

陕西省不同生态类型区河流水质与径流泥沙间的关系

邓娟¹, 呼东峰², 上官周平¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省环境监测中心站, 西安 710054)

摘要:为反映陕西省地表水水质状况与水土流失间的关系,选取不同生态类型区的 3 条主要河流(渭河、延河和汉江)为研究对象,依据河流 27 断面水质监测资料,对延河流域 5 个断面、渭河流域 13 个断面、汉江流域 9 个断面的水质进行了评价,并从水体污染的角度分析了 3 条典型河流的污染源及其与径流泥沙的关系。结果表明:不同生态类型区河流水体水质呈现明显的时空变化特征,3 条典型河流 2001—2010 年水质改善明显,27 个监测断面中满足 I—III 类水质水体功能的断面由 11 个增加到 18 个,达标断面率为 66.7%,V 类水质断面 9 个,占 33.0%;不同生态类型区河流水质污染呈现较大的南北空间差异,位于秦岭以北的渭河干流污染严重,属重度污染,延河属轻度污染,位于秦岭以南的汉江水质为优;渭河氨氮浓度与年径流量呈显著负相关,径流量越大,氨氮浓度越低;延河河流径流与溶解氧(DO)浓度呈显著正相关,径流量越大,DO 浓度越高,水质越好;汉江年输沙量和高锰酸盐指数(COD_{MN})浓度呈显著正相关,输沙量越大,COD_{MN}越高,水质污染越严重。

关键词:河流水质; 污染因子; 径流泥沙; 陕西省

中图分类号:X824; X522; P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0110-06

Relationship Between River Water Quality and Runoff and Sediment in Different Ecological Type Areas of Shaanxi Province

DENG Juan¹, HU Dongfeng², SHANGGUAN Zhouping¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Environmental Monitoring Station, Xi'an 710054, China)

Abstract: For a more comprehensive and true reflection of the relationship between surface water quality and soil and water loss in Shaanxi Province, three main rivers, Weihe River, Yanhe River and Hanjiang River, were selected as the research objects. According to the water quality monitoring data of 27 river sections, the water quality of 5 sections of the Yanhe River Basin, 13 sections of the Weihe River Basin, 9 sections of the Hanjiang River Basin was systematically evaluated. In the view of water pollution, we analyze the relationship between the pollution sources and the runoff, sediment of three typical rivers. The main conclusions are as follows. The water quality of the three typical river water bodies showed obvious temporal and spatial characteristics. From 2001 to 2010, the quality of the three typical rivers improved significantly. From 2001 to 2010, the cross-sections of the 27 monitoring sections in I—III water quality increased from 11 to 18, the increasing proportion was 66.7%. water quality V was found in 9 monitoring sections, accounting for 33.0%. At the spatial scale, the pollution of the three typical rivers showed the significant difference from north to south. The Weihe River in the north of the Qinling Mountains was seriously contaminated; the Yanhe River was slightly contaminated and the water quality in Hanjiang River in the south of the Qinling Mountains has been excellent for ten years. There was a negative correlation between NH₃-N concentration and runoff volume in the Wei River, the greater the runoff, the lower the NH₃-N concentration. In the Yanhe River Basin, the DO concentration was a positive correlation with the annual runoff volume, the greater the runoff, the higher DO concentration. There was a positive correlation between the annual sediment load and the concentration of COD_{MN} in the Hanjiang River, the greater the amount of sediment transport, the higher the COD_{MN}, the more serious water pollution.

Keywords: water quality; pollution factor; runoff and sediment; Shaanxi Province

水污染是当今世界面临的严重环境问题之一。2016年全国地表水环境质量状况显示:中国7大水系中,除长江、珠江流域水质良好外,黄河、松花江、淮河流域为轻度污染,辽河流域为中度污染,海河流域为重度污染^[1]。径流和泥沙是河流水体污染物的主要载体,径流在运载可溶性污染物的同时,也通过泥沙载体运输吸附性污染物,而这些吸附性污染物是潜在的污染源^[2]。一般而言,径流量较大的水体自净能力较强,其河流水质较好;反之,水质较差,但同时也有研究表明降水冲刷地表物质经地表径流进入河流,也会引起河流中各种物质浓度的变化^[3-4]。因此,不同生态类型区河流水质与径流泥沙间的关系成为地质和生态学目前关注的学科热点。

对河流水环境和水质而言,河流泥沙不仅本身就是水体污染物,而且具有较大的比表面,含有大量活性官能团,在很大程度上决定着污染物在水体中的迁移、转化和生物效应等^[5]。泥沙的吸附作用及其对河流水流结构的影响,使得污染物在含沙河流水土中的扩散、迁移和转化呈现出与清水河流不同的规律^[6]。我国境内的河流多为高含沙水体,已有研究从河流泥沙基本特性^[7-8]、泥沙对污染物的吸附作用^[9-10]、泥沙对水质参数和污染评价的影响等^[11-12]多个方面探讨了河流水质与泥沙的关系。然而,针对不同生态类型区河流水质与径流泥沙间关系的对比研究目前仍然较少,亟待加强。

陕西地跨黄河、长江两大流域,境内的主要河流北有延河,南有汉江,中有渭水,但陕西省水资源十分缺乏,水资源总量为4 421.1亿m³,人均水资源占有量仅为全国人均占有量的1/2,世界人均占有量的1/8。近年来,城市化的加剧使水资源的供需矛盾日益突出,农业用水利用率低,水资源的浪费和水污染情况逐渐加剧^[13]。因此,本研究针对陕西省不同河流污染物、污染源特征,以明确不同生态类型区水质污染因子和原因,追溯其污染源,分析3条典型河流不同生态类型区水文环境、径流量与污染因子之间的关系,明确不同生态类型区区域环境对河流水质影响,为陕西省河流水质管理提供理论依据,对陕西省典型河流水质控制,对流域周边农业实现安全灌溉,保护农业环境,促进农产品安全生产,保障人体健康,维持陕西社会经济的可持续发展具有十分重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西位于我国中部偏东靠北,位于105°29'—

111°15'E,31°42'—39°35'N,总面积20.58万km²,约占全国总面积的2.1%。北山和秦岭把陕西分为三大自然区域:北部是陕北高原,中部是关中平原,南部是秦巴山地。陕西河流以秦岭为界,南属长江水系,北属黄河水系。长江流域约占全省面积的35%,河流含沙量小,水位季节变化小,主要支流有汉江,嘉陵江和丹江;黄河流域各河流含沙量大,水位季节性变化大,主要支流有延河、渭河、无定河等。

陕西省多年地表径流深212.5mm,多年平均径流量420亿m³,其中长江流域年平均径流量313亿m³,入境年平均水量71.6亿m³;黄河流域年平均径流量107亿m³,入境年平均水量47.4亿m³。根据陕西省的自然地域和实际情况,为较全面真实地反映其地表水水质状况,选取延河、渭河和汉江3条主要河流代表黄河、长江两大流域,从地域上分别代表陕北、关中、陕南3个自然区域地表水状况。本研究选取,2001—2010年,渭河13个监测断面、延河5个监测断面、汉江9个监测断面,共计27个监测断面,进行典型河流水质污染特征及污染源分析。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 水质监测 渭河中下游共设置13个水质检测质监控断面,延河流域共设置5个水质检测质监控断面,汉江共设置9个水质检测质监控断面,各检测质监控断面主要针对《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中的基本项目进行监测。选取2000—2010年各监测站点石油类、挥发酚、氨氮(NH₃-N)、溶解氧(DO)、5日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{MN})的监测数据进行分析研究。采用《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中的5类标准进行水质类别评价。

1.2.2 径流泥沙数据来源 本研究径流数据来自《中国河流泥沙公报》,延河(甘谷驿)、渭河(华县)和汉江(皇庄)。

1.3 数据分析

运用Excel 2007对数据进行整理后对水质进行综合评价。水质评价采用超标倍数法和模糊综合评价法^[14]。运用Excel 2007对3条河流径流量、输沙量、DO、NH₃-N、COD_{MN}、BOD₅、挥发酚、石油类污染物的关系进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 主要河流污染现状

2001—2010年,渭河13个监测断面、延河5个监测断面、汉江9个监测断面,共计27个监测断面,综合10年评价结果(表1),2001年满足功能断面占

40.7%，其中Ⅰ级水质标准的断面占 37.0%，超过国家Ⅲ类标准断面占 59.3%。2010 年满足功能断面占到 66.7%，其中Ⅰ级断面占到 48.0%，不达标断面降至 33.3%。2001—2010 年，断面达标率逐年攀升，说

明陕西省河流水质总体逐年改善。其中，长江水系第一大支流汉江流域水质持续优良，断面评价结果多为Ⅰ级水质；延河水质居中；渭河污染最为严重，断面评价多为Ⅴ类水质(图 1)。

表 1 2001—2010 年陕西 3 条河流水质状况变化

年份	断面 个数	断面类别					满足功能断面		不满足功能断面	
		I	II	III	IV	V	断面数/个	百分比/%	断面数/个	百分比/%
2001	27	10	1	0	3	13	11	40.7	16	59.3
2002	27	10	2	1	0	14	13	48.2	14	51.9
2003	27	11	1	0	1	2	12	44.4	15	55.6
2004	27	11	1	3	1	11	15	55.6	12	44.4
2005	27	11	0	5	0	11	15	55.6	12	44.4
2006	27	11	3	2	2	9	16	59.3	11	40.7
2007	27	12	1	4	1	9	17	63.0	10	37.0
2008	27	13	2	3	0	9	18	66.7	9	33.3
2009	27	11	5	2	0	9	18	66.7	9	33.3
2010	27	13	1	4	0	9	18	66.7	9	33.3

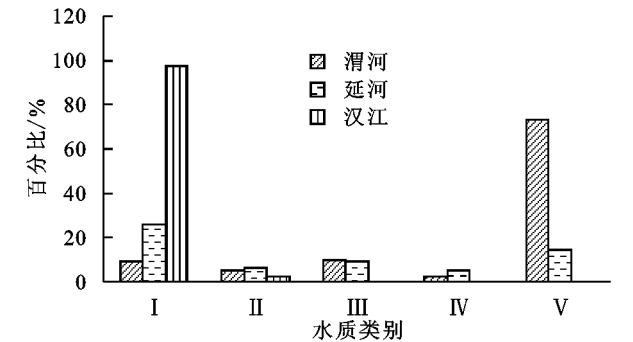


图 1 2001—2010 年 3 条河流监测断面水质类别

汉江流域在 10 年中 9 个监测断面达标率为 100%；延河 5 个监测断面随时间推移断面达标率逐年增加，2007 年以后达 100% 达标率，2007—2010 年，延河流域水体满足功能；而渭河流域水质改善于 2004 年后停滞不前，2001 年断面达标率 7.7%，2004 年增加到 30.8%，直至 2010 年，达标率仍持续为 30.77%，水质未见显著改善(图 2)。

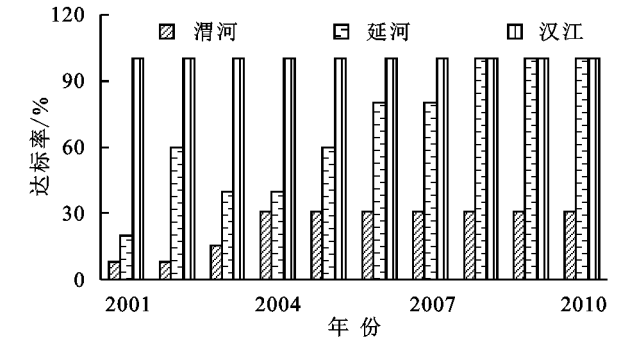


图 2 3 条河流监测断面达标率对比

2.2 水质污染特征对比

2.2.1 DO 监测评价 3 条河流断面的溶解氧监测评价结果表明(图 3)，汉江流域 DO 检出平均浓度>延河流域>渭河流域。渭河流域 DO 浓度最小值为

3.5 mg/L(2002 年)，污染评价为Ⅳ类。过去 10 年中，随着渭河污染控制力度加大，DO 浓度逐年攀升，2010 年 DO 平均浓度为 5.54 mg/L。延河流域 DO 浓度最小值为 2004 年 6.9 mg/L，2010 年延河 DO 浓度达 8.2 mg/L。汉江水质虽为 3 条河流中最好，DO 浓度在 3 条河流中虽为最高，但在过去 10 年中，波动走低，2010 年 DO 浓度为 7.68 mg/L，低于 10 年的平均值 8.19 mg/L。

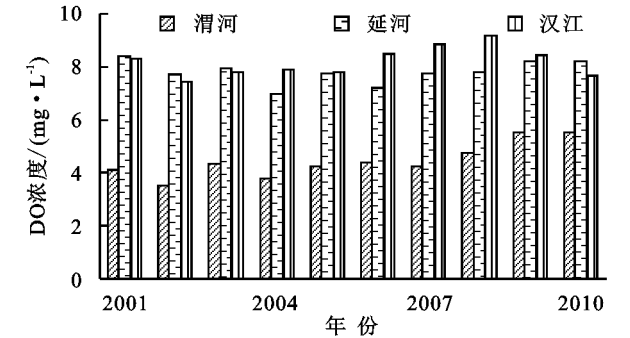


图 3 3 条河流 2001—2010 年 DO 监测评价结果对比

2.2.2 高锰酸盐指数(COD_{MN})指数监测评价 2001—2010 年，渭河 COD_{MN} 污染最为严重，其次为延河，汉江 COD_{MN} 检出浓度最低，水质最好(图 4)。2003 年渭河 COD_{MN} 年平均浓度为 10 年来最高，34.28 mg/L，超过国家Ⅲ类标准 4.7 倍，为严重污染，自 2003 年以后，渭河 COD_{MN} 浓度持续降低，到 2010 年平均浓度为 8.85 mg/L。汉江流域 COD_{MN} 浓度水平比较稳定，10 年间，COD_{MN} 检出平均值在 1.82~2.26 mg/L 内波动，水质持续优良。延河流域 10 年间，COD_{MN} 浓度年均值呈现略增加趋势，延河流域在 2010 年平均浓度为 5.06 mg/L，超过国家Ⅱ类标准。

2.2.3 生化需氧量(BOD₅)指数监测评价 2001—

2010 年 BOD₅ 浓度大小排序为:渭河>延河>汉江(图 5)。汉江 BOD₅ 污染物浓度最低,自 2001—2010 年,连续 10 年检出平均值在 1.13~1.97 mg/L 内波动,水质持续优良。延河在 10 年中仅有 3 年达到国家Ⅲ类标准,达标率仅为 30%,超过 70%的年度均超过国家Ⅲ类标准,其中 2001 年、2004 年 BOD₅ 浓度平均值分别为 7.52、7.78 mg/L,超过国家Ⅲ类标准 0.88 倍、0.95 倍,而且 10 年内未见明显降低趋势。渭河 BOD₅ 污染物浓度为 3 条河流中水质最差,污染最严重,2001—2004 年,BOD₅ 污染浓度持续增加,分别为 16.2、21.7、23.5、24.2 mg/L,超过国家Ⅲ类水质标准,污染评价为劣Ⅴ类,但自 2004 年以后,渭河 BOD₅ 浓度持续降低,到 2010 年平均浓度为 7.22 mg/L。

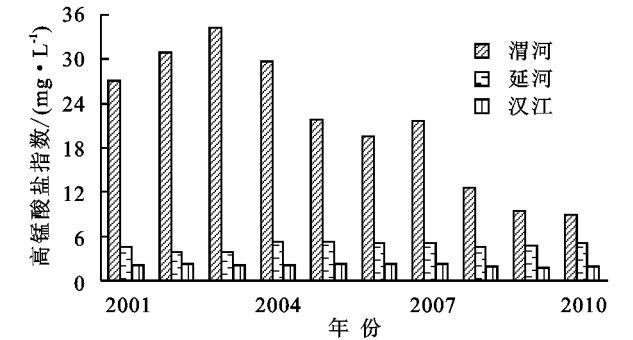


图 4 3 条河流 2001—2010 年 COD_{MN} 监测评价结果对比

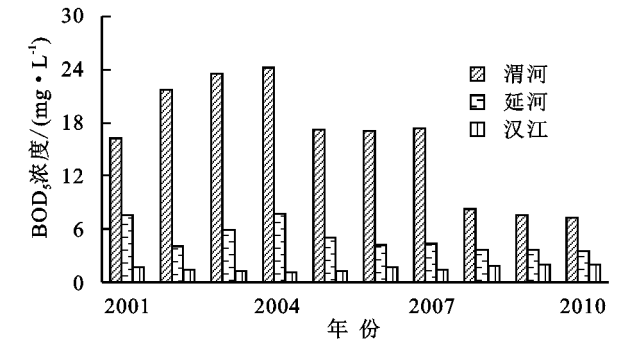


图 5 3 条河流 2001—2010 年 BOD₅ 浓度监测评价结果对比

2.2.4 氨氮(NH₃-N)监测评价 陕西省 3 条河流 27 个断面的监测数据表明,渭河氨氮浓度>延河氨氮浓度>汉江氨氮浓度(图 6)。渭河所有断面氨氮监测年平均浓度均超过国家Ⅳ类水质标准,2002 年氨氮平均浓度为 9.53 mg/L,超过国家Ⅲ类标准 8.53 倍,自 2001—2010 年,虽然水质持续改善,但氨氮污染因子评价仍为劣Ⅴ类,氨氮污染严重,未能满足水体功能。延河氨氮浓度 2001—2004 年持续增高,污染加重,2006—2010 年,氨氮污染得到有效控制,氨氮检出污染浓度均达到国家Ⅱ类标准。汉江流域 10 a 检出平均值在 0.26~0.49 mg/L 内波动,持续稳定优良。

2.2.5 石油类污染物浓度监测评价 石油类的监测数据表明,渭河>延河>汉江石油类年平均浓度(图

7)。渭河 2001—2003 年石油类污染物浓度自 1.0 mg/L 增加至 2.59 mg/L,自 2003 年以后逐年减少,但截至 2010 年,石油类污染物浓度仍高于国家Ⅲ类标准。延河 2001 年石油类污染物检出平均浓度为 1.26 mg/L,超过国家Ⅲ类标准 24.2 倍,2002 年以后水质持续改善,但至 2010 年,石油类污染仍未达标,水体污染严重。汉江流域 2002 年石油类污染物年均浓度为 0.06 mg/L,超过国家Ⅲ类标准 0.2 倍,其余年份年检出平均值在 0.02~0.05 mg/L 内波动,持续稳定优良。

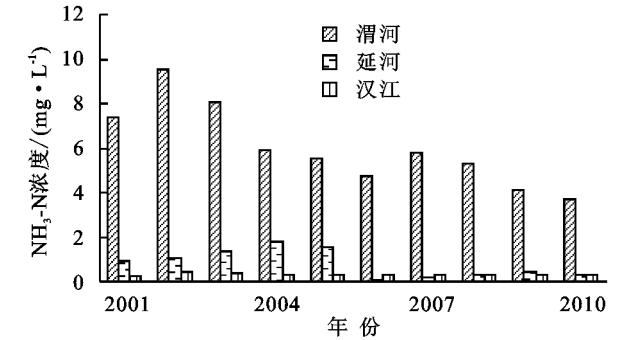


图 6 3 条河流 2001—2010 年 NH₃-N 浓度监测评价结果对比

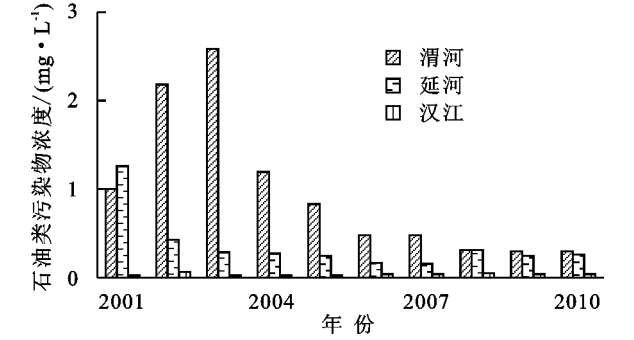


图 7 3 条河流 2001—2010 年石油类污染浓度监测评价结果对比

2.2.6 挥发酚浓度监测评价 2001—2010 年,挥发酚多年均浓度为渭河>延河>汉江(图 8)。延河流域和汉江流域挥发酚污染物浓度自 2001—2010 年,连续 10 年在 0.001~0.004 mg/L 内波动,均未超过国家Ⅲ类标准。渭河流域挥发酚污染比较突出,10 年最小检出年均值为 2010 年 0.01 mg/L,超标 1 倍,最大检出年均值为 2004 年 0.043 mg/L,超过国家Ⅲ类水质标准 7.6 倍,挥发酚严重污染。

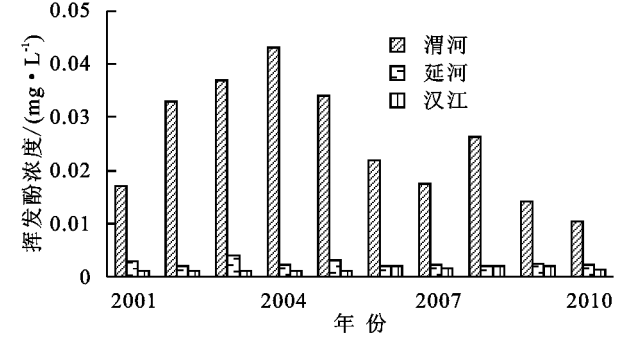


图 8 3 条河流 2001—2010 年挥发酚污染浓度监测评价结果对比

2.3 水质污染原因分析

2.3.1 水质与水文环境 随着径流量增大,水体的稀释能力和自净能力就会增强,水体污染程度也就相对减弱。长江流域约占全省面积的 35%,水资源量占到全省总量的 71%,汉江源于秦岭西段南坡,从白河县向东流出省境,省内全长 652 km,省内流域面积 54 783 km²,河流含沙量小,水位季节变化小,河道的生态水量充足,水质较好。3 条河流中,汉江径流量最大,输沙量最小,为汉江水体稀释能力和自净能力提供了保障。同时,汉江沿途得到长江水系支流径流补给较多,降雨量补给在 3 条河流中最大,充足的生态水量极大保障了汉江水质。

黄河流域各河流含沙量大,水位季节性变化大。黄河流经陕、晋边界,沿途多峡谷。主要支流有渭河、无定河、延河和北洛河。渭河发源于甘肃省渭源县乌鼠山,至潼关港入黄河,干流全长 818 km,流域面积 134 766 km²,流域多年平均降水量 610.4 mm,而多年水面蒸发

量却高达 700~1 200 mm 流域自产水资源总量 69.92 亿 m³,渭河流域泥沙输出量为 3 条河流中最高,远高于其余两条河流(图 9),渭河严重缺乏的生态水量,加上泥沙夹带着水土流失中的面源污染物进入水体,污染河流水质。渭河流域的农业产值占陕西农业总产值的 50%,渭河的主体功能是农业灌溉。农业污水主要来源于高残留毒害性农药的应用、化肥使用不当而导致利用率低下以及禽畜养殖粪便随意排放 3 个方面。陕西是个水土流失严重的省份,进入土壤后的农药大部分随地表径流进入江河,飘浮在空中的农药随降雨、地表径流进入河流,最终汇入渭河。

延河全长 284.3 km,流域面积 7 687 km²,多年平均流量 8.56 m³/s,多年平均径流量 27 013 万 m³。径流的年内分配很不均匀,主要是受降雨的影响,延河降雨量在 3 条河流中年均值最小,同时,延河流域得到降雨径流补给极小,造成延河河道生态水量严重缺乏,水体自净功能较差。

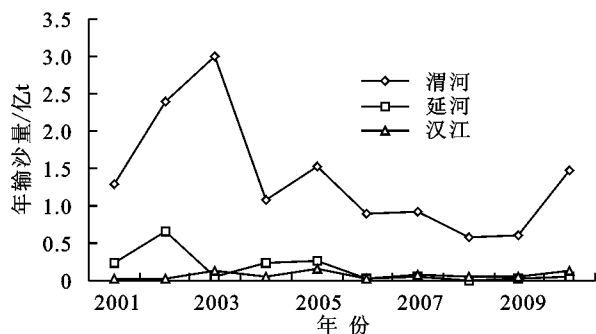
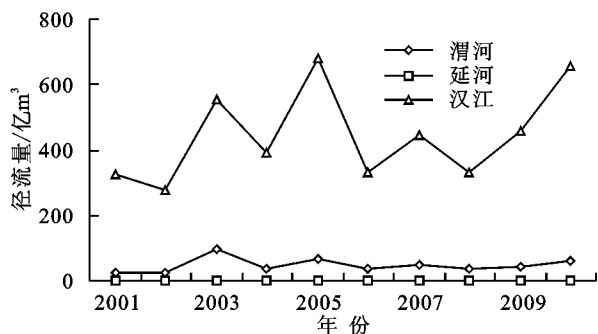


图 9 3 条河流 2001—2010 年水环境

2.3.2 水质污染与泥沙量径流量的关系 随着径流量增大,水体的稀释能力和自净能力就会增强,水体污染程度也就相对减弱。为了进一步研究渭河、延河、汉江流域水污染与其径流量的关系,本文采用相关分析法对河流径流量、输沙量、DO、COD_{MN}、

NH₃-N、BOD₅、挥发酚、石油类污染物的关系进行分析,结果见图 10。渭河流域 DO 浓度与径流量呈现正相关趋势,与输沙量呈正相关趋势,但相关性并不显著,氨氮浓度与年径流量呈显著负相关,径流量越大,氨氮浓度越低。

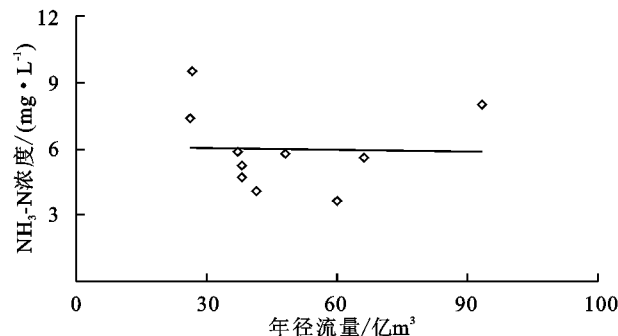
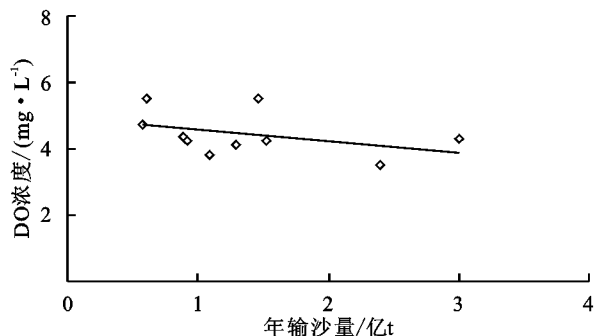


图 10 渭河流域径流量和泥沙量和水质污染关系

延河河流径流与 DO 浓度呈显著正相关,径流量越大,DO 浓度越高,水质越好,相关系数表明输沙量与 DO 浓度呈负相关趋势,但相关性不显著;延河流域挥发酚浓度与年径流量呈显著负相关,输沙量与挥发酚浓度呈正相关趋势,但正相关关系并不显

著。汉江径流与 COD_{MN} 浓度呈负相关趋势,但相关性指数不明显,年输沙量和 COD_{MN} 浓度呈显著正相关,输沙量越大,COD_{MN} 指数越高,水质污染越严重;输沙量与挥发酚浓度呈正相关趋势,但正相关关系并不显著。

3 结 论

2001—2010 年期间陕西省水质污染程度呈减轻趋势,3 条河流优良水质比例呈上升趋势,27 个断面中Ⅰ—Ⅲ类水质断面比例由 2001 年的 40.7%上升为 2010 年的 66.7%,尤其是在 2003—2008 年这种上升趋势更为明显,3 条河流污染状况从大到小排列次序是:渭河>延河>汉江。延河水质一直保持轻度污染,以Ⅳ类水质为主,但污染因子浓度总体有加重趋势;汉江水质一直保持优良,污染因子浓度总体有加重趋势。

随着径流量增大,水体的稀释能力和自净能力增强,水体污染程度也就相对减弱。对 3 条河流污染因子与径流输沙量回归分析表明,渭河流域 DO 浓度与径流量呈现正相关趋势,氨氮浓度与年径流量呈显著负相关,径流量越大,氨氮浓度越低。延河流域径流与 DO 浓度呈显著正相关,径流量越大,DO 浓度越高,水质越好;延河流域挥发酚浓度与年径流量呈显著负相关,输沙量与挥发酚浓度呈正相关趋势,但正相关关系并不显著。汉江径流与 COD_{MN} 浓度呈负相关趋势,但相关性指数不明显,年输沙量和 COD_{MN} 浓度呈显著正相关,输沙量越大,COD_{MN} 指数越高,水质污染越严重;年径流量与 BOD₅ 浓度呈显著负相关,径流量越大,BOD₅ 浓度越低,水质越好;输沙量与挥发酚浓度呈正相关趋势,但正相关关系并不显著。

参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部发布 2016 年上半年全国空气和地表水环境质量状况[EB/OL]. (2016-07-17)[2017-01-31]. [http:// www. zhb. gov. cn/](http://www.zhb.gov.cn/)

[gkml/hbb/qt/201607/t20160717_360820. htm](http://gkml/hbb/qt/201607/t20160717_360820.htm).
[2] 王小云. 流域环境泥沙氮、磷平衡吸附与饮用水源地水质评价[D]. 杭州:浙江大学,2012.
[3] Kirchner J, Feng X, Neal C. Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments[J]. Nature, 2000,403(6769):524-527.
[4] Chaubey I, Haan C T, Salisbury J, et al. Quantifying model output uncertainty due to spatial variability of rainfall[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999,35(5):1113-1123.
[5] 孙剑辉,柴艳,王国良,等. 黄河泥沙对水质的影响研究进展[J]. 泥沙研究,2010(1):72-80.
[6] 王有乐,张建奎,孙苑菡,等. 黄河兰州市区段泥沙特性及水质预测研究[J]. 甘肃科技,2006,22(7):69-71.
[7] 胡国华,赵沛伦,肖翔群. 黄河泥沙特性及对水环境的影响[J]. 水利水电技术,2004,35(8):17-20.
[8] 陈静生,洪松,王立新,等. 中国东部河流颗粒物的地球化学性质[J]. 地理学报,2000,55(4):417-427.
[9] 郭长城,喻国华,王国祥. 河流泥沙对污染河水中污染物的吸附特性研究[J]. 生态环境,2006,15(6):1151-1155.
[10] 应一梅,许春红,李海华,等. 黄河泥沙吸附砷污染物室内静态试验[J]. 环境科学研究,2012,25(3):352-356.
[11] 陈静生,张宇,于涛,等. 泥沙对黄河水质参数 COD、高锰酸钾指数和 BOD₅ 的影响[J]. 环境科学学报,2004,24(3):1-7.
[12] 夏星辉,王然,孟丽红. 黄河耗氧性有机物污染特征及泥沙对其参数测定的影响[J]. 环境科学学报,2004,24(6):969-974.
[13] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[R]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
[14] 谢记坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2000.

(上接第 109 页)

[18] 周祥,赵一鹤,张洪江,等. 云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J]. 生态环境学报,2011,20(2):248-252.
[19] 饶良懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
[20] 张峰,彭祚登,安永兴,等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. 林业科学,2010,46(10):6-14.
[21] 姜海燕,赵雨森,陈祥伟,等. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):149-153.
[22] 张伟,杨新兵,张汝松,等. 冀北山地不同林分枯落物及

土壤的水源涵养功能评价[J]. 水土保持通报,2011,31(3):208-212.
[23] 陈倩,周志立,史琛媛,等. 河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J]. 水土保持学报,2015,29(5):206-211.
[24] 魏文俊,尤文忠,赵刚,等. 退化柞蚕林封育对枯落物和表层土壤持水效能的影响[J]. 生态学报,2016,36(3):721-728.
[25] 尤海舟,毕君,宋熙龙,等. 间伐抚育对小五台山华北落叶松林下枯落物持水特性的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(3):63-67,225.