

DOI:CNKI:61-1390/S. 20111216. 1150. 023

网络出版时间:2011-12-16 11:50

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1150.023.html>

渭河中下游铬(VI)的分布及迁移规律

王玉强¹, 和留宪², 马耀光¹, 李宝琪¹, 李嘉楠¹, 咎伯阳¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 咸阳市地下水监测站, 陕西 咸阳 712000)

【摘要】 **【目的】**研究渭河中下游铬(VI)的分布及迁移转化规律。**【方法】**以铬(VI)含量为测定指标, 采用三点三线法, 于 2011-03 采集渭河中下游陕西段 13 个水文监测站附近的水样, 研究渭河河水中铬(VI)含量的分布规律; 此外, 采集了陕西段主要城市排污口污水及代表性断面的底泥, 研究污染源及泥沙吸附作用对渭河中下游河水中铬(VI)含量的影响, 并采用一维稳态水质模型模拟了渭河中下游铬(VI)的沿程迁移规律, 对水流自净能力进行了分析。**【结果】**从上游至下游, 渭河中下游陕西段河水中铬(VI)含量呈先增加后减少的趋势, 其中西安段代表断面河水中铬(VI)含量达到最大, 为 0.113 mg/L; 对渭河中下游陕西段各主要城市排污口污水中铬(VI)含量进行了测定, 结果表明, 各排污口污水对河水中铬(VI)含量有明显影响, 其污染明显超过了河流的纳污能力; 对虢镇桥—兴平西吴、天江人渡—新丰桥、树园—潼关吊桥 3 个河段水样和底泥中铬(VI)含量的测定结果表明, 泥沙对降低河水中的铬(VI)有积极的净化作用。**【结论】**渭河中下游陕西段大部分河段铬(VI)含量已超出《地表水环境质量标准》中对 V 类水质的要求, 应加强对铬(VI)污染的治理。

【关键词】 铬(VI); 泥沙吸附; 迁移规律; 衰减指数

【中图分类号】 X131.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)01-0129-06

Study on distribution of chromium(VI) and its migration characters in Shaanxi district in Weihe River

WANG Yu-qiang¹, HE Liu-xian², MA Yao-guang¹,

LI Bao-qi¹, LI Jia-nan¹, ZAN Bo-yang¹

(1 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Groundwater Monitoring Station of Xianyang, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: **【Objective】** Study on the distribution of chromium(VI) and its migration characters in Shaanxi district in Weihe river was conducted. **【Method】** Taking the chromium(VI) content as determining index, with the method of three point and three line, water samples from 13 hydrological stations near the middle and lower reaches of weihe river were collected to study the content of chromium(VI) distribution rule of weihe river in march 2011; In addition, the influence of pollution sources and absorption effect of sediment in middle and lower reaches of weihe river for the chrome(VI) content were researched. City sewage and drainage outlet and representative cross-section of the sediment in Shaanxi section were collected to simulate migration rule of the chromium(VI) along the riser chrome of the middle and lower reaches of weihe river by one-dimensional steady state water quality model, and to analyze the function of flow self-purification. **【Result】** The concentration of chromium(VI) in Shaanxi district from upstream to downstream

* [收稿日期] 2011-07-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879071)

[作者简介] 王玉强(1983—), 男, 山东平原人, 在读硕士, 主要从事农业水土环境利用与保护研究。E-mail: zsp666@163.com

[通信作者] 马耀光(1957—), 男, 陕西武功人, 教授, 硕士, 硕士生导师, 主要从事水资源与水环境保护研究。

E-mail: myg0609@yahoo.com.cn

in Weihe river increased first and then decreased. The concentration of chromium(VI) reached the maximum 0.113 mg/L in Xian district;The results showed that the distribution of concentration of chromium(VI) in Weihe river's three inlets including Guozhen bridge-Xingping Xiwu,Tianjiangrendu-Xinfeng bridge and Shuyuan-Suspension bridge of Tongguan was determined,and it was learned that sediment plays a positive role in reducing the concentration of chromium(VI).【Conclusion】The study shows that the pollution of chromium(VI) has gone beyond the the minimum requirements of the Surface Water Environment Quality Standards and provided the basis for governance.

Key words:chromium(VI);sediment absorption effect;migration character;attenuation index

渭河是黄河的第一大支流,承担着甘肃东部、宁夏南部及陕西中北部地区沿河城市的生产生活用水及排水的水域功能^[1]。随着流域经济的快速发展,水资源的过度开发和不合理利用、城镇化及无节制的排污行为已造成了渭河中下游水质的严重污染。

铬(VI)是水体污染的主要重金属之一,含铬工业废水、废渣的排放是铬(VI)污染的主要途径。有研究表明^[2],进入水系的铬(VI)主要在水体沉积物(包括悬浮物和底泥)中富集,并通过水与底质发生交换反应从而在液相与固相间迁移。铬(VI)可以被水生生物及植物吸收,经过食物链被生物体和人体吸收,对动物和人体造成直接和潜在的危害^[3]。铬(VI)毒性强,易被人体吸收并在体内蓄积而成为致癌物质。

雷凯等^[4]、翟雨翔等^[5]分别对渭河西安及咸阳段沉积物中重金属的含量、分布及形态规律进行了初步研究,但对渭河中下游河水铬(VI)分布规律涉及较少。渭河中下游枯水期是水体污染的敏感时期,水体对铬(VI)的承载力比较脆弱,能较好地反映出各种内在因素及外在因素对铬(VI)运移转化规律的影响。本试验以 2011-03 渭河中下游陕西段为研究河段,通过测定水体中的铬(VI)含量,分析渭河铬(VI)污染程度,并对其影响因素进行分析,旨在为渭河流域的水资源保护和水环境管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点

为了研究渭河中下游铬(VI)的分布和水质特征,2011-03 采用三点三线法采集渭河中下游干流的林家村、卧龙寺桥、虢镇桥、常兴桥、兴平、南营、咸阳铁桥、天江人渡、耿镇桥、新丰镇桥、沙王桥、树园、潼关吊桥等 13 个水文监测站附近的水样进行分析。对清姜河、宝鸡十八孔桥污水口、虢镇桥陈仓区生活污水排出口、蔡家坡渭河大桥以西工业排污口、兴

平、南营、咸阳渭城桥排污口、皂河、临潼区污水排出口、渭南渭北工业园排污口、渭南经济开发区排污口、沱河排污口、石堤河、罗敷河、柳叶河 15 个主要排污口进行控制监测,研究污染源对河水中铬(VI)含量的影响;同时,为了解泥沙吸附作用对水中铬(VI)含量变化的影响,在虢镇桥、新丰镇桥和潼关吊桥河段选取代表断面采取底泥样本,分析底泥中铬(VI)含量的变化。

1.2 样品的采集及预处理

1.2.1 水 样 使用水采样器采集水流上、中、下 3 个深度的水样混匀后,储存于水样瓶中,密封后置于 4℃冰箱中保存待测。

1.2.2 底 泥 使用直径为 10 cm 的塑料圆管制作成无扰动采样器,采集深度为 0~5 cm 的表层沉积物,将 3~5 个采样截面点的样品混合,每个采样点所采集的混合样总量不少于 2 000 g。采样过程中所有接触样品的工具材料均为聚乙烯制品,样品现场密封后带回实验室,剔除底泥样品中的石块、动植物残体,于阴凉处风干,用玛瑙研钵将土壤颗粒研碎后过孔径 0.15 mm 尼龙筛,密封后置于 4℃冰箱中保存待测。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 水样中铬(VI)含量的测定 取 1 000 mL 水样于烧杯中,用滤纸过滤后采用二苯碳酰二肼分光光度法测定铬(VI)含量^[6]。

1.3.2 底泥中铬(VI)含量的测定 取底泥样品 1.000 g 于离心管中,加入 10 mL 1 mol/L MgCl₂ (pH = 7.0),在 25℃恒温水浴振荡器中以 200 次/min 的速度不断振荡 1 h 后,4 000 r/min 离心 30 min,将上清液和沉淀物分离。在沉淀物中加入含 0.04 mol/L NH₂OH·HCl 的 HAc 溶液 20 mL,在 96℃的恒温箱中保持 3 h,4 000 r/min 离心 30 min,取上清液,采用二苯碳酰二肼分光光度法测定铬(VI)含量^[7]。

2 结果与分析

2.1 渭河中下游铬(VI)的分布

从图1可以看出,从上游至下游,渭河陕西段河

水中铬(VI)含量总体呈先增加后减少的变化趋势,西安段代表断面(天江人渡)的铬(VI)含量较高,达0.113 mg/L,超过了《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中对V类水质的要求。

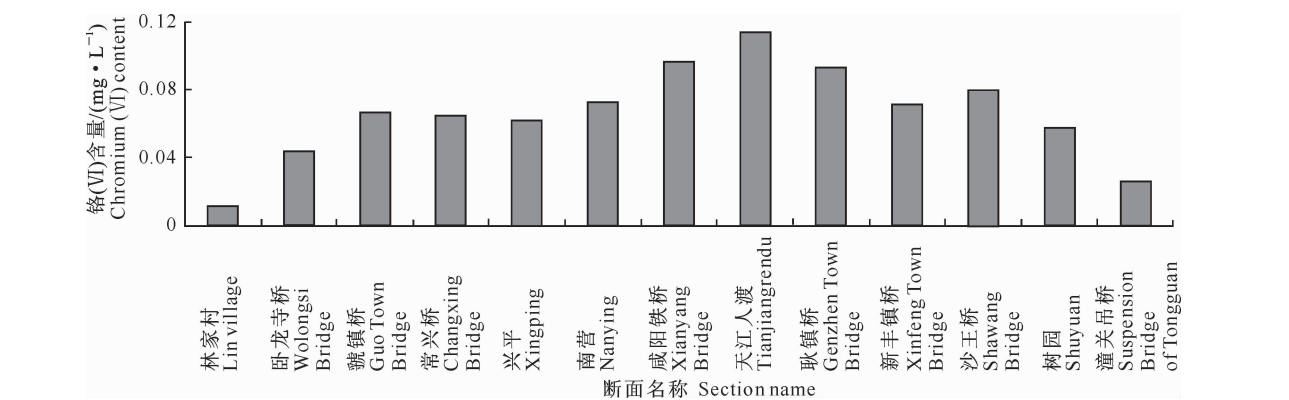


图1 渭河中下游13个水文监测站断面的铬(VI)含量

Fig.1 Chromium(VI) content of 13 hydrological stations in middle and lower reaches of Weihe river sections

2.2 不同因素对渭河中下游铬(VI)含量的影响

2.2.1 污染源 为了分析污染源对渭河中下游沿河段铬(VI)含量的影响,首先要对主要污染源的汇入进行详细调查。本研究选择渭河中下游陕西段各主要城市生活废水排入口及工业密集区排污口污水水质进行监控,测定铬(VI)含量,结果见表1。

表1 渭河中下游陕西段主要排污口
污水中的铬(VI)含量

Table 1 Chromium(VI) content along the main
sewage outfall of Weihe River

取样点 Sampling point	铬(VI)含量/ (mg·L ⁻¹) Chromium(VI) content
清姜河 Qingjiang River	0.044
宝鸡十八孔桥污水口 Eighteen Kong Bridge sewage outlet	0.076
虢镇桥陈仓区生活污水排出口 Guo Town Bridge life sewage outlet	3.8
蔡家坡渭河大桥以西工业排污口 Caijiapo Weihe Bridge sewage outlet	1.667
兴平 Xingping	0.04
南营 Nanying	0.146
咸阳渭城桥排污口 Xianyang Weicheng Bridge sewage outlet	4.428
皂河 Zao River	2.35
临潼区污水水排出口 Lintong sewage outlet	2.8
渭南渭北工业园排污口 Weinan Industrial sewage outlet	0.096
渭南经济开发区排污口 Weinan Economic Development Zone sewage outlet	0.067
沈河排污口 You River sewage outlet	0.125
石堤河 Shidi River	0.8
罗敷河 Luofu River	0.84
柳叶河 Liuye River	0.78

由表1可以看出,渭河中下游陕西段各排水出

口污水未经有效处理,其铬(VI)含量明显超过城镇污水排放标准 GB18918—2002 规定的铬(VI)含量(0.1 mg/L)。在15个监测点中,虢镇桥陈仓区生活污水排出口污水中的铬(VI)含量较高,达到3.8 mg/L,超过此段渭河铬(VI)含量的300倍;此外由于枯水期渭河水量小,导致了水中铬(VI)含量急剧增加。渭河虢镇桥至咸阳段因不断有新的污染源加入,导致铬(VI)含量居高不下,至咸阳渭城桥排污口,污水中铬(VI)含量达到了4.428 mg/L,进一步使渭河水质恶化,渭河西安段铬(VI)含量达到峰值(0.113 mg/L),超过了《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中对V类水质的要求,对人畜用水安全带来了严重影响。虽然渭南渭北工业园排污口、渭南经济开发区排污口、沈河排污口、石堤河、罗敷河、柳叶河排污口污水中铬(VI)含量有所减少,但河水中铬(VI)污染明显超过了河流的纳污能力,对整个渭河中下游的生态环境造成了严重影响和破坏。

水体纳污能力是流量、流速、地形等多种因素共同作用的结果,其大小与水功能区范围的大小、水环境要素的特性及水体净化能力、污染物的理化性质等有关。渭河流域地处于旱半干旱地区,常年少雨,根据1956—2000年水文资料分析,枯水期(11—翌年3月)的径流量仅占多年平均径流量的13%^[8]。因本研究选择了渭河枯水期,此时水流量小、流速低,导致水流的自净能力较低,加之大中城市污水的集中排放,从而造成渭河枯水期纳污能力大幅度降低,故该期渭河水中铬(VI)含量较高^[9-13]。

2.2.2 泥沙吸附作用 泥沙是河流水体的重要组成部分,在迁移过程中吸附一定的铬(VI)进入底层或下游,从而改变了水中铬(VI)含量的分布。渭河是以降水径流为主的河流,降水是引起流域水土流失的主要原因,降水量的多寡直接影响着地表径流量与输沙量的变化。为了进一步探讨泥沙吸附作用

对渭河中下游陕西段沿程铬(VI)含量的影响,选取虢镇桥—兴平、天江人渡—新丰镇桥和树园—潼关吊桥 3 个河段为研究对象,其中每个典型河段设 5~8 个取样断面,对水中和底泥中的铬(VI)含量变化进行监测,结果见图 2。

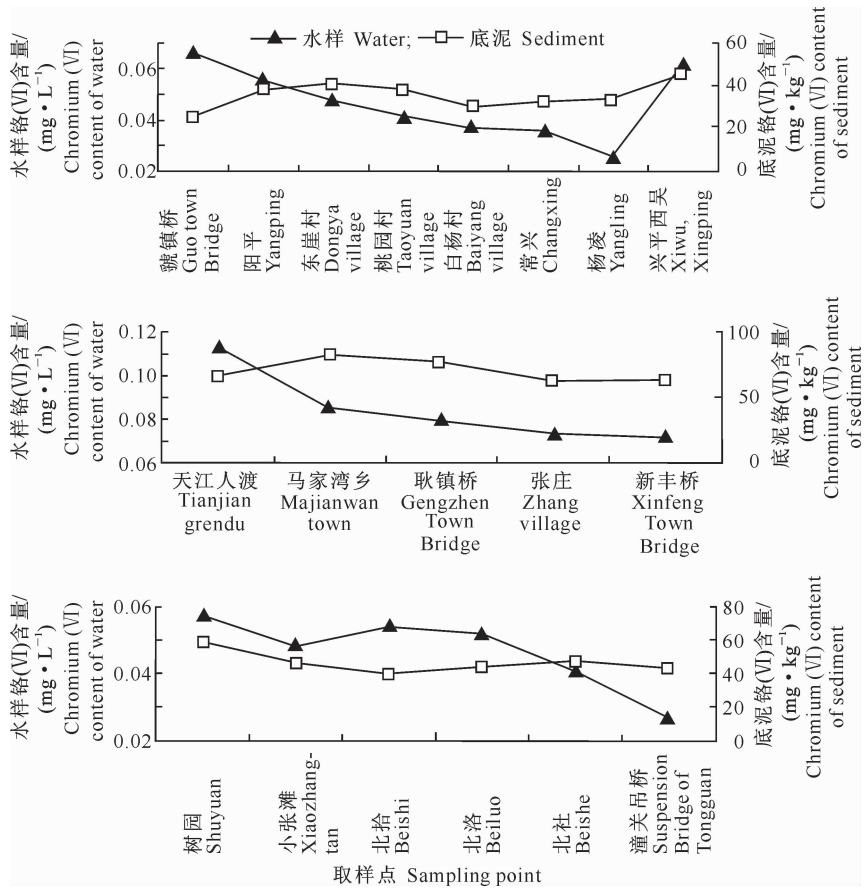


图 2 渭河 3 个代表河段水样和底泥中铬(VI)含量的变化

Fig. 2 Chromium (VI) content changes in Water and sediment of Weihe river three represents atives sections

由图 2 可以看出,虢镇桥至杨凌段水样中铬(VI)含量总体呈下降趋势,其中从虢镇桥至桃源村段,水样中铬(VI)含量下降较快;桃园村至常兴段,水样中铬(VI)含量下降趋势逐渐变缓;常兴—杨凌段水样中铬(VI)含量下降趋势明显,杨凌段铬(VI)含量最低,为 0.025 mg/L,比常兴低 0.011 mg/L。虢镇桥至东崖村段底泥中铬(VI)含量升高,说明此前河段泥沙吸附水中铬(VI)的过程存在延迟效应;随着水样中铬(VI)含量的降低,泥沙吸附铬(VI)的速率逐渐降低,泥沙吸附铬(VI)含量与水中铬(VI)含量达到相对平衡^[14],故东崖村至杨凌段,底泥中的铬(VI)含量变化不大;从杨凌至兴平西吴段,水样和底泥中铬(VI)含量明显增加,说明此河段有高浓度污水加入,泥沙吸附平衡遭到破坏,吸附作

用使底泥中的铬(VI)含量增加。

渭河天江人渡—新丰桥河段铬(VI)含量变化规律明显,其中水样中铬(VI)含量呈先快速下降然后缓慢降低的变化趋势,底泥中的铬(VI)含量呈先增加后降低的变化趋势。皂河是西安的纳污河流,大量生活污水和工业废水通过皂河排入渭河,从而导致天江人渡断面铬(VI)含量较高(0.113 mg/L),这是由于集中排污造成此河段河水中的铬(VI)含量急剧增加,同时由于泥沙的吸附作用,使得天江人渡底泥中铬(VI)含量也较高。随着泾河等支流汇入渭河引起泥沙和水量的不断增加,加之泥沙吸附作用不断持续,因而水中铬(VI)含量不断降低,至新丰桥断面,水样中铬(VI)含量下降至 0.041 mg/L,降幅达到 35.5%。从马家湾乡至新丰桥段,底泥中与水中

铬(VI)含量变化趋势一致,说明泥沙的吸附作用是影响水中铬(VI)含量的一个重要因素。

树园—潼关吊桥段水样中铬(VI)含量总体呈下降趋势,尤其是树园—小张滩段,水样中铬(VI)含量下降明显,此时底泥中的铬(VI)含量亦呈下降趋势,表明底泥与水中铬(VI)含量的变化趋势一致;小张滩—北拾段,水样中铬(VI)含量因污水排入明显升高,而底泥中铬(VI)含量持续降低,北拾—北社段,水样中铬(VI)含量持续降低,底泥中铬(VI)含量增加,反映出单一河段泥沙的吸附作用是水中铬(VI)含量明显降低的主要原因;北社—潼关吊桥段,水样中铬(VI)含量与底泥中铬(VI)含量恢复相对平衡关系,且同步下降。

渭河 3 月份降水量骤减,泥沙含量相对丰水期较高,其对水中铬(VI)含量的分布影响明显。此外,泥沙对铬(VI)的吸附作用受铬(VI)含量、水温、流速、流量及 pH 值等因素影响,所以不同河段泥沙对水中铬(VI)的吸附作用强度不同。由图 2 可以看出,天江人渡—新丰桥段泥沙的吸附作用明显高于虢镇—兴平西吴段和树园—潼关吊桥段,这很可能是由于下游河段流量和流速增大造成的。

除了污染源及泥沙的吸附作用外,渭河支流的稀释作用及其他化合物的还原作用,均对其中下游陕西段沿程铬(VI)含量有一定影响。虽然渭河中下游支流较多,除千河、泾河、洛河汇入水量较大外,其余支流汇入流量较小,加之 3 月份是渭河流域的枯水期,造成支流的汇入对渭河中铬(VI)含量的稀释效果不是很明显。此外,在 Fe^{2+} 、 S^{2-} 、有机酸、腐殖

酸及 H^{+} (溶液酸化)存在的条件下,铬(VI)可以发生还原反应,并且 pH 值越低,还原反应越快^[15-18]。渭河中下游陕西段河流 pH 值都在 7.0 以上,所以上化合物的还原作用并不明显。

2.3 渭河中下游铬(VI)含量的沿程衰减规律

渭河干流宝鸡—咸阳段河道相对顺直、稳定,污染物在较短的时间内均匀混合,可概化为单一河段,基本符合一维稳态水质模型的条件,故采用一维稳态水质模型^[19],模拟渭河中下游污染物沿河流纵向迁移的规律。按照一维稳态水质数学模型的要求,同时为了减少模型参数的误差,应选择河道顺直、无人挖沙干扰、河道不分叉、污染物排放口以下的河段为研究对象^[20-23]。通过对渭河干流宝鸡—咸阳段的河流污染调查(2011-03),选取虢镇总排污口、蔡家坡工业排污口、兴平总排污口和咸阳渭城桥排污口河段 4 个断面,以铬(VI)含量为水质指标,经计算得到的衰减指数 K 见表 2。衰减指数 K 是污染物浓度、泥沙吸附、流量、流速、地形等多种因素共同作用的结果, K 值越高,说明河流纳污能力越强。渭河干流宝鸡—咸阳段河道地形条件比较一致,但由于受河道采沙的影响,使得河道宽度和河底坡度受到一定影响。同时,由于干、支流水库的修建,使得研究河段的水流状态和河道流量变化较大,如虢镇断面流量小,蔡家坡、兴平、咸阳断面流量较大。由表 2 可以看出,渭河兴平段的衰减指数 K 最高,为 0.399/d,说明此河段水流的纳污能力较强;其余 3 个河段的衰减指数 K 均在 0.1/d 左右,对铬(VI)的纳污能力较差。

表 2 渭河宝鸡—咸阳段 4 个衰减断面的铬(VI)含量及衰减指数

Table 2 Concentration of Chromium(VI) and calculation results of degradation index in monitoring section

河段 Stream segment	衰减断面序号 Attenuation cross section	河长/km River length	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Flow	铬(VI)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Chromium(VI)	衰减指数/ ($1 \cdot \text{d}^{-1}$) Degradation index
虢镇总排污口 Guo Town sewage outlet	1	2	24.5	0.066	0.119
	2		24.5	0.052	
	3		24.5	0.040	
蔡家坡工业排污口 Caijiapo sewage outlet	1	2	28.0	0.058	0.105
	2		28.0	0.047	
	3		28.0	0.038	
兴平总排污口 Xingping sewage outlet	1	2	60.0	0.062	0.219
	2		60.0	0.040	
	3		60.0	0.018	
咸阳渭城桥排污口 Xianyang Weicheng Bridge sewage outlet	1	2	60.0	0.096	0.137
	2		60.0	0.073	

3 结 论

1)渭河中下游铬(VI)含量总体呈先增加后减小

的变化趋势,主要受污染源和泥沙吸附作用的影响,但影响程度不同。

2)渭河中下游水样和底泥中的铬(VI)含量明显

高于渭河入陕段,部分河段远远超出《地表水环境质量标准》中对Ⅴ类水质的要求,其主要原因是大量未经处理的生活和工业废水排入渭河,造成渭河的铬污染,且相关部门疏于管理所致。

3)污染源和泥沙吸附作用对渭河中下游陕西段河流中铬(Ⅵ)含量有明显影响,其中泥沙吸附作用对水中铬(Ⅵ)起到了积极的净化作用。

4)渭河中下游尤其是咸阳至潼关段的铬污染水平已严重超出河流的纳污能力。

综上所述,选取 3 月份研究渭河铬(Ⅵ)的迁移转化规律具有一定代表性,且渭河中下游铬(Ⅵ)污染严重,必须加强河流管理及对铬(Ⅵ)污染的治理。

[参考文献]

[1] 陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志第十三卷水利志 [M]. 西安:陕西省人民出版社,1999.
Shaanxi province water conservancy annals in thirteenth volumes [M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1999. (in Chinese)

[2] 陈静生. 沉积物重金属污染研究中的若干问题 [J]. 环境科学丛刊, 1983, 4(8): 1-2.
Chen J S. Several problems for that study on the pollution of heavy metals in the sediments [J]. Journal of Environmental Science, 1983, 4(8): 1-2. (in Chinese)

[3] Turkdoganm K, Icelf K, Kara K, et al. Heavymetals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2003, 13(3): 175-179.

[4] 雷凯, 卢新卫, 王利军, 等. 渭河(西安段)柱状沉积物中重金属的地球化学特征研究 [J]. 环境化学, 2008, 27(3): 389-390.
Lei K, Lu X W, Wang L J. Research on Weihe(Xi'an section) the heavy metal in the geochemical characteristics of columnar sediments [J]. Environmental Chemistry, 2008, 27(3): 389-390. (in Chinese)

[5] 翟雨翔, 卢新卫, 黄静, 等. 渭河(咸阳段)表层沉积物中重金属形态分布特征 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 146-148.
Zhai Y X, Lu X W, Hang J, et al. Distribution of heavy metal speciation in surface sediment of Weihe River at Xianyang section [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 146-148. (in Chinese)

[6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method [M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Publishing House, 2002. (in Chinese)

[7] 汪玉娟, 吕文英, 刘国光, 等. 河流底泥中六价铬释放规律初步研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(2): 792-794.
Wang Y J, Lü W Y, Liu G G, et al. Preliminary study on release

rule of Cr⁶⁺ from river sediments [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2009, 37(2): 792-794. (in Chinese)

[8] 陕西省水利厅. 陕西省渭河流域综合治理规划专题之水资源开发利用规划 [R]. 西安: 陕西省水利厅, 2002: 68.
Hall of Shaanxi Province Irrigation Works. Shaanxi Province Weihe watershed management planning of water resources development and utilization planning [R]. Xi'an: Hall of Shaanxi Province Irrigation Works, 2002: 68. (in Chinese)

[9] 陈亚萍, 康永祥. 渭河干流陕西段水体中 COD_{Mn}、NH₃-N 的时空变化特征 [J]. 水土保持通报, 2006, 26(4): 48-51.
Chen Y P, Kang Y X. Temporal and spatial characteristics of variation in COD_{Mn} and NH₃-N in Weihe River of Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(4): 48-51. (in Chinese)

[10] 王陆军, 廖晓芬. 渭河宝鸡段水环境质量综合评价分析 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(2): 220-223.
Wang L J, Liao X F. Weihe Baoji section of water environmental quality synthetical analysis [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2005, 35(2): 220-223. (in Chinese)

[11] 李孝廉, 杜兴黎, 王安林. 渭河干流(陕西段)水污染现状及控制对策研究 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 823-828.
Li X L, Du X L, Wang A L. Research on current water contamination and controlling strategy of Weihe River's main stream [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2008, 38(5): 823-828. (in Chinese)

[12] Eary I E, Raid. Chromate removal from aqueous wastes byreduction with ferrousion [J]. Environ Sci Technol, 1988, 22, 972-977.

[13] 王立军, 王同山. 土壤水介质中 Cr(Ⅲ)与 Cr(Ⅵ)形态的转化 [J]. 环境科学, 1982(3): 38-42.
Wang L J, Wang T S. Soil water medium Cr(Ⅲ) and Cr(Ⅵ) morphological transformation [J]. Environmental Science, 1982(3): 38-42. (in Chinese)

[14] 于瑞莲. Cr(Ⅵ)在泉州湾滩涂沉积物上的吸附特性 [J]. 华侨大学学报, 2006, 27(1): 47-49.
Yu R L. Sorption property of Cr(Ⅵ) on the tidal flat sediment of Quanzhou Bay [J]. Journal of Huaqiao University, 2006, 27(1): 47-49. (in Chinese)

[15] Bartlett R J, Kimble J M. Behavior of chromium in soils: Ⅱ. Hexavalent forms [J]. Environ Qual, 1976, 5: 383-386.

[16] Goodgame D M L, Hayman P B. Formation of watersoluble chromium(V) by the interaction of humic acid and the carcinogenic chromium(VI) [J]. Inorg Acta, 1984, 91: 113-115.

[17] Stollenwerk K G, Grove D B. Reduction of hexavalentchromium in water samples acidified for preservation [J]. Environ Qual, 1985, 14: 396-399.

[18] Mann H B. Non-parametric test against trend [J]. Economet Rika, 1945, 13: 245-259.