

调水后受水区水环境的演化及重金属污染评价

孙亚乔¹, 窦琳¹, 段磊¹, 乔晓霞², 申圆圆¹

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,
陕西省环境保护水土污染与修复重点实验室, 西安 710054
2 四川交通职业技术学院道桥系, 成都 611130)

摘要: 通过渭河原水和客水的混合稀释实验模拟调水后受水区水环境的演化, 价调水后水环境的重金属污染特征、含变化规律及潜在的生态风险。研究表明: 在 pH、矿化度等其他因素和重金属间相互作用下, 渭南和咸阳段混合水体中重金属 Co、Cr、Mn、Mo、Pb 和 V 的含量基本上随客水混入量的增大而下降, 水质呈良性发展; 客水汇入后, 受混合稀释作用的影响, 混合水的重金属内梅罗综合污染指数 P 综合平均降低幅度达到 60% 左右, 重金属污染程度明显降低; 调水后受水区水环境中单个重金属潜在生态风险系数和潜在生态危害指数 RI 明显降低, 重金属 Cr、Mn、Pb 的潜在生态风险系数平均下降幅度分别达到 50%、70%、56% 左右, 潜在生态危害指数 RI 的平均下降幅度为 57% 作用, 说明调水的混合稀释作用可以明显降低重金属的潜在生态风险。

关键词: 受水区; 重金属污染; 内梅罗指数; 潜在生态风险指数; 潜在生态危害系数; “引汉济渭”工程
中图分类号: X171, X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0051-06

Water Environment Evolution and Heavy Metal Pollution Assessment in the Water Receiving Area after Water Transfer

SUN Yaqiao¹, DUAN Lei¹, DOU Lin¹, QIAO Xiaoxia², SHEN Yuanyuan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Key Laboratory of

Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Key Laboratory of

Environmental Protection & Pollution and Remediation of Water and Soil of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China

2 Road and Bridge Department, Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu, 611130, China)

Abstract: The mixture dilution experiment of Weihe River water and incoming water was performed to simulate the water environment evolution in the water receiving area after water transfer and to assess the pollution characteristics of heavy metals in the water environment and the potential ecological risk. The results showed that (1) the contents of Co, Cr, Mn, Mo, Pb, and V in the mixed water of Weihe River of the Weinan and Xianyang sections decrease with the increasing volume of incoming water due to the impacts of the interactions among pH, TDS, and heavy metals, and water quality of the mixed water improves; (2) the comprehensive pollution index of heavy metal (Nemoro P 综合) of the mixed water reduces by about 60% in average due to mixture dilution, and the pollution degree of heavy metals decreases significantly; and (3) the potential ecological risk coefficient of single heavy metal and potential ecological risk index RI in the water environment of the water receiving area after water transfer reduce apparently. The average decline rates of the potential ecological risk coefficients of Cr, Mn, and Pb are 50%, 70%, and 56% respectively, and the average decline rate of the potential ecological hazard index RI is 57%, which indicates that the mixture dilution can decrease the potential ecological risk of heavy metals significantly.

Key words: water receiving area; heavy metal pollution; Nemoro index; potential ecological risk coefficient; potential ecological hazard index; Hanjing River to Weihe River water transfer project

收稿日期: 2013-11-15 修回日期: 2014-03-04 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41102150, 41002086, 41372258); 陕西省自然科学基金(2013JM 5003); 中央高校科研专项基金(2013G1291065, 2013G1291067, 2013G1502036)

作者简介: 孙亚乔(1977-), 女, 浙江上虞人, 副教授, 博士, 主要从事水文地球化学、水污染控制与生态环境保护方面研究。E-mail: suryaqiao@126.com

我国水资源严重短缺并且时空分布不均,随着社会经济的高速发展,水资源供需矛盾加剧^[1]。近些年来,各种规模的跨流域调水工程如“引黄济青”、“引碧入连”、“南水北调”、“引汉济渭”等大量修改,用以调整水资源的时空分配,缓解缺水带来的生态环境、工农业生产、居民生活等方面的问题^[2]。由于调水改变流域间水资源的地理分布,受水区的水文情势将发生改变,河床周边水体环境之间污染物吸收与释放的动态平衡也被打破^[3-7],直接影响周边水环境质量^[8-11]。

渭河流域属于资源型干旱地区,水资源供需矛盾突出,如无跨流域调水,至 2020 年渭河流域缺水量达 24.96 亿 m³^[12]。渭河沿岸城市污水(点源污染)、工业废水和四大灌区灌溉退水以及降雨径流排入的污染物(非点源污染)量逐年增加,排污量远远超过渭河纳污能力,使得渭河水量少、水质差的问题更加突出,干流 13 个监测断面除对照断面外,水质现状均为 V 类或劣 V 类水,其中 78% 的断面属劣 V 类水质^[3]。渭河水环境污染严重制约了关中地区社会经济的发展,因此目前正在修建的引汉济渭工程为破解陕西缺水问题意义重大。

“引汉济渭”工程在 2012 年建成三河口水库以下工程,年调水量 5 亿 m³,将在 2015 年完全竣工,届时年调水量达 15 亿 m³,可有效增加渭河水量,缓解水资源的供需矛盾。为了评价调水后渭河水环境演化,特别是客水汇入对重金属污染的影响,本文将进行混合稀释实验,为客水调入后渭河水环境污染的防治提供科学依据。

1 实验方法

1.1 样品采集

2010 年 12 月 6 日-8 日期间,对渭河流域进行了现场调查,分别在渭河流域咸阳段(北纬 34°21'23",东经 108°46'29")和渭南段(北纬 34°31'47",东经 109°31'47")进行了地表水采样。

1.2 实验方案

渭河陕西段水资源量为 80~43.5 亿 m³/a 左右,平水年为 63.02 亿 m³/a 左右,2012 年计划调水量为 5 亿 m³(丰枯水期渭河水量和调客水量的混合比例为 14:1~9:1),2015 年为 15 亿 m³(丰枯水期渭河水量和调客水量的混合比例为 5.33:1~3:1)。据此,拟设定渭河水和客水的混合比例方案为 16:1,12:1,10:1,9:1,8:1,7:1,6:1,5:1,4:1,3:1,2:1,1:1,其中包括了对丰水期、平水期、枯水期客水的混入比例。在烧杯中进行混合稀释实验,用于确定渭河水质在外来水源稀释情况下水质的变化状况。

首先对采集的原水水样进行详细测定(咸阳和渭南水样为所取得地表水,自来水代替客水),结果见表 1。然后取按不同比例充分混合后的水量 1000 mL,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP6300)测定主要污染渭河水环境的六种重金属元素(Co、Cr、Mn、Mo、Pb、V)的含量 Co、Cr、Mn、Mo、Pb、V。

1.3 质量控制

实验分析时,所有样品均进行 10% 平行样测试,相对标

表 1 实验原水水化学组分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of Weihe River water

	(mg/L)		
原水	渭南水样	咸阳水样	自来水
Ph	7.57	7.54	7.96
Eh/mv	231.50	253.00	241.00
电导率/(us·cm ⁻¹)	569.00	681.00	146.90
矿化度	489.63	578.57	120.14
总硬度(以碳酸钙计)	105.56	99.34	41.78
HCO ₃ ⁻	270.08	278.18	91.21
Cl ⁻	89.05	89.05	3.72
SO ₄ ²⁻	143.88	236.97	25.25
K ⁺	10.98	9.12	1.60
Na ⁺	5.13	5.00	2.19
Ca ²⁺	75.09	71.10	35.21
Mg ²⁺	30.47	28.24	6.57
Co	0.0036	0.0034	0.0000
Cr	0.0016	0.0016	0.0009
Mn	0.0250	0.0000	0.0004
Mo	0.0205	0.0169	0.0008
Pb	0.0007	0.0021	0.0000
V	0.0032	0.0018	0.0003

准偏差(RSD)在 0.3%~0.8%,满足实验要求。重金属测定的准确性通过国家标准物质进行验证,回收率在 92%~101.3% 之间,符合质量控制要求。所有分析样品时所用的仪器在检定合格有效期内,因此实验数据结果准确可靠。

2 结果与分析

2.1 重金属浓度变化特征

经过混合稀释作用后,各重金属浓度随混合比例的变化规律见图 1。

从图 1 可以看出,渭南和咸阳段混合水体中重金属 Co、Cr、V 的浓度随客水量的增加呈现波动式下降的变化趋势;Mn 浓度在渭南段混合水体中随客水量的增加呈现缓慢下降的趋势,在咸阳段混合水体中则变化趋势不明显;Mo 浓度随客水量的增加呈现显著下降的趋势;Pb 浓度随客水量的增加呈现先上升后下降的变化趋势。

2.2 pH 值的变化特征

从图 2 可以看出,随着客水比例的增加,混合水 pH 值呈现上升趋势。为了探讨 pH 值对混合水中重金属浓度影响,本文对混合溶液水中 pH 值与重金属相关性进行了分析,结果见表 2、表 3。

由表 2 可知,渭南段不同比例混合水中 pH 值与 Co、Mn、Mo、V 均呈负相关,而与 Cr、Pb 呈正相关,其中负相关程度为 Mo>Mn>Co>V,正相关程度为 Cr>Pb。特别是,pH 值与 Mn、Mo 呈极显著的负相关性($P \leq 0.01$)。

由表 3 可知,咸阳段不同比例混合水中 pH 值与重金属 Co、Mo、V 呈负相关,而与 Cr、Mn、Pb 呈正相关,其中负相关程度为 Mo>V>Co,正相关程度为 Mn>Cr>Pb。

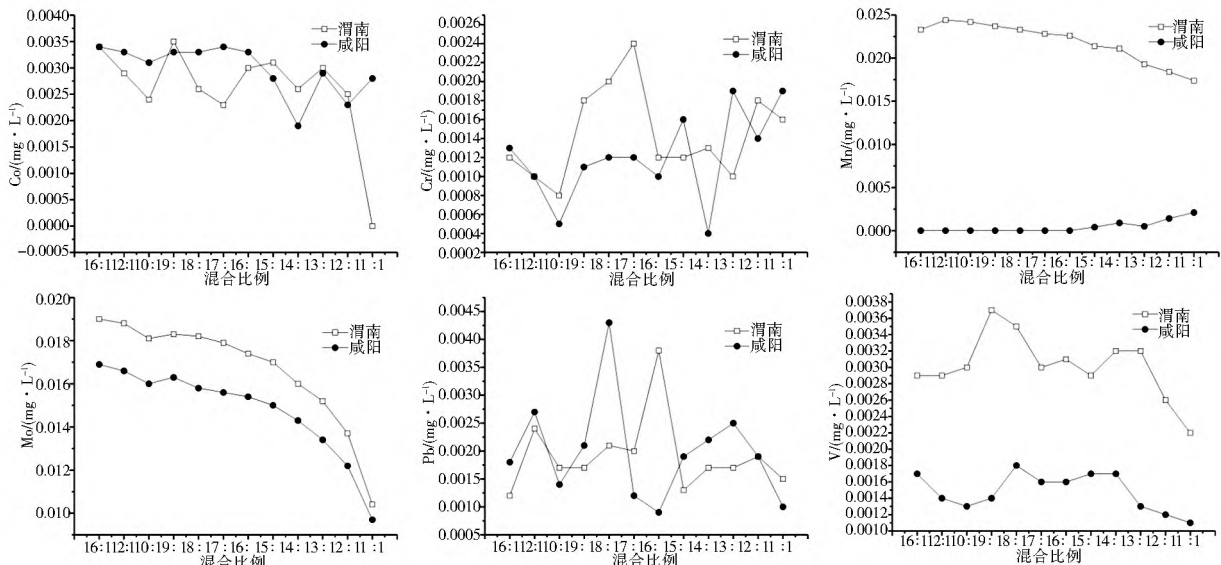


图 1 重金属随混合比例的变化规律

Fig. 1 Variation of contents of heavy metals with mix ratio

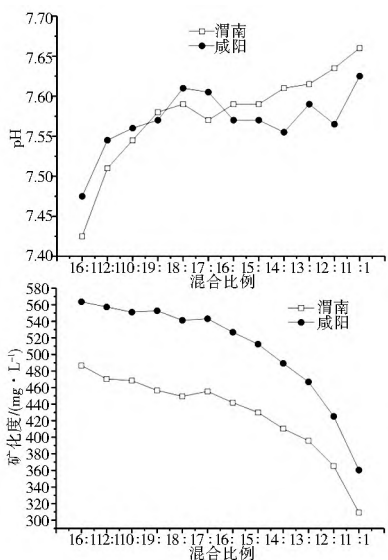


图 2 pH 值和矿化度随混合比例的变化趋势

Fig. 2 Variation of pH and TDS with mix ratio

总体上,渭南和咸阳不同比例混合水中 pH 值与各重金属元素的变化规律基本吻合,除了部分混合水体中 Mn、Cr、Pb 的变化有所异常外大部分重金属浓度皆随着客水的混入而降

低,说明外来优质客水的混入在改变原水 pH 值的同时也降低了重金属的浓度,水体的混合稀释作用使水质向好的方向发展。

2.3 矿化度变化特征

渭南和咸阳混合水的矿化度与重金属的关系见表 2 和表 3。

由表 2 可知,渭南不同比例混合水中矿化度与 Cr 负相关,而与 Co、Mn、Mo、Pb、V 呈正相关,且正相关程度为 Mo > Mn > Co > V > Pb。特别是,矿化度与 Co、Mn、Mo 呈极显著正相关 ($P \leq 0.01$),矿化度与 V 呈显著正相关 ($P \leq 0.05$)。

由表 3 可知,咸阳不同比例混合水中矿化度与 Cr、Mn 负相关,而与 Co、Mo、Pb 呈正相关,且正相关程度为 Mo > V > Co > Pb。特别是,矿化度与 Mo 呈极显著正相关 ($P \leq 0.01$),与 Mn 呈极显著负相关 ($P \leq 0.01$),与 Co、V 呈显著正相关 ($P \leq 0.05$)。

渭南和咸阳段不同比例混合水中矿化度与各重金属的变化规律基本吻合。渭南和咸阳段混合水体中重金属 Mo 的含量与矿化度都呈现出呈极显著正相关 ($P \leq 0.01$),说明优质低矿化度客水的混入可以使水质变好。

表 2 渭南水混合水中 pH 值、矿化度与重金属相关性

Table 2 Relativity of pH and TDS with heavy metals in mixed water (Weinan section)

	pH	TDS	Co	Cr	Mn	Mo	Pb	V
pH	1							
TDS		1						
Co	-0.527	0.746* *	1					
Cr	0.28	-0.144	-0.211	1				
Mn	-0.729* *	0.954* *	0.593*	-0.113	1			
Mo	-0.758* *	0.991* *	0.788* *	-0.104	0.947* *	1		
Pb	0.097	0.147	0.124	-0.014	0.226	0.179	1	
V	-0.179	0.608*	0.701*	0.104	0.604*	0.676*	0.161	1

* *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表 3 咸阳水混合溶液中 pH 值、矿化度与重金属相关性

Table 3 Relativity of pH and TDS with heavy metals in mixed water (Xianyang section)

	pH	TDS	Co	Cr	Mn	Mo	Pb	V
pH	1							
TDS		1						
Co	- 0.088	0.601*	1					
Cr	0.337	- 0.544	0.111	1				
Mn	0.395	- 0.968* *	- 0.674*	0.421	1			
Mo	- 0.564	0.996* *	0.57	- 0.542	- 0.957* *	1		
Pb	0.047	0.254	0.033	- 0.021	- 0.258	0.273	1	
V	- 0.288	0.621*	0.173	- 0.329	- 0.581*	0.629*	0.365	1

* * . 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.4 混合水体中重金属元素的相互作用

不同混合比例水体中重金属元素浓度的相关性见表 2 和表 3。

从表 2 可以看出,渭南混合水中 Co 和 Mo、Mn 和 Mo 呈极显著正相关($P \leq 0.01$),说明溶液中 Co 和 Mo、Mn 和 Mo 的协同作用明显; Co 和 Mn、V 和 Co、Mn、Mo 显著正相关($P \leq 0.05$), Cr 和 Co、Mn、Mo、Pb 呈负相关,说明 Cr 和 Co、Mn、Mo、Pb 在混合水体中呈现拮抗作用。

从表 3 可以看出,咸阳混合水中重金属 Mn 和 Mo 呈极显著负相关($P \leq 0.01$),说明溶液中 Mn 和 Mo 的具有明显的拮抗作用;重金属 Co 和 Mn、Mn 和 V 呈显著负相关($P \leq 0.05$),说明溶液中重金属 Co 和 Mn、Mn 和 V 具有拮抗作用;混合水中重金属 V 和 Mo 显著正相关($P \leq 0.05$),说明溶液中 V 和 Mo 具有协同作用; Cr 和 Mn、Mo、V 呈负相关,说明 Cr 和 Mn、Mo、V 在咸阳混合水体中呈现拮抗作用。

3 调水后水环境重金属污染评价

本文选择内梅罗综合污染指数法进行水环境质量评价,评价标准为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)^[14]。另外,结合重金属性质及环境行为特点,利用 Hakanson(1980)潜在生态风险评价对调水后水环境中重金属的生态危害程度进行评价^[15]。

3.1 重金属综合污染评价

将渭南和咸阳混合水中重金属测定值代入内梅罗综合污染指数的计算公式,评价结果见表 4 和图 3,可以看出:

(1) 不同比例混合水的重金属内梅罗综合污染指数 $P_{综合}$ < 0.8 ,水质优良,而且混合水的重金属内梅罗综合污染指数 $P_{综合}$ 皆小于原水,渭南段平均下降 59.34%,咸阳段平均下降了 61.76%。

(2) 随客水混入量的增大,渭南段混合水的重金属内梅罗综合污染指数 $P_{综合}$ 逐渐下降,下降速率为每混入一份外来水源, $P_{综合}$ 下降 0.096;咸阳段的则波动式变化,在混合比例为 8:1 时,污染指数 $P_{综合}$ 为最大值 0.066,说明在咸阳段的其它因素对重金属浓度起到了重要的影响作用,如水体中的胶体含量等。

3.2 重金属潜在生态风险评价

3.2.1 渭南混合水中重金属的潜在生态风险

渭南不同比例混合水中重金属潜在生态危害系数与危

害指数计算结果见表 5 和图 4。

表 4 混合水中重金属综合污染指数

Table 4 Comprehensive pollution index of heavy metals in mixed water

混合比例	样品编号	$P_{综合}$	混合比例	样品编号	$P_{综合}$
	渭南原水	0.414		咸阳原水	0.088
	客水	0.014		客水	0.014
16:1	WM-1	0.178	16:1	XM-1	0.029
12:1	WM-2	0.188	12:1	XM-2	0.042
10:1	WM-3	0.184	10:1	XM-3	0.022
9:1	WM-4	0.183	9:1	XM-4	0.033
8:1	WM-5	0.181	8:1	XM-5	0.066
7:1	WM-6	0.178	7:1	XM-6	0.020
6:1	WM-7	0.177	6:1	XM-7	0.017
5:1	WM-8	0.164	5:1	XM-8	0.032
4:1	WM-9	0.162	4:1	XM-9	0.034
3:1	WM-10	0.148	3:1	XM-10	0.042
2:1	WM-11	0.144	2:1	XM-11	0.033
1:1	WM-12	0.135	1:1	XM-12	0.033

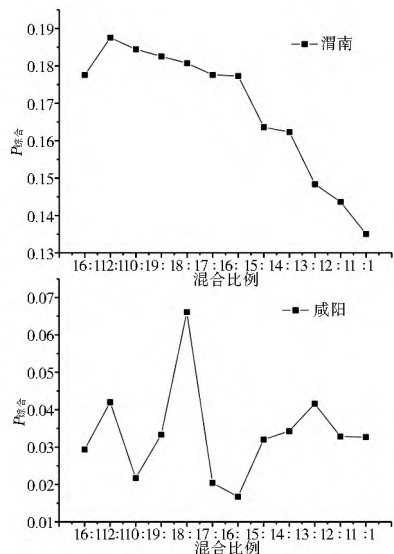


图 3 混合水中重金属内梅罗综合污染指数随混合比例的变化规律

Fig. 3 Variation of Nemoro comprehensive pollution index of heavy metals with mix ratio

从表 5 中可以看出,渭南不同比例混合水中重金属潜在

表 5 渭南混合水中重金属潜在生态危害系数 E_i^p 与危害指数 (RI)

Table 5 Potential ecological hazard coefficient and index of heavy metals in mix water (Weinan section)

混合比例	E_i^p			RI
	Cr	Mn	Pb	
16:1	0.048	0.233	0.12	0.401
12:1	0.04	0.244	0.24	0.524
10:1	0.032	0.242	0.17	0.444
9:1	0.072	0.237	0.17	0.479
8:1	0.08	0.233	0.21	0.523
7:1	0.096	0.228	0.2	0.524
6:1	0.048	0.226	0.38	0.654
5:1	0.048	0.214	0.13	0.392
4:1	0.052	0.211	0.17	0.433
3:1	0.04	0.193	0.17	0.403
2:1	0.072	0.184	0.19	0.446
1:1	0.064	0.174	0.15	0.388

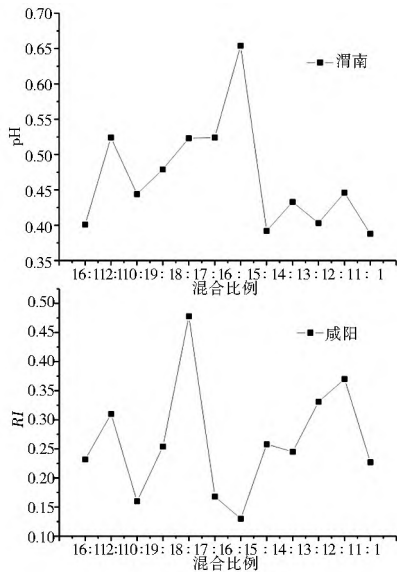


图 4 混合水中重金属的潜在生态危害指数
Fig. 4 Potential ecological hazard index of heavy metals in mixed water

生态危害系数顺序为 $Mn > Pb > Cr$, 受水后混合水比渭河原水中重金属 Cr、Mn、Pb 的潜在生态危害系数分别平均下降了 51.94%、59.58%、52.018%, 与渭南华县地表水重金属潜在生态危害系数的顺序一致, 而且不同比例混合水中重金属潜在生态危害系数皆小于 40, 属于轻微生态危害。

渭南不同比例混合水中重金属潜在生态危害指数 RI 随客水混入量增加呈现先上升后下降的变化趋势, RI 平均下降了 55.89%。在混合比例为 6:1 时, 重金属潜在生态危害指数 RI 为最大值 0.654 (见图 4), 而且不同比例混合水中重金属潜在生态危害指数 RI 皆小于 150, 属于轻微生态危害。

3.3.2 咸阳混合水中重金属的潜在生态风险

咸阳不同比例混合水中重金属潜在生态危害系数与危害指数计算结果见表 6 和图 4。

从表 6 中可以看出咸阳不同比例混合水中重金属潜在生态危害系数顺序为 $Pb > Cr > Mn$, 受水后混合水比渭河原

水中重金属 Cr、Mn、Pb 的潜在生态危害系数分别平均下降了 53.53%、81.60%、60.96%, 而且不同比例混合水中重金属潜在生态危害系数皆小于 40, 属于轻微生态危害。

咸阳不同比例混合水中重金属潜在生态危害指数 RI 随外来水源混入增加呈现先波动式升降的变化趋势, 平均下降了 60.54%, 在混合比例为 8:1 时, 重金属潜在生态危害指数 RI 为最大值 0.478 (见图 4), 咸阳不同比例混合水中重金属潜在生态危害指数 RI 低于渭南, 而且不同比例混合水中重金属潜在生态危害指数 RI 皆小于 150, 属于轻微生态危害。

表 6 咸阳混合水中重金属潜在生态危害系数与危害指数
Table 6 Potential ecological hazard coefficient and index of heavy metals in mix water (Xianyang section)

混合比例	Cr	Mn	Pb	RI
16:1	0.052	0	0.18	0.232
12:1	0.04	0	0.27	0.31
10:1	0.02	0	0.14	0.16
9:1	0.044	0	0.21	0.254
8:1	0.048	0	0.43	0.478
7:1	0.048	0	0.12	0.168
6:1	0.04	0	0.09	0.13
5:1	0.064	0.004	0.19	0.258
4:1	0.016	0.009	0.22	0.245
3:1	0.076	0.005	0.25	0.331
2:1	0.056	0.014	0.3	0.37
1:1	0.076	0.021	0.13	0.227

4 结论

(1) 在 pH、矿化度等其他因素的对重金属的作用及重金属间相互作用下, 受客水后渭南和咸阳段混合水环境中重金属含量基本上是随客水混入量的增大而下降, 水质呈良性发展。

(2) 调水后, 由于受客水汇入混合稀释作用的影响, 渭南段和咸阳段混合水的重金属内梅罗综合污染指数 P 综合平均降低幅度分别为 59.34% 和 61.76%, 重金属污染程度明显降低。

(3) 调水后受水区后地表水中单个重金属潜在生态风险系数和潜在生态危害指数 RI 明显降低, 重金属 Cr、Mn、Pb 的潜在生态风险系数平均下降幅度分别达到 50%、70%、56% 左右, 潜在生态危害指数 RI 的平均下降幅度为 57% 左右, 说明混合稀释作用明显降低了重金属的潜在生态风险。

参考文献 (References):

[1] 夏军, 苏人琼, 何希吾, 等. 中国水资源问题与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2008, (2): 116-120. (XIA Jun, SU Reng qiong, HE Xi wu, et al. Water Resources Problems in China and Their Countermeasures & Suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, (2): 116-120. (in Chinese))

[2] 汪明娜, 汪达. 调水工程对环境利弊影响综合分析[J]. 水资源保护, 2002, (2): 10-15. (WANG Ming na, WANG Da. Analysis of Pros and Cons of Water Diversion Projects to Environment [J]. Water Resources Protection, 2002, (2): 10-15. (in Chinese))

[3] Alperin M J, Martens C S, Albert D B, et al. Benthic Fluxes and Pore Water Concentration Profiles of Dissolved Organic Carbon

- in Sediments From the North Carolina Continental Slope[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, (63): 427-448.
- [4] Covelli S, Faganeli J, Horvat M, et al. Porewater Distribution and Benthic Flux Measurements of Mercury and Methylmercury in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, (48): 415-428.
- [5] Choe K Y, Gill G A, Lehman R D, et al. Sediment Water Exchange of Total Mercury and Methylmercury in the San Francisco Bay Delta[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, (49): 1512-1527.
- [6] Azadeh Taghiania Hejazi, Basavarajappa H T, Karbassi A R, et al. Heavy Metal Pollution in Water and Sediments in the Kabini River, Karnataka [J]. *India. Environ Monit Assess.* 2011, (182): 1-13.
- [7] Allen H E, D J Hansen. The Importance of Trace Metal Speciation to Water Quality Criteria [J]. *Water Environment Research*, 1996, 68(1): 42-54.
- [8] Hicks, M B, Scott K J, Hansen, D. J, et al. Toxicity of Cadmium in Sediments: the Role of Acid Volatile Sulfide [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, 9(1): 1487-1502.
- [9] Kim Yeongkyoo, Kim Byoung Ki, Kim Kangjoo. Distribution and Speciation of Heavy Metals and Their Sources in Kumho River Sediment, Korea [J]. *Environ Earth Sci*, 2010, 60(5): 943-952.
- [10] Schacht U, Wallmann K, Kutterolf S, et al. Volcanogenic Sediment-Seawater Interactions and the Geochemistry of Pore Waters [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249(3-4): 321-338.
- [11] Haese R R, Hensen C, Lange G J. Pore Water Geochemistry of Eastern Mediterranean Mud Volcanoes: Implications for Fluid Transport and Fluid Origin [J]. *Marine Geology*, 2006, 225(1-4): 191-208.
- [12] 薛亚莉. 陕西省渭河流域水资源供需形势分析 [J]. *人民黄河*, 2009, (11): 56-57. (XUE Ya li. Supply and Demand Situation Analysis About Shaanxi Weihe River water [J]. *Yellow River*, 2009, (11): 56-57. (in Chinese))
- [13] 吴立凯. 陕西省渭河流域水质调查及监测措施 [J]. *陕西水利*, 2008, (4): 19-20. (WU Li kai. Water Quality Surveys and Monitoring Measures on Shaanxi Weihe River, Shaanxi Water Resources, 2008, (4): 19-20. (in Chinese))
- [14] 国家环境保护总局. 中华人民共和国地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) (SEPA. People's Republic of Surface Water Quality Standards. (GB 3838-2002) (in Chinese))
- [15] Lars Hakanson. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. a Sedimentological Approach. *Water Research*, 1980, (8): 975-1001.

(上接第37页)

- [3] 董晓萌, 罗凤娟, 郭满才, 等. 时间序列的自回归模型在杨凌地区降水量预报中的应用 [J]. *中国农学通报*, 2007, 23(11): 403-407. (DONG Xiaomeng, LUO Fengjuan, GUO Mancai et al. The Autoregressive Model of Time Sequence Apply to Rainfall Forecast in Yangling Area [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(11): 403-407. (in Chinese))
- [4] 许晓艳. 基于时间序列的浑河流域降水量预测模型 [J]. *水土保持应用技术*, 2011(12): 26-27. (XU Xiaoyan. Prediction of Precipitation Model of Hunhe River Based on Time Series [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2011, (12): 26-27. (in Chinese))
- [5] 刘杨, 徐淑琴, 董丽丽, 等. 时间序列模型在查哈阳农场降雨量预测中应用 [J]. *黑龙江水利科技*, 2012, 40(2): 5-7. (LIU Yang, XU Shuqin, DONG Lili, et al. Application of Time Series Model in Chahayang Farm in Rainfall Prediction [J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2012, 40(2): 5-7. (in Chinese))
- [6] Wang S, Feng J, Liu G. Application of Seasonal Time Series Model in the Precipitation Forecast [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3-4): 677-683.
- [7] 何书元. 应用时间序列分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004. (HE Shuyuan. Application of time series analysis [M]. Beijing. Peking University press, 2004. (in Chinese))
- [8] Sayemuzzaman M, Jha M. Seasonal and Annual Precipitation Time Series Trend Analysis in North Carolina [J]. *United States. Atmospheric Research*, 2014(137): 183-194.
- [9] Vilibic I, Leder N. Long-term Variations in the Mediterranean Sea level Calculated by Spectral Analysis [J]. *Oceanographic Literature Review*, 1997, 44(5): 422.