

黄河兰州段污灌区生物监测与生态修复

黄德军, 张迎梅*

兰州大学生命科学学院, 甘肃省环境生物监测与修复重点实验室, 兰州 730000

摘要 黄河兰州段水体中的污染物, 随着灌溉进入农业生态系统, 在水-土-生物-人体中迁移和富集, 不仅给两岸的生态环境带来严重影响, 还对动物植物造成各种损伤, 甚至危害到人体健康。综述了在黄河兰州段污灌农业生态系统中的环境污染监测、生态风险评估及生态修复方面的工作进展, 总结了存在的问题, 提出了一些措施与对策。

关键词 黄河兰州段; 污水灌溉; 生态毒理; 生物监测; 生态修复

黄河流域作为中国重要的生态屏障和重要的经济地带, 在中国经济社会发展和生态安全保障方面发挥重要作用。黄河上游自青海省的发源地, 直到内蒙古自治区托克托县的河口镇, 流经青藏高原与黄土高原, 主干河道长 3471.6 km, 流域面积 42.8 万 km²。青藏高原为黄河提供了丰富的地表径流, 是兼具水源涵养、水土保持、生物多样性保护等多种功能的重要生态功能区。然而, 由于黄土高原土质疏松、地形破碎、植被覆盖率低、蒸发量大、降水量小, 自然环境非常恶劣。

黄河兰州段位于黄河上游甘肃境内的黄土高原区, 西起永靖县境内的刘家峡水库, 东至景泰县的五佛寺, 全长 358 km, 流域面积 85369 km², 主要流经甘肃省的永靖县、兰州市及白银市(图 1)。黄

河兰州段的径流量变化较大, 主要受刘家峡、盐锅峡和八盘峡等大水库的调节。黄河兰州段水质污染的主要污染源包括工业废水、市区生活污水、垃圾和有毒有害废弃物。黄河兰州段水质污染时间

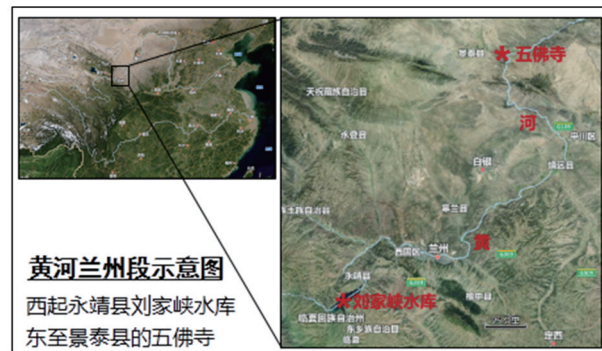


图 1 黄河兰州段示意

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670517, 31572216, 41171391, 20907019, 30770390, 30470320); 甘肃省科技支撑计划项目(1504NK-CA082, 090NKCA078); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0464); 国家科技支撑计划项目(2009BAC53B03)

作者简介: 黄德军, 教授, 研究方向为环境动物学、污染生态学、遗传毒理学, 电子信箱: huangdj@lzu.edu.cn; 张迎梅(通信作者), 教授, 研究方向为环境动物学、污染生态学、生态毒理学, 电子信箱: ymzhang@lzu.edu.cn

引用格式: 黄德军, 张迎梅. 黄河兰州段污灌区生物监测与生态修复[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 60-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.

特征主要为:丰水期(6—10月)和枯水期(12月—次年3月)污染比较严重,平水期(4、5和11月)较轻的趋势。据2017、2018年《黄河水资源公报》和《甘肃省生态环境状况统计公报》资料显示,黄河上游地表水水质劣V类水体断面比例为5.6%,主要污染项目为五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD)、氨氮、总磷、氟化物、石油类、挥发酚、重金属汞、铅、铜、镉、铬、镍、砷等。污染物主要来源于兰州市和白银市的大量工业废水和生活污水的排入,特别是白银地区由于有色金属冶炼等工业排放,铜和镉污染严重。

然而,由于黄河是兰州白银地区唯一的地表径流,工农业生产和生活用水均离不开黄河。特别是在黄河兰州段两岸的广大农村地区,其生活用水和农业灌溉用水直接来源于污染的黄河水(这些农村地区被称为污灌区)。由于直接使用黄河的污水灌溉,导致粮食和蔬菜受到污染^[1-3];长期饮用被污染的黄河水,两岸群众中癌症、肝病、胃肠病的病发率呈逐年上升趋势,胎儿畸形率惊人,发病人也趋于年轻化^[4-5]。为监测黄河兰州段水体及农灌区的污染状况、评估污染带来的生态风险,研发合适的生态修复技术,研究团队近10多年来在相对无污染的刘家峡,以及污染比较严重的兰州和白银黄河两岸的农灌区开展了系列研究工作,主要包括水体污染的背景调查,污染物在水生动物体内的富集规律及毒性影响,土壤污染情况监测,污染对土壤动物的影响,污染物在农作物中的富集规律,污染引起的人体健康风险评价,湿地去污的生态修复及其效果,作物耕作模式对健康风险的影响等。

黄河兰州段水体受重金属铅、锌、铜、镉,以及挥发酚污染严重,具有致癌风险,其中兰州市黄河水体中的挥发酚污染严重,而白银市黄河水体中的镉和铅等重金属含量较高,作为饮用水源可能会给人类带来健康影响^[1-4]。

1 黄河兰州段水污染生物监测研究进展

相较于20世纪50~60年代,黄河兰州段水生

动物鱼类和两栖类的种类和数量都明显减少,当地常见种类仅剩黄河鲤鱼(*Cyprinus carpio*)、黄河高原鳅(*Triplophysa pappenheimi*)、黄河鮰(*Gobiohwanghensis*)、鲫鱼(*Carassius auratus*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)和花背蟾蜍(*Bufo raddei*)等^[3,5]。

水体污染物可在鱼类组织中富集,黄河高原鳅、黄河鮰等鱼类的肝肾对重金属具有较强的富集能力,可用于监测水体重金属的污染程度^[3]。污染物进入动物体内之后,可导致免疫器官脏器系数发生改变:例如脾脏系数、肾脏系数和头肾系数减小,生殖腺系数增大^[6]。污染物还能导致鲫鱼、鲤鱼和黄河高原鳅的肝、肾、鳃等组织结构损伤,主要表现在:肝组织空泡变性、弥漫性坏死,肾小管、集合小管上皮细胞不同程度的肿胀、变性坏死,鳃小片出现不同程度的弯曲、上皮细胞水肿变性、坏死脱落等^[7]。

水体污染可导致鲤鱼和花背蟾蜍体内的氧化胁迫,引起抗氧化系统酶活性(SOD、GP_x)活性及脂质过氧化产物(MDA)含量明显升高^[2,8]。在长期或比较严重的污染情况下,黄河兰州段水体中鲫鱼、鲤鱼、麦穗鱼、黄河高原鳅和花背蟾蜍体内发生明显的氧化损伤和遗传损伤,包括红细胞的微核率增加、肝细胞的DNA损伤程度升高、DNA甲基化的改变等^[1,3,5,9-11]。而且,这些损伤指标与污染程度具有明显的正相关性,表明动物体的氧化损伤和遗传损伤指标可以指示污染程度。此外,鲫鱼、鲤鱼和黄河高原鳅体内的损伤程度(如抗氧化酶活性、红细胞微核率、DNA损伤和DNA甲基化程度)随污染程度的季节性变化而变化,在污染程度轻的季节,损伤较小,而当水体污染加重,鱼体内的损伤程度也显著增加^[1,6]。这充分说明水体污染是造成动物体损伤的直接原因,同时也说明污染程度减轻后,环境对鱼类的损伤也能被修复。进一步的研究显示,虽然黄河兰州段水污染对鱼类抗氧化酶和脂质过氧化的影响是多种污染物共同作用的结果,但重金属(Cu、Cd、Pb)和挥发酚的影响较显著^[1,2,9]。

黄河兰州段的水体污染物不仅对直接生活在其中的水生动物造成各种损伤,也可随着灌溉活动在土壤、农作物、动物甚至人体中迁移转化和富集。

研究显示,在兰州和白银的污灌区,土壤的石油类(多环芳烃)和重金属(镉、铅、锌、铜)污染明显,黄河兰州段若干样点土壤受到了重金属和多环芳烃不同程度的污染,但多环芳烃类的污染较轻^[12];白银污灌区的土壤中Cd浓度超过土壤环境质量标准GB 15618—1995中规定的限值并达到中度污染,而Cu、Zn、Pb的浓度尽管不超过但已接近国标的限值规定^[13-14]。白银的污水灌溉是土壤中重金属污染的一个主要原因^[15]。进一步对污染物在土壤中的赋存形式和分布规律的研究发现,土壤重金属各形态质量分数(包括重金属总量)均在表层中(0~20 cm)分布最多,而在中层最低^[16-17]。土壤中的重金属Cu、Zn均以残渣态为主,占比达70%以上;根据污染水平,白银污灌区土壤中4种重金属的污染程度顺序均为Cd>Pb>Zn>Cu^[18-19]。而根据潜在生态危害,其顺序为Cd>Pb>Cu>Zn,其中Cd的污染程度最高,潜在生态危害最强,表层尤其突出,因此,该地区的土壤Cd污染严重,亟需整治以减小其对当地农作物的潜在危害^[20]。

土壤污染可对土壤动物、农作物等发挥毒性效应,带来严重的健康风险^[13-14]。在兰州和白银两地的农灌区,由于长期使用受污染的黄河水进行灌溉,灌区土壤中线虫的种类、数量、取食性和生态多样性也发生了明显的变化,现在以耐污种类为主^[12]。同时,线虫的生态指数与灌区土壤中重金属及多环芳烃的浓度呈现一定的相关性,表明线虫群落及其指数的变化直接与污染物相关,这些指标也可以作为土壤生态健康监测的敏感指标^[12]。土壤蚯蚓也受污染物的显著影响:与未污染的刘家峡地区相比,在重金属污染的白银地区,粉正蚓的种群密度和生物量显著降低、体内的金属硫蛋白浓度显著升高、体腔细胞内中性红保留时间极显著缩短,表明粉正蚓受到重金属污染胁迫后出现了明显的应激反应,并导致溶酶体膜受损^[21]。进一步分析表明,污染地区农田土壤中粉正蚓种群密度与生物量显著,与溶酶体膜损伤、抗氧化酶活性的变化等密切相关^[21]。

土壤污染物可在农作物和蔬菜中富集。研究

表明,白银污灌区种植的小麦中,Pb、Cd浓度都超过了食品质量标准中对Pb、Cd的限值,相关性分析发现小麦中的Cd主要是从土壤富集而来;春小麦对重金属的积累能力具有组织差异性,且随春小麦种植密度的增加和生长期的延长而降低^[22];该地区常年种植的11种蔬菜中,重金属Cu、Zn、Cd的浓度都处于安全范围之内,但豆角、西红柿、萝卜、土豆、大白菜这5种蔬菜中Pb的含量超标。进一步研究发现该地区4种重金属对人体造成了明显的健康风险,其大小顺序为Pb>Cd>Cu>Zn。由于小麦中重金属Pb、Cd含量较高,且小麦为当地居民的主要粮食,因而对人体健康造成了较大的不利影响^[15]。此外,白银污灌区的重金属,可经食物链在树麻雀体内富集和生物放大,重金属浓度随营养级(农作物-种子-无脊椎动物-鸟类)而升高。其中,Pb的生物放大效应最为显著。雏鸟相对于幼鸟和成鸟而言,面临较高的暴露和摄入风险,主要原因是雏鸟主要以无脊椎动物(营养级较高,体内含有较高的重金属浓度)为食,幼鸟和成鸟则主要以粮食作物籽粒和草籽(营养级稍低)为食^[23]。重金属可进一步在树麻雀成鸟的初级飞羽、血液和粪便中富集,且浓度与环境中的浓度具正相关性,可用于指示环境重金属的污染。

2 黄河兰州段生态修复研究进展

虽然黄河兰州段的水体污染和污水灌溉给农田生态系统、农作物、动物甚至人体带来了严重的健康风险,但是当地居民的生活与生产却不能不依赖于黄河。为减轻污水灌溉带来的不良后果,并综合利用仅有的地表水资源,尝试生态去污、生态修复和作物种植方式等绿色农业生产模式研究,取得了部分成果。

利用本地种植物香蒲,在白银污灌区构建了人工湿地污水处理系统,对灌溉用的污水进行处理,结果发现,人工湿地能显著提高水中的溶解氧含量,降低总磷、总氮、化学需氧量、生化需氧量、挥发酚及4种重金属(铜、锌、铅、镉)的含量,这表明人

工湿地可以高效地去除受污黄河水中的污染物^[24]；污水经湿地处理后，显著降低了指示生物麦穗鱼的生理和遗传损伤均^[10]，也改善土壤环境，使得土壤线虫的营养类群、生态多样性均得到修复^[25]；人工湿地处理灌溉水后，还显著降低了农田土壤和农作物（春小麦）中的污染物含量，降低了人们食用作物的风险。总体而言，人工湿地可作为污灌区一种有效的污水处理技术，对水质改善和生态修复具有重要意义^[24]。

研究还发现，春小麦对重金属的积累能力有组织差异性，而且，增加种植密度或延长生长期的情况下，春小麦籽粒中富集的重金属相对较少，因此，可在不显著降低产量的前提下，通过提高种植密度的方式减少人们因食用粮食带来的健康风险^[21]。此外，玉米籽粒相对春小麦籽粒而言，对重金属的富集能力更低，以玉米代替小麦作为主食可降低健康风险系数；同时，玉米的秸秆却能富集大量重金属，可使得土壤Cd、Pb和Zn的含量显著减少，所以，在重金属轻度污染的农田种植玉米可在保证食品安全的同时，有效减轻土壤重金属污染^[26]。总体而言，通过恰当的种植方式，进行生态修复，可保证污灌区作物的安全，减少对当地消费者（人及家畜）产生的健康风险。

综上所述，黄河兰州段由于水体污染，给生态环境、农业生产、生物体乃至人体健康等带来了巨大的风险和危害。目前，由于社会的发展与生活水平的提高，社会各界对生态环境保护问题均比较重视，特别是自党的十八大以来，党中央、国务院和各方地政府都采取了一系列措施，比如甘肃省在中央的支持下，紧紧围绕筑牢“甘南高原地区黄河上游生态安全屏障”“中部沿黄河地区生态走廊及城市生态屏障”的国家生态安全屏障建设任务，先后推进了各类生态系统保护与建设项目，如甘南高原区黄河上游水源涵养建设，黄河上游兰州白银段生态保护与修复工作，加大污染治理和生态修复等工作强度，使得生态环境持续向好，取得了积极成效。此外，通过湿地去污、生态修复、改变耕作方式等可以有效降低污染物对农业生态系统的负面影响，减小水体污染物带来的生态风险和人群健康风险。

3 结论

黄河上游的环境基础研究薄弱，湿地生态功能退化、水污染防治和面源污染治理攻坚难度大、生态环境监测能力薄弱等原因，造成了部分地区生态环境脆弱，承载力不足。基于此，黄河上游的生态保护和水土污染防治工作显得尤为迫切。针对以上问题，需做好以下方面的工作。

1) 加大资金投入，聚集一批高素质的科研人员，全面系统地对黄河流域的水土污染基础背景、流域生态安全及生态环境风险点识别等进行调查研究，摸清家底，为实施大保护、大治理精准施策、精准发力。

2) 加强流域内环境污染的监测能力建设，大力建设野外监测台站，形成全流域覆盖的环境监测体系。

3) 通过研发科学的耕作方式，提高农作物产量，减少农药和化肥等污染物的排放，进行面源污染治理。

4) 通过科学方法进行湿地生态功能保护，生物多样性保护，并探索合适的生态修复体系，结合生态恢复工程，提升黄河上游的生态功能。

参考文献(References)

- [1] Huang D, Zhang Y, Wang Y, et al. Assessment of the genotoxicity in toad *Bufo raddei* exposed to petrochemical contaminants in Lanzhou Region, China[J]. Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2007, 629(2): 81-88.
- [2] Huang D, Zhang Y, Song G, et al. Contaminants-induced oxidative damage on the carp *Cyprinus carpio* collected from the upper Yellow River, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 128: 483-488.
- [3] Wang Y, Chen P, Cui R, et al. Heavy metal concentrations in water, sediment, and tissues of two fish species (*Triplophysa pappenheimi*, *Gobio huanghensis*) from the Lanzhou section of the Yellow River, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 165: 97-102.
- [4] Si W, Ji W, Yang F, et al. The function of constructed wetland in reducing the risk of heavy metals on human

- health[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 181(1-4): 531-537.
- [5] 龙静, 张迎梅, 朱丽娜, 等. 利用微核试验和彗星电泳试验评价黄河兰州段水质致遗传毒性作用[J]. *应用与环境生物学报*, 2006(12): 59-63
- [6] 任培丽, 张迎梅, 耿广琴, 等. 污染水域鲫鱼外周血细胞形态和数量的变化[J]. *动物学杂志*, 2008, 43(2): 37-42.
- [7] 耿广琴. 黄河水污染对鲫鱼的氧化胁迫和组织结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [8] 宋刚, 张迎梅, 朱丽娜, 等. 黄河上游环境污染对花背蟾蜍抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. *四川动物*, 2007, 26(2): 434-437.
- [9] 白杨. 黄河兰州段水质对黄河高原鳅氧化胁迫效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [10] 周敏. 麦穗鱼对人工湿地系统净化效果的指示作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [11] Guo R, Zhang W, Yang Y, et al. Variation of fitness and reproductive strategy in male *Bufo raddei* under environmental heavy metal pollution[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 164: 253-260.
- [12] Chen G, Qin J, Shi D, et al. Diversity of soil nematodes in areas polluted with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lanzhou, China[J]. *Environmental Management*, 2009, 44: 163-172.
- [13] Ai S, Guo R, Liu B, et al. A field study on the dynamic uptake and transfer of heavy metals in chinese cabbage and radish in weak alkaline soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 2079-2077.
- [14] Ai S, Liu B, Yang Y, et al. A field study on temporal and spatial distribution characteristics of heavy metal accumulation in a soil-eggplant system and their influencing factors[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 153: 204-214.
- [15] Dai X, Feng L, Ma X, et al. Concentration level of heavy metals in wheat grains and the health risk assessment to local inhabitants from Baiyin, Gansu, China[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 518-523: 951-956.
- [16] Liu B, Ai S, Guo R, et al. Chemical fractions and mobility of Cd, Cu, Pb and Zn in soil profile of a sewage irrigation area, Northwest China[J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2016, doi: 10.12783/issn.1544-8053/13/2/S3.
- [17] Liu B, Ma X, Ai S, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in soils under different land uses in a sewage irrigation region, Northwest China[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2016, 16: 1547-1556.
- [18] Liu B, Ai S, Zhang W, et al. Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 822-829.
- [19] Liu B, Ai S, Naeem S, et al. Metal bioaccessibility in a wastewater irrigated soil-wheat system and associated human health risks: Implications for regional thresholds[J]. *Ecological Indicators*, 2018, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.06.054.
- [20] Liu B, Mo C, Zhang Y. Using cadmium bioavailability to simultaneously predict its accumulation in crop grains and the bioaccessibility in soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 246-252.
- [21] 任梁, 艾世伟, 刘白林, 等. 弱碱性农田土壤重金属污染对粉正蚓种群密度和生物量的影响研究[J]. *四川动物*, 2017, 36(5): 507-512.
- [22] Ma X, Zhu S, Ai S, et al. Density-dependent accumulation of heavy metals in spring wheat (*Triticum aestivum*) and the risk assessment from weak alkaline soils, northwest of China[J]. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 4(1): 1-7.
- [23] Ai S, Yang Y, Ding J, et al. Metal exposure risk assessment of tree sparrows at different life stages via diet from a polluted area in northwestern China[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, 38: 2785-2796.
- [24] Si W, Zhang W, Lv Y, et al. Heavy metal removal in a constructed wetland and benefits for the development of the toad *Bufo raddei*[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23(6): 313-321.
- [25] 秦洁. 线虫对人工湿地处理水灌溉农田土壤环境质量的指示作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [26] Zhu S, Ma X, Guo R, et al. A field study on heavy metals phytoattenuation potential of monocropping and intercropping of maize and/or legumes in weak alkaline soils[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(10): 1014-1021.

Biological monitoring and ecological remediation in Lanzhou section of the Yellow River

HUANG Dejun, ZHANG Yingmei*

School of Life Sciences, Gansu Key Laboratory of Biomonitoring and Bioremediation for Environmental Pollution, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract Water pollutants in Lanzhou section of Yellow River can enter the agricultural ecosystem along with irrigation, migrate among water-soil-bio systems and be accumulated in organisms including human body. These pollutants can not only cause serious influences on the ecological environments of both sides of the Yellow River but also cause various damages to animals and plants and even to human health. In the present paper, we review the progress of studies on environmental pollution monitoring, ecological risk assessment and ecological remediation in the agricultural ecosystem in Lanzhou section of the Yellow River. We also summarize the existing problems and provide some countermeasures.

Keywords Lanzhou Section of Yellow River; sewage irrigation; ecotoxicology; biological monitoring; ecological restoration ●



(责任编辑 刘志远)