

汉江上游金水河流域水电工程对流域水环境的影响

卜红梅¹, 张全发², 王伟波²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过监测和实地调查, 分析了汉江上游金水河流域水电工程对流域水环境的影响。结果表明: ①电导率(EC)、总溶解性固体(TDS)、五日生化需氧量(BOD_5)、重碳酸盐(HCO_3^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、总硬度(T-Hard)、溶解性金属元素Si、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)、总溶解性磷(TDP)的监测值季节性变化不显著; ②化学需氧量(COD_{Mn})、溶解性重金属元素Cr和As、营养物质 PO_4^{3-} -P和TDP的含量在不同采样时期均不同程度的超标; ③作为控制河流水化学特征的重要因素, 水温(Temp)、pH值与溶解氧(DO)分别与水环境中EC、TDS、 COD_{Mn} 、 HCO_3^- 、氯化物(Cl^-)、硝酸盐(NO_3^-)、氟化物(F^-)、As、Cr、Si、氨氮(NH_4^+ -N)、硝酸盐氮(NO_3^- -N)和 PO_4^{3-} -P的监测值呈显著的线性相关。已建成的水电工程在一定程度上破坏了流域的连续性, 减少了水体纳污能力, 降低了河流水质。因此, 在研究的基础上, 提出解决水电开发与环境保护之间矛盾的合理建议, 为汉江上游的流域生态系统管理提供依据。

关键词: 河流水质; 水质分析; 水环境; 水电工程; 金水河流域

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0035-07

Impact of hydropower project on water environment of Jinshui river basin in upper reaches of Hanjiang River

BU Hongmei¹, ZHANG Quanfa², WANG Weibo²

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, C A S, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, C A S, Wuhan, 430074, China)

Abstract: Through monitoring and field survey, the paper analyzed impact of hydropower project on water environment of Jinshui River basin in the upper reaches of Hanjiang River. The results indicated that ①the variations of monitoring value of electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), five day biological oxygen demand (BOD_5), bicarbonate (HCO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), total hardness (T-Hard), dissolved Si, orthophosphate (PO_4^{3-} -P) and total dissolved phosphorus (TDP) are not significant on season. ②The values of chemical oxygen demand (Mn) (COD_{Mn}), dissolved Cr and As, nutrient matters of PO_4^{3-} -P and TDP have exceeded the guidelines in different sampling periods and extents. ③As the main factors of controlling the hydrochemical characteristics of the river, the monitoring values of water temperature (Temp), pH, and dissolved oxygen (DO) are linearly correlated with EC, TDS, COD_{Mn} , HCO_3^- , chloride (Cl^-), nitrate (NO_3^-), fluoride (F^-), As, Cr, Si, ammonical nitrogen (NH_4^+ -N), nitrate nitrogen (NO_3^- -N) and PO_4^{3-} -P present significant linear correlation respectively. The completed hydropower projects damaged the continuity of watershed to a certain extent and reduced the capacity of pollutant carrying of water body and deteriorated the water quality of river. Accordingly, the paper put forward some reasonable suggestion so as to resolve the conflicts between hydropower development and environmental protection, which can provide the basis for watershed ecosystem management of the upstream of HanJiang river.

Key words: water quality of river; water quality analysis; water environment; hydropower project; Jinshui river basin

陕南地区缺少煤炭资源, 近年来为了缓解陕南地区的电力“瓶颈”制约, 促进城乡经济发展, 改变山区

农村落后的面貌, 政府部门大力提倡农村水电工程建设。然而, 大规模的水利水电开发在带来经济和社会

效益的同时,也对周围的生态环境产生了许多负面影响^[1-3],如:破坏了流域的连续性^[4-5],使自然河流转变为半天然河流或人工控制的河流,改变河流水文效应^[6],导致水质恶化、生物多样性减少^[7]等,严重影响河道及沿岸的生态与环境^[8]。为了保护生态环境,国内外很多学者针对水电开发的各种影响分别做了深入探讨,包括大坝建设对河流生物化学和生态系统结构的影响^[1],水电开发对景观的影响^[9]、水电开发对河流生态系统服务功能的影响^[2,10]以及水电开发的环境影响损益分析^[11-12]等。这些深入的研究为水电开发决策提供了参考。

本文以汉江上游金水河流域的水电开发为例,通过监测和实地考察,分析水电工程对流域水环境的影响,特别是对河流水质的影响,从而为汉江上游的流域管理和环境保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金水河流域地处东经 107°40′~108°10′,北纬 33°16′~33°45′,行政区划上位于陕西省佛坪县和洋县境内。金水河是我国南水北调中线工程的重要水源地汉江的一级支流,发源于陕西秦岭南坡的佛坪国家自然保护区,流域面积 730 km²,河道全长 87 km,天然落差 2 590 m,平均比降 33.6‰,较大的支流主要有西河、新店子河、东河和吕关河(图 1)。该流域属于北亚热带山地暖温带湿润季风气候区,多年平均气温 11.5~14.5℃,降水量多集中在夏季,多年平均值在 900~1 244 mm 之间。金水河属于季节性河流,河流总径流的 80% 由降水产流直接补给,平均流量 8.60 m³/s,年平均径流量 2.7 亿 m³,水力资源理论蕴藏量 6.93 万 kW,可开发装机容量 2.49 万 kW。目前,金水河流域已建成的碗牛坝电站和金水街电站,均为低坝引水式水电站,总装机容量为 7 500 kW(表 1);正在建的沙梁子、西华、女儿坝、碾子坪和大古坪 5 个梯级电站,总装机容量为 2.53 万 kW,预计年发电量 1.16 亿度。

1.2 采样及分析方法

金水河属于季节性河流,因此采样时间分别按照枯水期(Mar-2008)、丰水期(Aug-2008)和平水期(Nov-2008)进行。依据《中华人民共和国行业标准-水环境监测规范》(SL219-98)中关于采样点的确定原则^[13],本次研究目的,确定了 4 处采样点(图 1):碗牛坝电站大坝上游(D1)、碗牛坝电站大坝下游(D2)、金水街电站大坝上游(D3)、金水街

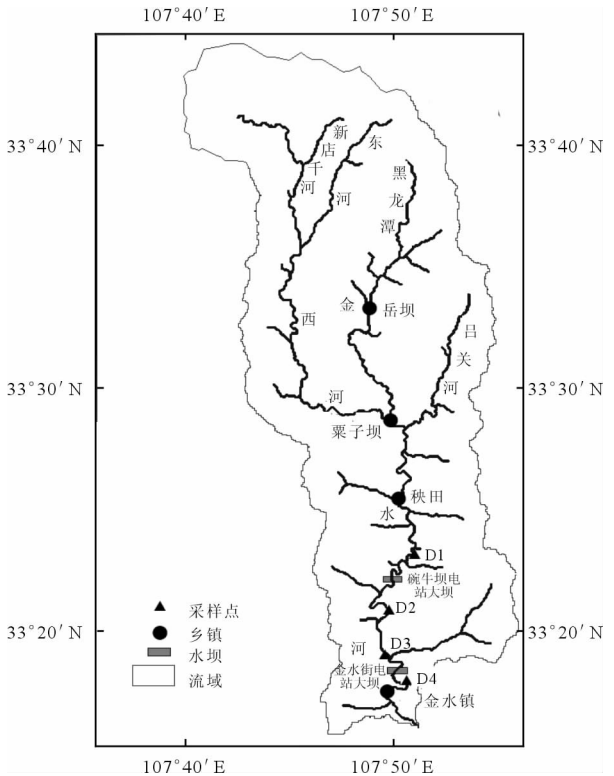


图 1 金水河流域地理位置及采样点分布图

表 1 金水河流域已建水电站 kW, m, m ³ /s						
名称	建站时间	装机容量	设计水头	坝高	坝长	进水量
碗牛坝电站	1998 年	3750	80.0	9.6	96	5.73
金水街电站	1999 年	3750	56.5	23.0	130	9.40
合计		7500	136.5	32.6	226	15.13

电站大坝下游(D4)。到 2008 年底,本次研究共完成了 3 次采样的实验室分析和数据整理工作。

采用 YSI 6920 型水质测定仪(YSI Incorporated, Yellow Springs, Ohio, USA)现场测定水温(Temp)、pH 值、电导(EC)、总溶解性固体(TDS)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₄⁺-N)和硝酸盐氮(NO₃⁻-N)7 个指标。每次采样之前仪器均经过校正。另外,在采样现场采用滴定方法测定重碳酸盐(HCO₃⁻)^[14]。

根据测定指标的不同,并依据《水和废水监测分析方法》^[14],水样在采样现场分别进行预处理,预处理后的样品带回实验室冷藏并尽快进行分析。采用标准测定方法^[14],在实验室内分别测定五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总硬度(T-Hard)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P)和总溶解性磷(TDP)5 个指标。采用 DX-120 型离子色谱仪(DIONEX, USA)测定硫酸根离子(SO₄²⁻)、氯离子(Cl⁻)、氟离子(F⁻)和硝酸根离子(NO₃⁻),检测限分别为 0.10、0.04、0.02 和 0.10 mg/L。采用电感耦合等离

子体发射光谱仪(ICP - AES, USA)测定溶解性微量元素 As、Cr、Sr 和 Si 的含量。用标准物质(SRM, SPEX CertiPrep, Inc, USA)对测定方法的准确度进行验证,结果表明数据分析质量可靠,回收率在 103%(As)~105.44%(Si)之间。

为了减小误差,以上样品均重复测定 3 次,取其平均值。数据处理和分析应用统计软件 SPSS 13.0

和办公软件 EXCEL 2003 完成。

2 监测结果及分析

2.1 水质时空变化

碗牛坝电站大坝和金水街电站大坝上、下游不同时期的水质监测结果如图 2 所示。

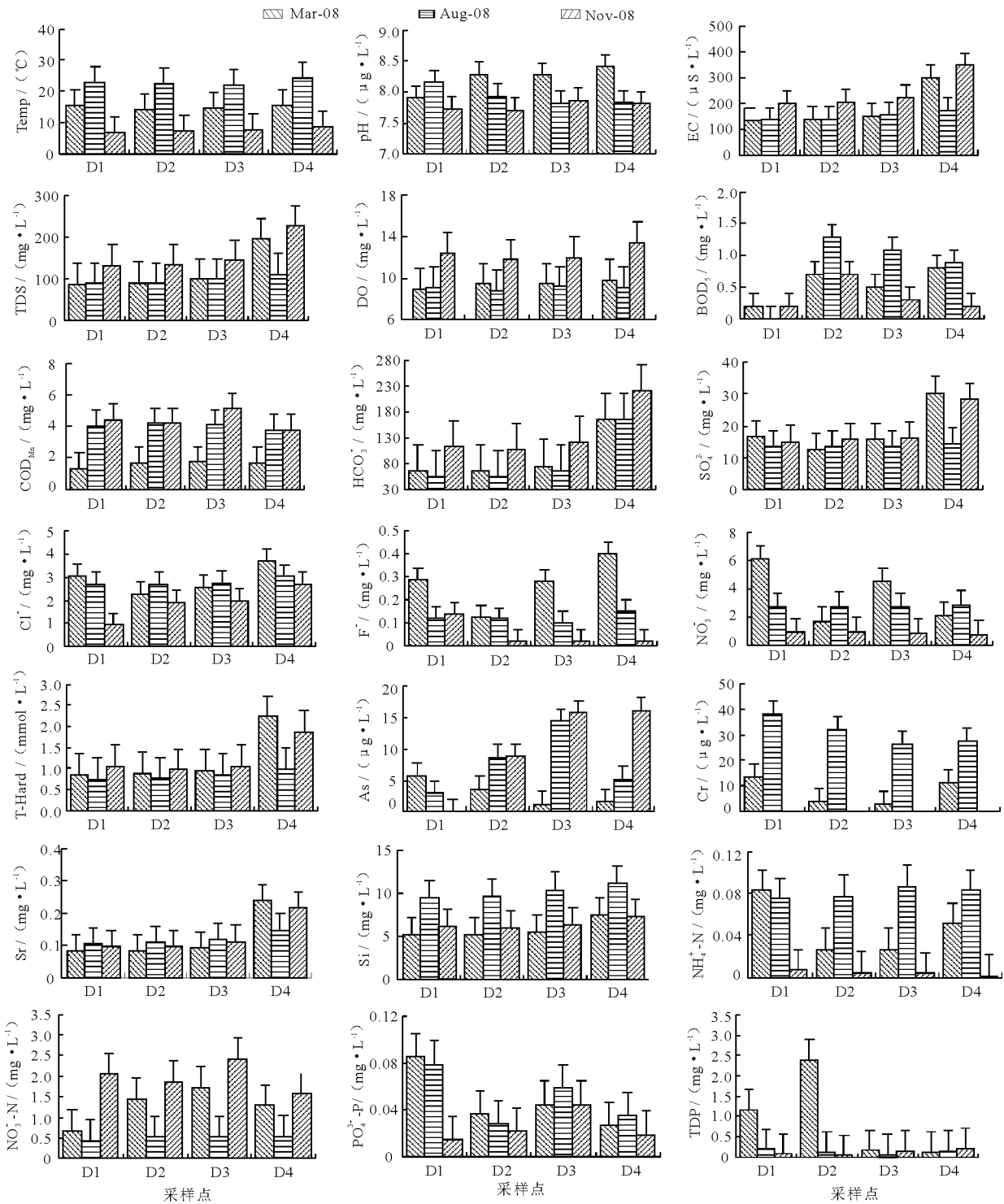


图 2 金水河流域水电站坝区上、下游不同采样点不同时期的水质监测结果(空缺值为未检出)

监测结果表明:

(1) 在枯水期, pH、EC、TDS、DO、 HCO_3^- 、T-Hard、Si 和 Sr 的测定值在 D1 ~ D4 采样点中从上游到下游依次增加, 并在金水街电站大坝下游(D4)获得最大值; Temp、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ -N、As 和 Cr 的测定值依次呈现先减小后增大的趋势, Temp、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 F^- 的最大值出现在采样点 D4, 而 NO_3^- 、 NH_4^+ -N、As 和 Cr 的最大值出现在碗牛坝电站大坝上游(D1); BOD_5 的含量值在两个水坝下游表现为增加趋势, 其最大值出现在 D4, 为 0.79 mg/L; 在 4 个采样点中, NO_3^- -N 和 COD_{Mn} 表现出相同的变化趋势, 其最大值均出现在金水街电站大坝上游(D3); 而 PO_4^{3-} -P 在 D1 点的含量最大, 随后从上游到下游依次减少; TDP 的最大值出现在碗牛坝电站大坝下游(D2)。

(2) 在丰水期, EC、TDS、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、T-Hard、Si、Sr 和 NO_3^- -N 的含量从上游到下游依次增加, 同时在 D4 点出现最大值; Temp、pH、 SO_4^{2-} 、Cr、 F^- 、TDP 在 4 个采样点中均呈现先减小、后在 D4 点增加的变化趋势; BOD_5 和 COD_{Mn} 均表现出在 D2 出现最大值、随后减少的趋势; DO 与 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N 与 As 在 4 个采样点中分别呈现相似的变化趋势; 而 NO_3^- -N 在水坝下游地区的含量(D2 和 D4)相对较高。

(3) 在平水期, Temp、EC、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、As 和 Sr 在 4 个采样点中从上游到下游依次增加; pH、DO、 HCO_3^- 、T-Hard、TDP 和 Si 均呈现相同的变化趋势; NH_4^+ -N 从采样点 D1 到 D4 依次减少; NO_3^- -N、 COD_{Mn} 、 PO_4^{3-} -P 均在 D3 点的值最大; BOD_5 和 NO_3^- 同时在 D2 获得最大值; F^- 的离子含量在 D1 点值最大; 而 Cr 在这一时期均未检出。单变量方差分析^[15]显示, 不同时期 4 个采样点 21 个水质监测指标中 Temp、DO、 COD_{Mn} 、 F^- 、Cr、Si、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N ($p < 0.01$) 及 pH、 Cl^- 、 NO_3^- 、As ($p < 0.05$) 的季节性变化显著, 其余变量变化不显著。水质的空间变化中, 除 HCO_3^- 、Sr ($p < 0.01$) 和 T-Hard ($p < 0.05$) 外, 其余变量空间变化均不显著。

2.2 含量分析

作为南水北调水源区和汉江的源头, 监测地区的水质应符合国家饮用水卫生标准 (GB 5749-2006)^[16] 和国家地表水环境质量标准 (GB 3838-2002)^[17] 中的 I 类水质标准。监测结果表明 (图 2): 监测地区的 Temp、pH、TDS、DO、 BOD_5 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_3^- 、T-Hard 和 NH_4^+ -N 均符合上述两个

标准。各个采样点 COD_{Mn} 的监测值在丰水期和平水期均不同程度超出上述两个标准。金水街电站大坝上游(D3) As 的含量在丰水期超出国家饮用水卫生标准的 44%; 而金水街电站大坝上游(D3) 和下游(D4) 在平水期分别超出饮用水卫生标准的 57% 和 62%。碗牛坝电站大坝上游(D1) 和金水街电站大坝下游(D4) 的 Cr 含量分别超出国家地表水环境质量 I 类水质标准的 34% 和 14%; 在丰水期, 4 个采样点 Cr 的含量从上游到下游依次超出国家地表水环境质量 I 类标准的 284%、219%、165% 和 175%, 但均符合地表水 II 类标准。营养物质 PO_4^{3-} -P 和 TDP 的含量远远超过地表水环境质量 I 类标准对总磷的规定 (0.02 mg/L)。

2.3 水化学特征

水温(Temp)、pH 值与溶解氧(DO)是控制水化学特征的重要因素。水温能够影响微生物分解过程和分解效率^[11], pH 值是水环境酸碱程度的量度, 溶解氧(DO)决定了水环境的氧化还原过程。监测过程中, 温度、pH 值和 DO 随着采样点不同而发生变化, 进而影响了水环境化学成分。回归分析表明 (图 3), 温度与 DO、 NO_3^- -N 分别呈显著的负线性相关 ($p < 0.001$), 与 Cl^- ($p < 0.05$)、Cr ($p < 0.01$)、Si ($p < 0.01$)、 NH_4^+ -N ($p < 0.001$) 分别呈现显著的正线性相关。pH 值与 COD_{Mn} 、As 分别呈显著的负线性相关 ($p < 0.05$), 与 Cl^- 、 F^- 分别呈现显著的正线性相关 ($p \leq 0.05$)。DO 与 EC ($p < 0.01$)、TDS ($p < 0.01$)、 HCO_3^- ($p < 0.05$)、As ($p < 0.05$)、 NO_3^- -N 分别呈显著的正线性相关, 而与 NO_3^- ($p < 0.01$)、 NH_4^+ -N ($p < 0.001$)、 PO_4^{3-} -P ($p < 0.05$) 分别呈现显著的负线性相关关系。

3 水电工程对水环境的影响

3.1 水电工程破坏了流域的连续性

实际调查表明, 由于受到大坝的阻隔作用, 水坝下游地区的水流基本保持静止状态, 即使在丰水期下游地区的水流流速也不超过 0.05 m/s; 在枯水期, 上、下游之间完全断流, 进而在下游大坝附近形成一潭死水。同时, 水流受阻造成了监测断面 EC、TDS、 BOD_5 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、T-Hard、Si、 PO_4^{3-} -P、TDP 等水质指标的季节性变化不显著。这一现象主要是发电站的发电类型引起的。金水河流域已建成的碗牛坝电站和金水街电站, 均为低坝引水式水电站, 这种引水式电站是利用天然河道落差, 由引水系统集中发电水头的电站^[18]。

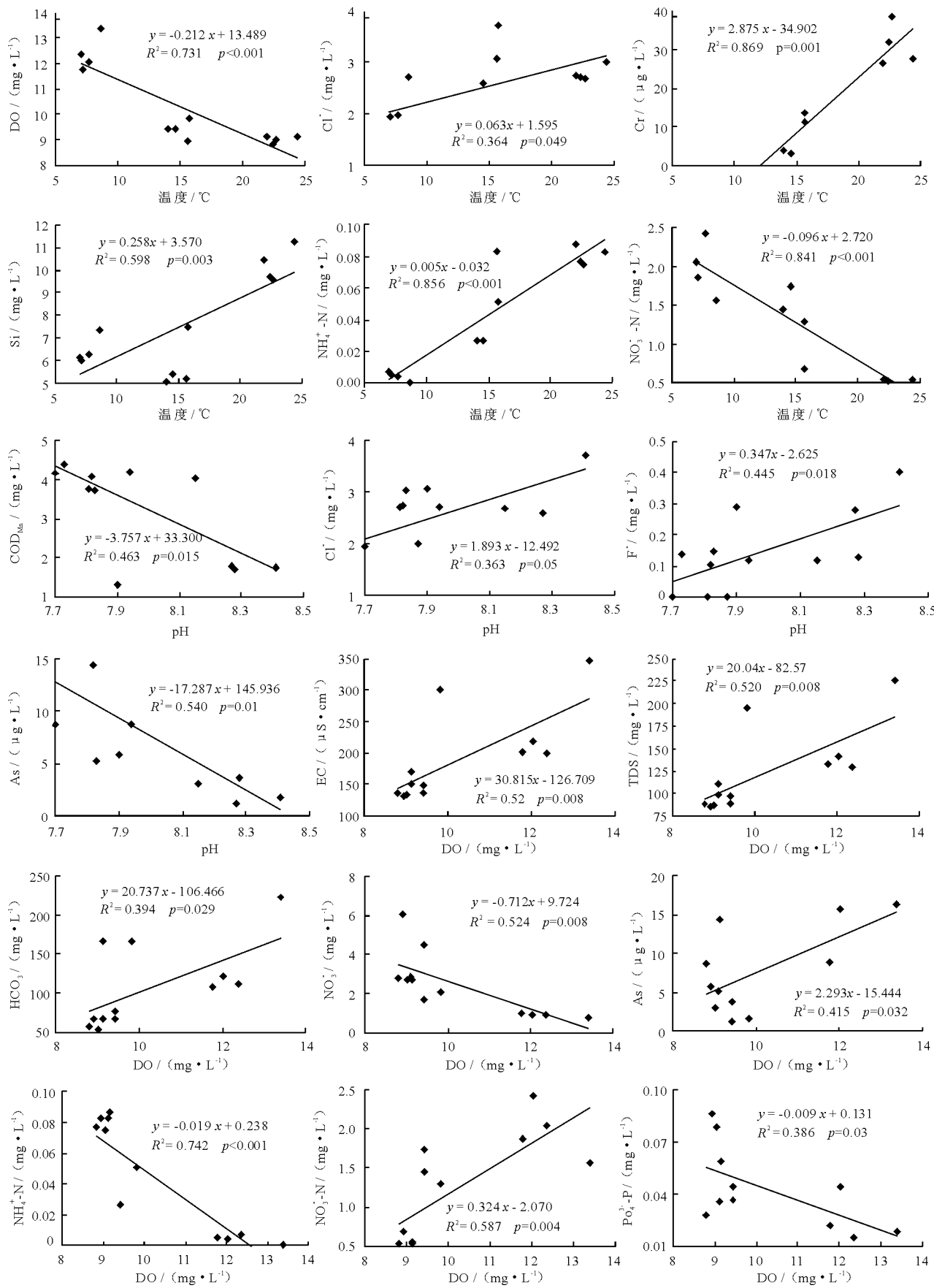


图 3 金水河流域水电站大坝上、下游地区水化学特征

水电站本身调节能力很低,采用引水方式发电后,流域内引水渠首到电站厂房之间的多处河道径流减少,甚至在天然径流量小于引水量的枯水期导致河流完全断流^[7]。经验表明,引水式电站的引水管道越长,导致河流断流的河道越长,引水流量越大,则断流的时间越长^[8]。拦河建坝使坝前水位与天然水位相比抬高很多,而下游的排水量急剧减少,这种水电开发方式中断了河流生态系统的连续性^[5,19],改变了径流状况,使水坝上游地区和下游地区形成两种截然不同的水环境特征,从而破坏了生态系统结构的完整性,影响了河流的物质循环和能量流动等生态过程,最终导致生态系统服务功能的变化,并危及水生生态系统的健康^[2,4]。

3.2 水电工程减少了水体纳污能力

水电工程对河流水体的纳污能力造成了一定的影响。一般认为河流的纳污能力 70% 是由于稀释作用形成的,30% 是由自净作用形成的^[20]。总体监测结果表明(图 2),从上游到下游监测断面水质呈现弱碱性趋势,pH 值缓慢增加;监测指标 EC、TDS、BOD₅、COD_{Mn}、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻、T-Hard、As、Si、Sr 和 NO₃⁻-N 在下游地区的含量比在上游地区高,出现富集现象;营养物质 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、TDP、金属元素 Cr 和 NO₃⁻ 在上游地区出现截留,最大值分别为 0.05 (D1),0.060 (D1),1.846 (D2),0.026 (D1),3.23 mg/L (D1)。水电工程建成之后,在流域系统内形成新的水环境体系,使得河流的水环境状况发生改变。一方面,拦河大坝的阻碍使水坝上游的水位抬升、水流平稳,造成大部分营养物质被截流。大坝上游地区 PO₄³⁻-P 和 TDP 含量严重超标,很可能是这一原因导致的结果。另一方面,拦河大坝的阻碍使流入下游的水量减少,造成水体对污染物的稀释和迁移能力下降,同时,坝下区域的河水流速变缓,减弱了水、气界面交换的速率和污染物的扩散和降解能力,从而使得河流的自净功能降低,因此导致坝下地区的水域形成严重的局部污染。坝下地区溶解性重金属元素 As、Si 和 Sr 含量高便与此有关。

3.3 水电工程降低了河流水质

拦河建坝对河流最直接、最基本的影响就是使坝下的河流流量明显减少,改变了河流的水文水化学特性^[21]。这一过程中,河水流速减缓,使得坝下的淤水滞留时间较长,污泥发生累积,河流由流动的溪流状态变为相对静止的人工湖状态,河流水质的一些物理化学条件也随之发生了变化,引起河流水

质恶化^[5]。控制水化学条件的因子(Temp、pH 和 DO)发生改变后,水坝上、下游中的污染物质监测值便会随之增加或减少。监测结果显示,Temp、pH 和 DO 分别控制了水环境中 EC、TDS、COD_{Mn}、HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻、F⁻、As、Cr、Si、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 的值(图 3)。另外,上游来水量减少,削弱了其对营养成分(NO₃⁻-N)的消化、稀释能力及对有机物的吸附、截留和分解能力^[22],造成营养元素含量较高。另一方面,下游地区来水量减少,使得河流的稀释作用减弱和自净能力下降,溶解性重金属元素(As 和 Sr)在坝下地区淤积,造成其含量高。此外,水环境条件的改变,促进了水生微生物活动^[1]。由于拦河大坝的作用,河水流动性较差,引起水生微生物呼吸作用加强^[7],特别是在丰水期,坝下地区的 NH₄⁺-N 经过硝化作用,消耗水中溶解氧(DO),使之转化为 NO₃⁻-N,使得水中 NH₄⁺-N 含量下降,而营养物质 NO₃⁻-N 的含量反而增加。这种微生物的作用为水生植物提供了营养物质,从而促进水质趋向富营养化。

4 结论与建议

汉江上游金水河流域所有的水电站均为私营企业投资兴建的,因此这些水电站强调经济效益,一定程度上忽视了生态效益。实际监测和调查表明,水电站大坝的修建使河流流量和水质的季节性变差,水电站大坝上、下游地区的 COD_{Mn}、Cr、As、PO₄³⁻-P 和 TDP 含量在不同采样时期均存在不同程度的超标现象,而水环境化学过程也发生了改变。因此,流域内已建成的水电工程破坏了流域的连续性,减少了水体纳污能力,降低了河流水质,从而使河流的水环境趋向恶化。如果不采取任何措施,将来建成的 5 座水电站,加上已建的 2 座水电站,势必对流域的水环境造成更大的影响。为了解决水电开发与环境保护之间的矛盾,使之既能满足能源需求,又能使生态环境不受破坏,作者提出以下几点建议:

(1)对正在建的 5 座水电站进一步实施环境影响评价以及环境损益分析,对评价不合格的水电站应予以停建。

(2)在天然河道保持一个最低流量,保证水电站拦河大坝下游河道有一定的生态用水量,以维持下游地区生物生长所必须的条件,特别是在枯水季节,水电站要适当减少引水量。

(3)对于这样典型的山区小流域,在没有实现流域水量统一调度的情况下,要建立相应的监督管

理机制。

(4)建立合理的生态补偿机制,使水电站受益者向受影响的河段及当地的居民进行生态补偿;或是向水电站受益者征收一定的税款,用以维护流域生态与水环境健康。

参考文献:

- [1] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure[J]. *Nature*, 1997,386:385-388.
- [2] 魏国良,崔保山,董世魁,等. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. *环境科学学报*, 2008,28(2):235-242.
- [3] 刘守杰,孙红光,刘星. 试论水利工程梯级开发对生态环境的负面影响[J]. *森林工程*,2003,19(2):15-16.
- [4] 麻泽龙,谭小琴,周伟,等. 河流水电开发对生态环境的影响及其对策研究[J]. *广西水利水电*,2006(1):24-28.
- [5] 董哲仁. 怒江水电开发的生态影响[J]. *生态学报*,2006,26(5):1591-1596.
- [6] 何大明,冯彦,甘淑,等. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应[J]. *科学通报*,2006,51(增):14-20.
- [7] 范继辉,刘巧,麻泽龙,等. 岷江上游水电开发对环境的影响[J]. *四川环境*,2006,25(1):23-27.
- [8] 杨丽虎,陈进,黄薇,等. 长江上游梯级水电开发情况及对生态环境的影响初探[J]. *中国农村水利水电*,2007(3):79-81.
- [9] 刘海龙,李迪华,黄刚. 峡谷区域水电开发景观影响评价——以怒江为例[J]. *地理科学进展*,2006,25(5):21-30.
- [10] 莫创荣. 水电开发对河流生态系统服务功能影响的价值评估初探[J]. *生态环境*,2006,15(1):89-93.
- [11] Rashad S M, Ismail M A. Environmental-impact assessment of hydro-power in Egypt [J]. *Applied Energy*, 2000,65(1):285-302.
- [12] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 水电开发的生态环境影响经济损益分析——以怒江中下游为例[J]. *生态学报*,2006,26(9):2979-2988.
- [13] 长江流域水环境监测中心. 中华人民共和国行业标准——水环境监测规范(SL219-98)[S]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [14] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 陈平雁. SPSS 13.0 统计软件应用教程[M]. 北京:人民卫生出版社,2005.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [17] 中华人民共和国标准局. 地表水环境质量标准(GB3838-2002)[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [18] 刘兰芬. 河流水电开发的环境效益及主要环境问题研究[J]. *水利学报*,2002,33(8):121-128.
- [19] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, et al. The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980,37(1):130-137.
- [20] 李玉梅,史复有. 黄河上游水利工程对水质的影响浅析[J]. *人民黄河*,1998,20(11):8-10.
- [21] 李江华,王欢,韩霜,等. 水电开发下的河流生态系统管理[J]. *中国农村水利水电*,2006(11):51-54.
- [22] Brainwood M A, Burgin S, Maheshwari B. Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources [J]. *Agricultural Water Management*, 2004,70(2):151-175.
- [23] Saradjian M R, Hosseini M. Soil moisture estimation by using multipolarization SAR image [J]. *Advances in Space Research*, 2011,48(2):278-286.
- [24] 李玉霞,杨武年,童玲,等. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析[J]. *光学学报*,2009,29(5):1403-1406.
- [25] Gherboudj I, Magagi R, Berg A A, et al. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(1):33-43.
- [22] Mozos JA, Casali J, Audicana M G, et al. Correlation between ground measured soil moisture and RADARSAT-1 derived back-scattering coefficient over an agricultural catchment of Navarre (North of Spain) [J]. *Biosystems Engineering*, 2005,92(1):119-1331.
- [23] 刘伟,施建成,余琴. 基于机载极化雷达技术的农作物覆盖区土壤水分估算[J]. *干旱区地理*, 2005,28(6):856-861.
- [24] 刘万侠,王娟,刘凯,等. 植被覆盖地表主动微波遥感反演土壤水分算法研究[J]. *热带地理*,2007,27(5):411-415+450.

(上接第34页)