与生态环境的协调发展,满足兰州—西宁、呼包鄂榆、关中城市群等城市群经济社会发展供水需求,保障六盘山区、秦巴山区、吕梁山区、少数民族地区、贫困地区饮水安全等方面展开,提出水源涵养、水土保持、水资源集约节约利用等生态保护修复和高质量发展建议。

## 6 结 论

(1)黄河流域年度地下水资源总补给量444.90亿 $\text{m}^3$ ,地下水资源量( $\text{TDS} \leq 2 \text{ g/L}$ )393.55亿 $\text{m}^3$ ,龙门至三门峡区、龙羊峡以上区、龙羊峡至兰州区地下水资源量相对较丰富,银川平原、河套平原等7处主要平原(盆地)的地下水资源量占比超过20%。总体上,流域地下水资源模数分布呈上、下游最高,中游及中上游偏低的特征,花园口以下干流区地下水资源模数最高,平原盆地区地下水资源模数多高于丘陵山地区。

(2)黄河流域地下水质量以I~IV类为主,丘陵山地区水质优于平原盆地区。地下水中总硬度、硫酸盐、铁、溶解性总固体、氯化物等组分超标率高,主要受原生地质环境影响。流域还存在砷、氟、硒、碘等区域性原生地下水环境问题。

(3)黄河流域平原盆地和干支流河谷等局部地区形成不同程度的地下水位下降区(降落漏斗)。与去年同期相比,流域地下水位总体上呈上游稳定、中游局部上升、下游普遍下降的态势,主要的地下水降落漏斗形态基本稳定。

(4)黄河流域不同区段存在不同的水、生态、环境问题。兰州以上河段,是黄河流域主要的产流区,人类活动强度低,受气候变暖影响,黄河源区冰川消融、冻土退化;宁蒙河套平原为重要的引黄灌区,存在湿地生态退化、土地盐渍化等问题;河口镇至花园口段,水土流失、岩溶大泉衰减、水环境污染等问题较为突出;下游来水量减少造成黄河三角洲生态退化。

## References

- Bao Guangyu, Nie Hong, Dai Sheng, Yan Zhengning, Yang Chunhua, Dai Qingcuo. 2021. Research on effects of different precipitation magnitudes on runoff changes in the headwater region of the Upper Yellow River [J]. *Arid Zone Research*, 38(3): 704–713(in Chinese with English abstract).
- Cao Huiyu, Gao Bing, Gong Tingting, Wang Bo. 2021. Analyzing changes in frozen soil in the source region of the Yellow River using the MODIS land surface temperature products [J]. *Remote Sensing*, 13(2):180.
- Cui Yongzheng, Liu Tao. 2021. Measurement of agricultural water use efficiency and its water saving potential in the Yellow River Basin [J]. *Water Saving Irrigation*, (1): 100–103(in Chinese with English abstract).
- Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, Liang Wei, Miao Chiyuan. 2017. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45(1): 223–243.
- Geng Qingling, Ren Qingfu, Yan Huimin, Li Longhui, Zhao Xining, Mu Xingmin, Wu Pute, Yu Qiang. 2020. Target areas for harmonizing the grain for green programme in China's Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 31:325–333.
- Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, Wu Lizong, Shanguan Donghui, Yao Xiaojun, Wei Junfeng, Bao Weijia, Yu Pengchun, Liu Qiao, Jiang Zongli. 2015. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results [J]. *Journal of Glaciology*, 61(226): 357–372.
- Han Zhiming, Huang Shengzhi, Huang Qiang, Bai Qingjun, Leng Guoyong, Wang Hao, Zhao Jing, Wei Xiaoting, Zheng Xudong. 2020. Effects of vegetation restoration on groundwater drought in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 591, 125566.
- Hao Linru. 2016. Protection measures of karst spring water resources in Fenhe River Basin [J]. *Shanxi Water Resources*, 32(10):16–17

- (in Chinese with English abstract).
- He Tonghui. 2016. Historical evolution of the different wetlands types in the Yinchuan Plain [J]. *Yellow River*, 38(4):54–58(in Chinese with English abstract).
- Hou Guangcai, Zhao Zhenhong, Wang Xiaoyong, Gong Bei, Yin Lihe. 2008. Formation mechanism of interior drainage areas and closed drainage areas of the Ordos Plateau in the middle reaches of the Yellow River, China based on an analysis of the water cycle [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(8): 1107–1114(in Chinese with English abstract).
- Hu Chunhong, Zhang Xiaoming. 2018. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 49(9): 1028–1039(in Chinese with English abstract).
- Hu Chunhong, Zhang Xiaoming. 2019. Suggestions on adjusting the pattern of soil and water loss control in the Loess Plateau [J]. *China Water Resources*, (23): 5–7, 11(in Chinese with English abstract).
- Huang Guangshou, Guo Lili, Huang Kai. 2020. Geothermal geological characteristics of ten hot springs in Henan province [J]. *Geology and Resources*, 29(1): 91–100(in Chinese with English abstract).
- Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, He Ruixia, Chang Xiaoli, Luo Dongliang. 2010. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(1): 10–17(in Chinese with English abstract).
- Jiang Peng, Yu Zhongbo, Yuan Feifei, Kumud Acharya. 2019. The multi-scale temporal variability of extreme precipitation in the source region of the Yellow River [J]. *Water*, 11(1): 92–94.
- Liang Yongping, Wang Weitai. 2010. The division and characteristics of karst water systems in Northern China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6):860–868(in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Shen Haoyong, Zhao Chunhong, Tang Chunlei, Wang Zhiheng, Zhao Yi, Xie Hao. 2020. Thinking and practice on the research direction of karst water in Northern China [J]. *Carsologica Sinica*: 1–26 [2021–11–03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20201102.1029.006.html> (in Chinese with English abstract).
- Lin M, Biswas A, Bennett E M. 2020. Socio-ecological determinants on spatio-temporal changes of groundwater in the Yellow River Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 731,138725.
- Lin Xueyu, Liao Zisheng, Su Xiaosi, Qian Yunping. 2006. Groundwater resources and their countermeasures of development and utilization in Yellow River basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, (5): 677–684(in Chinese with English abstract).
- Liu Caihong, Wang Pengling, Wen Tingting, Yu Di, Bai Wenrong. 2021. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019 [J]. *Arid Zone Research*, 38(2):293–302(in Chinese with English abstract).
- Liu Changming, Tian Wei, Liu Xiaomang, Liang Kang, Bai Peng. 2019. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in Recent 100 Years [J]. *Yellow River*, 41(10):11–15(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Chen Shenliang, Dong Ping, Peng Jun. 2012. Spatial and temporal variability of water discharge in the Yellow River Basin over the past 60 years [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 22(6): 1013–1033.
- Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, Xu Junli, Shanguan Donghui, Wei Junfeng, Bao Weijia, Wu Lizong. 2015. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(1): 3–16(in Chinese with English abstract).
- Lu Feifei, Zhang Yong, Li Xue, Chen Cheng. 2019. Discussion on wetland protection and restoration along Wuliangshui Basin [J]. *Forest Resources Management*, (5): 23–27(in Chinese with English abstract).
- Lu Xianglei, Su Lizhi, Li Linqi, Gong Xicheng, Zhang Hao. 2021. Analysis on harnessing issues of Yellow River Beach Area and geological bearing capacity of village platform silting engineering [J]. *Yellow River*, 43(4): 54–61, 105(in Chinese with English abstract).
- Luo Dongliang, Jin Huijun, Wu Qingbai, Bense Victor F., He Ruixia, Ma Qiang, Gao Shuhui, Jin Xiaoying, Lu Lanzhi. 2018. Thermal regime of warm-dry permafrost in relation to ground surface temperature in the source areas of the Yangtze and Yellow Rivers on the Qinghai-Tibet Plateau, SW China [J]. *Science of the Total Environment*, 618:1033–1045.
- Ma Zhuguo, Fu Congbin, Zhou Tianjun, Yan Zhongwei, Li Mingxing, Zheng Ziyang, Chen Liang, Lv Meixia. 2020. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(1): 52–60(in Chinese with English abstract).
- Shi Jiansheng, Zhang Fawang, Qin Yisu, Li Ruimin, Ye Hao, Liu Zuzhi, An Lizhong, Pei Hanhua, Guo Zhenzhong, Zhao Yunzhang, Wang Junyan. 2000. Groundwater resources and main environment-geological problems in the Yellow river valley as well as some countermeasures [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, (2):114–120(in Chinese with English abstract).
- Tao Hong, Tao Fuping, Liu Wenbo. 2013. An in-situ method for determining shear strength parameters of rock masses and a study of the related test results [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 40(6):37–42, 61(in Chinese with English abstract).
- Tian Weidong. 2016. Health Assessment of Wuliangshui Lake in Inner Mongolia [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University(in Chinese with English abstract).
- Wang Hao, Hu Peng. 2020. Key issues of ecological conservation in the Yellow River basin from a water cycle perspective [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(9):1009–1014(in Chinese with English abstract).

- Wang Junzhi, Xue Zhizhong, Zhang Chi, Chang Yiran. 2019. Spatio-temporal evolution of saline-alkali cultivated Land and its impact on productivity in Hetao Plain of Inner Mongolia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 39(5):827-835(in Chinese with English abstract).
- Wang Jingzhong, Wu Jinglu, Jia Hongjuan. 2016. Analysis of spatial variation of soil salinization using a hydrochemical and stable isotopic method in a semiarid irrigated basin, Hetao Plain, Inner Mongolia, North China [J]. *Environmental Processes*, 3(4): 723-733.
- Wang Rui, Dong Zhibao, Zhou Zhengchao. 2020. Effect of decreasing soil frozen depth on vegetation growth in the source region of the Yellow River for 1982- 2015 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3): 1185-1197.
- Wang Shaoling, Luo Xiangrui, Guo Pengfei. 1991. The distributive characteristics of frozen ground in the east of Qinghai- Xizang plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, (2): 41-50(in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Chen Ruishan, Guo Chihui, Xia Zilong. 2021. Study on the pattern change and regional differentiation of resources and environment in the Yellow River Basin and suggestions on eco-geological survey [J]. *Geology in China*, 48(1):1- 20(in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Chen Ruishan, Xia Zilong, Guo Chihui. 2020. The evaluation of ecosystem service value and its spatial change in the Yellow River Basin and suggestions from the ecological geology perspectives[J].*Geological Bulletin of China*, 39(10): 1650-1662.
- Wang Yuli, Wang Xuan, Li Chunhui, Wu Feifei, Yang Zhifeng. 2015. Spatiotemporal analysis of temperature trends under climate change in the source region of the Yellow River, China [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 119(1-2):123-133.
- Wen Dongguang, Zhang Fucun, Zhang Eryong, Wang Cheng, Han Shuangbao. 2013. Arsenic, fluoride and iodine in groundwater of China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 135:1-21.
- Wu Xiao, Gao Xubo, Tan Ting, Li Chengcheng, Yan Ruyao, Chi Zeyong, Feng Yu, Gong Peili, Fang Jiancong, Zhang Xingzhou, Aihemaiti Kaisaerjiang, Xu Dong. 2021. Sources and pollution path identification of PAHs in karst aquifers: An example from Liulin karst water system, northern China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 241.
- Xiao Fengjin, Xue Yuqing, Huang Dapeng, Liao Yaoming, Yu Li. 2021. Impact of climate change on ecological security of the Yellow River Basin and its adaptation countermeasures [J]. *Yellow River*, 43(1):10-14(in Chinese with English abstract).
- Xie Pengxuan, Zhuo La, Yang Xi, Huang Hongrong, Gao Xuerui, Wu Pute. 2020. Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 590.
- Xie Yuqian, Cheng Shupeng, Zhang Yanqing, Zhang Qi, Jiang Hanlin, Li Zhenshan, Zhao Zhijie. 2019. Land use/cover and influence factors in the Lower Yellow River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 55(3): 489- 500 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jun. 2018. Remote Sensing Monitoring of Dynamic Changes of Yinchuan Plain Wetland in Ningxia [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and technology*, 59(8): 57-58(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, Lu Anxin, Chen Rensheng. 2003. Glacier change and its effect on surface run off in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Journal of Natural Resources*, (5): 595-602(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianping, Yang Suiqiao, Li Man, Tan Chunping. 2013. Vulnerability of frozen ground to climate change in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(6): 1436- 1445(in Chinese with English abstract).
- Yang Wei, Pei Jun, Li Xiaoxiao, Sun Tao, Wang Wenyan. 2018. Effect evaluation and management strategies for freshwater restoration projects in Yellow River Delta wetlands [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 54(1): 98- 103(in Chinese with English abstract).
- Yang Xunchang, Shi Yang, Feng Shoutao, Wang Chengming. 2010. Major ecological environment problems and countermeasures in the Downstream of the Yellow River (Shandong Section) [J]. *Shandong Land and Resources*, 26(1): 15- 18 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhaoming, Bai Wenrong, Shi Xinghe, Li Hongmei. 2019. Variation features and prediction of air temperature in the source regions of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41(4):818-827(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fucun, Wen Dongguang, Guo Jianqiang, Zhang Eryong, Hao Aibing, An Yonghui. 2010. Research progress and prospect of geological environment in main endemic disease area [J]. *Geology in China*, 37(3): 551-562 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kang, Xie Xianhong, Zhu Bowen, Meng Shanshan, Yao Yi. 2019. Unexpected groundwater recovery with decreasing agricultural irrigation in the Yellow River Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 213: 858-867.
- Zhang Liansheng, Li Lianhua, Gong Xiaojie. 2001. The significant ecological environmental geological problems and countermeasure research on the lower course of the Yellow River in Henan Province [J]. *Henan Geology*, 19(1): 71- 78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi Wang Yonggui, Zhao Yongzhen, Huang Yong, Li Yongguo, Shi Weidong, Shang Xiaogang. 2004. Permafrost degradation and its environmental sequent in the source regions of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

保广裕, 乜虹, 戴升, 燕振宁, 杨春华, 代青措. 2021. 黄河上游河源区

- 不同量级降水对径流变化的影响[J]. 干旱区研究, 38(3): 704-713.
- 陈怡平, 傅伯杰. 2021. 黄河流域不同区段生态保护与治理的关键问题[N]. 中国科学报, 2021-03-02(7).
- 崔永正, 刘涛. 2021. 黄河流域农业用水效率测度及其节水潜力分析[J]. 节水灌溉, (1): 100-103.
- 杜森. 2020. 黄河流域节水农业现状、问题及建议[J]. 中国农业综合开发, 199(1): 27-28.
- 郝琳茹. 2016. 汾河流域岩溶泉水资源保护措施浅析[J]. 山西水利, 32(10): 16-17.
- 何彤慧. 2016. 银川平原不同类型湿地的历史演变[J]. 人民黄河, 38(4): 54-58.
- 侯光才, 赵振宏, 王晓勇, 龚蓓, 尹立河. 2008. 黄河中游鄂尔多斯高原内流区与闭流区的形成机理——基于水循环的分析[J]. 地质通报, 27(8): 1107-1114.
- 胡春宏, 张晓明. 2018. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报, 49(9): 1028-1039.
- 胡春宏, 张晓明. 2019. 关于黄土高原水土流失治理格局调整的建议[J]. 中国水利, (23): 5-7, 11.
- 黄光寿, 郭丽丽, 黄凯. 2020. 河南省十大温泉地热地质特征[J]. 地质与资源, 29(1): 91-100.
- 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 何瑞霞, 常晓丽, 罗栋梁. 2010. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. 冰川冻土, 32(1): 10-17.
- 金钊. 2019. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理[J]. 地球环境学报, 10(3): 316-322.
- 梁永平, 王维泰. 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 31(6): 860-868.
- 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 唐春雷, 王志恒, 赵一, 谢浩. 2020. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶: 1-26[2020-11-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20201102.1029.006.html>.
- 林学钰, 廖资生, 苏小四, 钱云平. 2006. 黄河流域地下水资源及其开发利用对策[J]. 吉林大学学报(地球科学版), (5): 677-684.
- 刘彩虹, 王朋岭, 温婷婷, 余迪, 白文蓉. 2021. 1960-2019年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究, 38(2): 293-302.
- 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 梁康, 白鹏. 2019. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. 人民黄河, 41(10): 11-15.
- 刘桂仪, 董上茂. 1998. 黄河下游山东段河道带稳定性的地质环境评价[J]. 山东地质, 14(3): 37-45.
- 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利, 上官冬辉, 魏俊锋, 鲍伟佳, 吴立宗. 2015. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 70(1): 3-16.
- 鲁飞飞, 张勇, 李雪, 陈诚. 2019. 乌梁素河流域湿地保护与恢复建设的探讨[J]. 林业资源管理, (5): 23-27.
- 鲁详磊, 苏立志, 李琳琪, 龚西城, 张昊. 2021. 黄河滩区治理问题和村台淤筑工程地质承载力分析[J]. 人民黄河, 43(4): 54-61, 105.
- 马柱国, 符淙斌, 周天军, 严中伟, 李明星, 郑子彦, 陈亮, 吕美霞. 2020. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. 中国科学院院刊, 35(1): 52-60.
- 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, (2): 114-120.
- 陶虹, 陶福平, 刘文波. 2013. 关中城市群50年地下水动态变化及影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 40(6): 37-42, 61.
- 田伟东. 2016. 内蒙古乌梁素海湖泊健康评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- 王浩, 胡鹏. 2020. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题[J]. 水利学报, 51(9): 1009-1014.
- 王俊枝, 薛志忠, 张弛, 常屹冉. 2019. 内蒙古河套平原耕地盐碱化时空演变及其对产能的影响[J]. 地理科学, 39(5): 827-835.
- 王绍令, 罗祥瑞, 郭鹏飞. 1991. 青藏高原东部冻土分布特征[J]. 冰川冻土, (2): 41-50.
- 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 夏子龙. 2021. 近40年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J]. 中国地质, 48(1): 1-20.
- 王尧, 陈睿山, 夏子龙, 郭迟辉. 2020. 黄河流域生态系统服务价值变化评估及生态地质调查建议[J]. 地质通报, 39(10): 1650-1662.
- 肖风劲, 徐雨晴, 黄大鹏, 廖要明, 於刚. 2021. 气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J]. 人民黄河, 43(1): 10-14.
- 谢羽倩, 程舒鹏, 张燕青, 张祺, 姜哈琳, 李振山, 赵志杰. 2019. 黄河下游滩地土地利用/覆盖现状及影响因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 55(3): 489-500.
- 闫军. 2018. 宁夏银川平原湿地动态变化遥感监测[J]. 宁夏农林科技, 59(8): 57-58.
- 杨建平, 丁永建, 刘时银, 鲁安新, 陈仁升. 2003. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, (5): 595-602.
- 杨建平, 杨岁桥, 李曼, 谭春萍. 2013. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. 冰川冻土, 35(6): 1436-1445.
- 杨薇, 裴俊, 李晓晓, 孙涛, 王文燕. 2018. 黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 54(1): 98-103.
- 杨询昌, 石阳, 冯守涛, 王成明, 柴建林. 2010. 黄河下游(山东段)主要生态环境地质问题及对策[J]. 山东国土资源, 26(1): 15-18.
- 杨昭明, 白文蓉, 时兴合, 李红梅. 2019. 黄河源区气温变化特征及预估分析[J]. 冰川冻土, 41(4): 74-83.
- 张连胜, 李莲花, 龚晓洁. 2001. 河南省黄河下游重大生态环境地质问题及对策研究[J]. 河南地质, 19(1): 71-78.
- 张福存, 文冬光, 郭建强, 张二勇, 郝爱兵, 安永会. 2010. 中国主要地方病区地质环境研究进展与展望[J]. 中国地质, 37(3): 551-562.
- 张森琦, 王永贵, 赵永真, 黄勇, 李永国, 石维栋, 尚小刚. 2004. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J]. 冰川冻土, 26(1): 1-6.