

河西走廊东段武威市总氮总磷时空污染分析

李璐¹, 贾维平^{2*}, 陈萌萌³

(1. 西北师范大学, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省武威市环保局, 甘肃武威 733000; 3. 甘肃国通绿恒环境信息咨询有限公司, 甘肃武威 733000)

摘要 选择 2006—2017 年甘肃省武威市水库和地表水的 TN、TP 浓度进行研究, 结果显示, 2006—2017 年 5 个水库及断面 TN 变化呈先下降后上升趋势, TN 平均浓度为 1.726 mg/L, 变化幅度为 0.360~5.063 mg/L, 总磷呈平稳下降趋势, TP 平均浓度为 0.151 mg/L, 变化幅度为 0.110~0.453 mg/L; 5 个水库及断面浓度季节差异与干旱湿季的变化一致, 地表水 TN、TP 浓度与降雨量的相关性较低; 5 个水库及断面 12 年空间差异明显, 富营养化严重, 其中石羊河扎子沟断面 TN、TP 均常年超标, 是该区域环境监管的重点。

关键词 水库水质; 地表水; 总氮总磷; 河西走廊东段

中图分类号 X524 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)19-0073-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.19.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatial and Temporal Pollution Analysis of Total Nitrogen and Phosphorus in Wuwei City, East Section of Hexi Corridor

LI Lu¹, JIA Wei-ping², CHEN Meng-meng³ (1. Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070; 2. Wuwei City, Gansu Province the EPA, Wuwei, Gansu 733000; 3. Gansu Guotong Green Earth Environmental Information Consulting Co., Ltd., Wuwei, Gansu 733000)

Abstract TN and TP content of reservoirs and surface water in Wuwei City of Gansu Province were studied. The results show that TN concentration of the five reservoirs and sections decreased first and then increased during 2006-2017, and the average concentration of TN was 1.726 mg/L, the amplitude was 0.360-5.063 mg/L, the total phosphorus was a steady downward trend, the average concentration of TP was 0.151 mg/L, the amplitude was 0.110-0.453 mg/L; the seasonal differences of concentrations in 5 reservoirs and sections were consistent with the changes in dry and wet seasons, and the correlation between TN and TP concentrations of surface water and rainfall was relatively low. The spatial difference of the five reservoirs and sections in 12 years was obvious, and eutrophication was serious. Among them, TN and TP content in the Zazigou section of Shiyang river exceed the standard all year round, which was the key point of environmental supervision in this region.

Key words Reservoir water quality; Surface water; Total nitrogen total phosphorus; East section of Hexi corridor

随着人口数量不断增长, 工农业的快速发展, 对江河湖海的污染日益严峻^[1-5], 生活污水、农田废水、农药化肥淋失、城镇地表径流、矿区和建筑区地表径流等随河流和雨水进入水体后造成富营养化, 导致地表水和水库氮磷的超标^[6-7]。水循环系统的健康被破坏, 加重了水资源的短缺, 严重影响了当地经济、社会发展和人们正常的生产生活。生态环境恶化带来的一系列问题已经引起了我国政府和学者的高度关注^[8-9], 但在西部中小城市尤其欠发达城镇的面源污染动态及来源的研究并未引起足够的重视^[10-12]。笔者通过分析 2006—2017 年武威市面源污染动态规律^[13], 总结了该地区总氮总磷负荷的时空变化, 对实现武威的乡村振兴计划和进一步提升水库水资源的保护以及下阶段加强工程、法律、经济和管理政策等综合监管手段提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 武威位于甘肃省中部、河西走廊东端, 位于 101°49'~104°43'E, 36°09'~39°27'N, 地处青藏、黄土、蒙新三大高原交汇地带, 境内有灌溉绿洲、荒漠、高山草地、祁连山天然水源涵养林带及沙漠、浅山地带。总面积 33 236 km², 其中耕地面积 25.6 万 hm², 草地面积 236.87 万 hm²。武威市总人口 197.65 万人, 其中农业人口 155.82 万人。武威市河流分属黄河和石羊河两大流域, 石羊河流域位于中上游, 由

于石羊河流域水资源稀缺, 水资源已成为武威市经济社会发展的首要制约因素。石羊河水系流入武威市较大的河流有大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河等。流域面积 29 135.55 km² (图 1)。

1.2 数据来源 依据 2006—2017 年武威市主要河流水系或水库 (表 1), 石羊河 (扎子沟、红崖山)、黄羊河 (黄羊水库) 为国控断面, 执行 III 类标准; 西营河 (西营水库) 为省控断面, 执行 III 类标准; 金塔河 (南营水库) 为省控断面, 执行 II 类标准。试验数据为 2006—2017 年武威市环境质量报告书^[14-16] 中 TN、TP 监测数据。其中 TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB11894-89) 测定, TP 采用钼酸铵分光光度法 (GB11893-89) 测定。

1.3 数据处理 试验数据处理与分析均采用 SPSS 18.0 和 Excel 2013 统计软件, 并用 Origin 8.0 软件进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 水库及断面地表水总氮总磷的年度变化 由图 2 可知, 2006—2017 年黄羊水库地表水 TN 浓度总体呈平稳上升趋势。2012 年浓度最高, 南营水库地表水属于正常, 总体 TN 浓度趋于平稳, 其中 2010 年略有上升。2010 年后西营水库地表水 TN 浓度上升, 2016 年浓度最高, 其中 2006—2010 年, TN 浓度超标 0.15 倍, 2010—2015 年, TN 浓度超标 0.2 倍, 2015—2017 年, TN 浓度超标 0.55 倍, 总体 TN 浓度呈上升趋势。

红崖山水库断面地表水 TN 浓度总体呈平稳趋势, 其中 2006—2010 年, TN 浓度超标 0.339 倍, 除 2017 年 TN 浓度未超标, 年总体 TN 达标。石羊河扎子沟断面地表水呈下降趋势, 2006—2010 年, TN 浓度超标 2.043 倍, 2015—2017 年, TN 浓度

基金项目 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500907); 甘肃省重点研发计划项目 (17YF1FA120)。

作者简介 李璐 (1990—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向: 城市环境。* 通信作者, 从事环境监测工作和管理。

收稿日期 2019-03-31

超标0.675倍,总体TN浓度仍超标。断面地表水TN浓度偏高原因:由于武威地区的地表水水文特征普遍存在流量小,流程

短,流量因季节、降水等因素影响大的特点,因此水质稳定性较差,自净能力弱,环境容量小,纳污量小,容易造成污染。

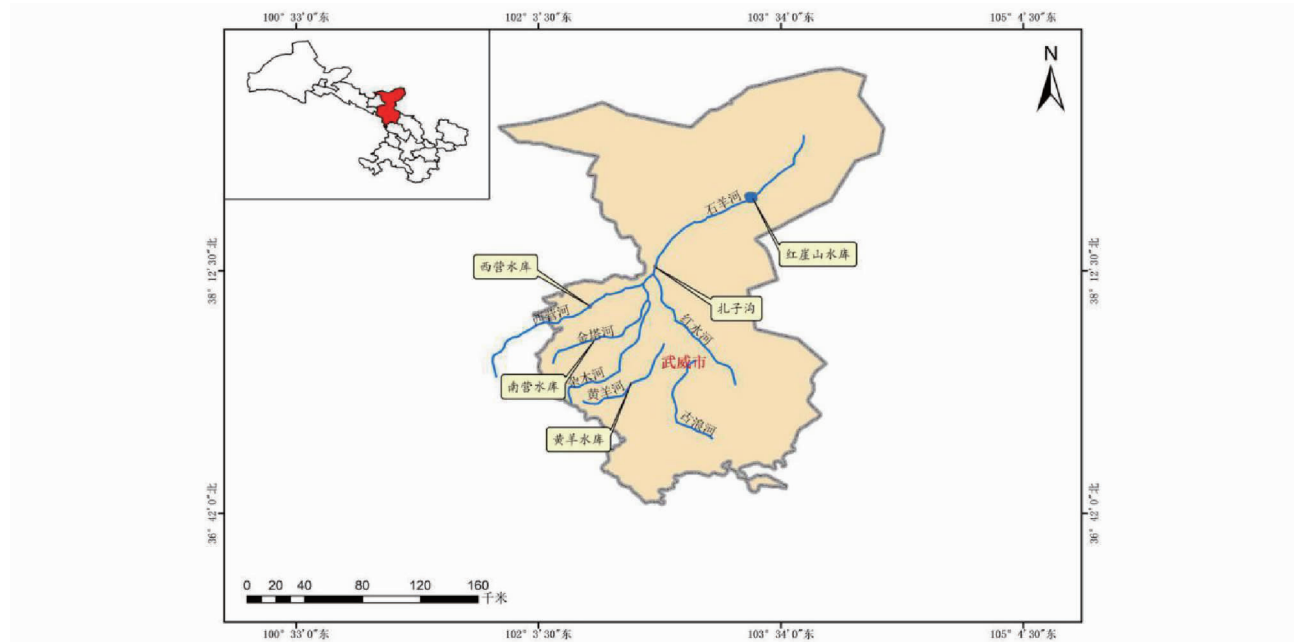


图1 河西走廊东段武威市监测河流水库及采样断面

Fig. 1 Monitoring river reservoir and sampling section of Wuwei City in the eastern section of Hexi Corridor

表1 采样断面分布

Table 1 Sample section distribution

编号 No.	河流 River	采样点 Sampling point	断面名称及所在位置 Section name and location	执行标准 Execution standard
1	石羊河	z1	扎子沟断面	Ⅲ
2	石羊河	z2	红崖山水库分水闸处	Ⅲ
3	黄羊河	z3	黄羊水库大坝处	Ⅲ
4	金塔河	z4	南营水库大坝处	Ⅱ
5	西营河	z5	西营水库大坝处	Ⅲ

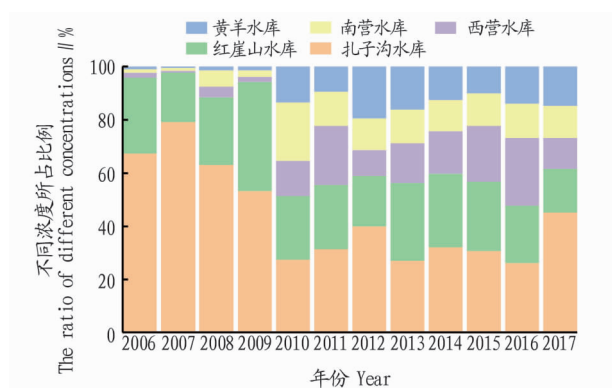


图2 水库及断面地表水总氮浓度占比

Fig. 2 Ratio of total nitrogen concentration in reservoir and cross-section surface water

由图3可知,黄羊水库地表水在12年TP浓度总体平稳呈上升状态。南营水库地表水水体TP在Ⅱ类标准上下波动,其中2006—2010年,TP浓度超标0.16倍,2010年后总体TP浓度达标。西营水库地表水水体TP浓度上升至2009年后下降再平稳上升,其中2006—2010年,TP浓度超标0.22

倍,2010—2017年总体TP呈平稳状态。

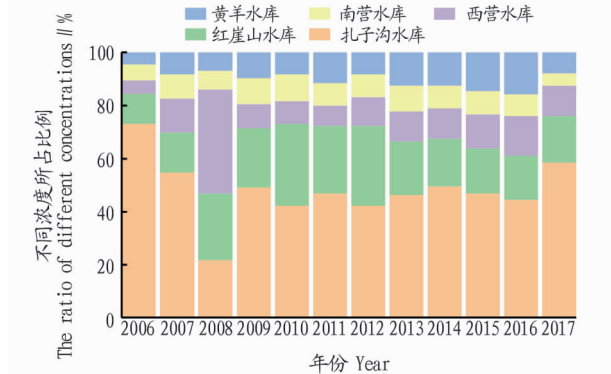


图3 水库及断面地表水总磷占比

Fig. 3 Ratio of total phosphorus in reservoir and cross-section surface water

总体来看,3个水库TP浓度呈平稳趋势。西营水库在2008年污染呈上升趋势,但2009年水质明显好转;南营水库相对稳定;黄羊水库相对稳定。2010—2016年生态环境恶化的趋势基本得到遏制,城市环境质量改善明显。

根据武威地区环境质量报告书12年数据,石羊河扎子沟断面地表水2006—2010年,TP浓度超标2.804倍,2010—2015年,TP浓度超标1.508倍,2016—2017年TP浓度超标1.4倍,总体TP浓度呈下降趋势,但仍超标。红崖山水库断面地表水属于Ⅲ类标准,其中2006—2010年,TP浓度超标0.5倍,2010—2015年,TP浓度超标0.196倍,2015—2017年,TP浓度未超标,总体TP浓度呈下降趋势。武威地区以造纸、食品、纺织、煤炭、化工、建材六大行业为主,其中以造纸行业排废水量最大。3个水库工业废水及其主要污染物的

排放总量均呈缓慢增长趋势,生活污水及主要污染物随着城镇人口的增加而呈上升趋势。

2.2 水库及断面地表水总氮总磷的月变化特征 以 2017 年为例,就 4 大水库及断面地表水的总氮总磷情况具体分析。5 大水库及断面总氮月变化总体呈先上升后下降再上升

的趋势,而扎子沟断面总氮峰值出现在 5、6 月,浓度达 6 mg/L,10—12 月浓度为 4.23 mg/L,四大水库及断面总磷月变化总体呈平稳趋势,扎子沟断面 2017 年监测超标项目为总磷,超标月份为 2、6 和 7 月,分别超过地表水Ⅲ类考核目标要求的 0.485、0.400 和 0.150 倍(图 4)。

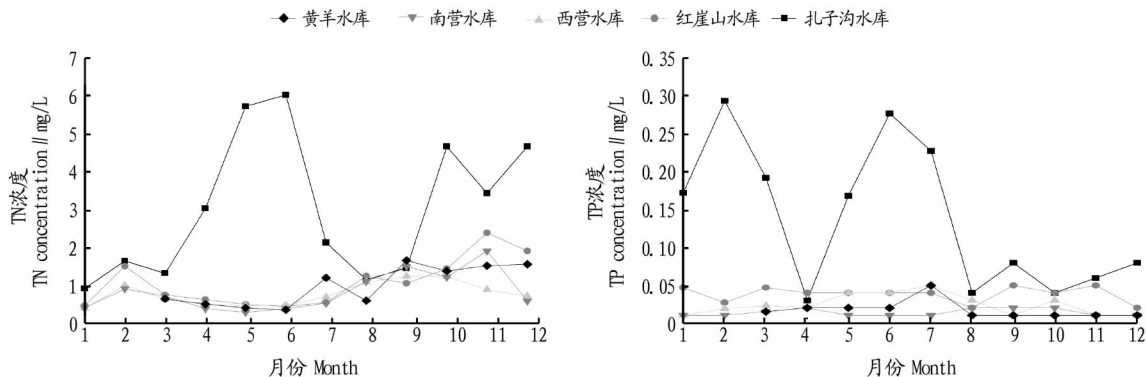


图 4 2017 年水库及断面地表水各时期 TN、TP 趋势

Fig.4 TN/TP trend of reservoirs and cross-section surface water in 2017

2.3 水库及断面地表水氮磷污染的季节特征 武威市地表水 TN、TP 浓度具有很强的时间变异性,不同季节 TN、TP 浓度表现为春夏浓度低,秋冬浓度高,季节变化分为枯水期(12—2月)、平水期(8—10月)、丰水期(3—7月),与武威当地雨季、旱季较一致。根据当地雨水量的不同,各水库采样点 TN、TP 的浓度变化见图 5。由图 5 可知,丰水期和枯水期的 TN 平均浓度分别为 1.18、1.78 mg/L,TP 平均浓度分别为 0.05、0.09 mg/L。可见武威市国控断面水库枯水期较丰水期 TN、TP 污染严重,TN、TP 的月变化趋势除扎子沟断面水库断面其他水库与空间变化趋势大致相同。

化,枯水期较丰水期地表径流氮等非点源氮源对河水氮贡献减少,主要受点源氮输入的影响,而扎子沟断面常年偏高,主要是属石羊河下游水系,断面来水主要为天然河道来水和市污水处理厂排放的废水,除汛期外,天然河道来水量较小,对市污水处理厂排放的废水(日均 5 万 m³)稀释效果有限,且污水处理厂废水排放标准主要污染物浓度高于地表水Ⅲ类标准限值,市污水处理厂排放废水是下游扎子沟断面总磷超标的主要原因。

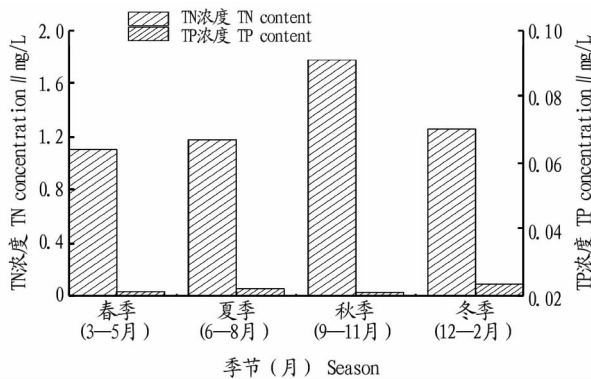


图 5 2017 年水库及断面地表水各时期 TN、TP 趋势

Fig.5 TN/TP trend of reservoir and cross-section surface water in 2017

5 大水库及断面 2017 年春季、夏季为丰水期,降雨量较高(表 2),TN 月平均浓度为 1.11~1.78 mg/L,其中降雨量最大的 7 月,其 TN 浓度最低为 0.51 mg/L,而降雨量最低的是 10—12 月,其 TN 浓度最高为 4.64 mg/L;枯水期河水 TN 月平均浓度最高为 1.78 mg/L,出现在降雨量接近最大的 5—7 月,水库 TN 月平均浓度为 0.24~1.18 mg/L,浓度较丰水期低,这主要是由于工业点源、畜禽养殖和生活污水排放量在年内基本保持不变,而地表径流带入的氮磷量随降雨强度变

表 2 2017 年度武威市降水情况

Table 2 Precipitation of Wuwei City in 2017

月份 Month	降水次数 Number of precipitation	样品总数 Total number of samples	pH	降水量 Precipitation mm
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	4	12	6.55	4.7
4	6	18	6.7	18.5
5	7	21	6.85	20.1
6	4	12	6.65	20.9
7	4	12	6.9	45.8
8	0	0	0	0
9	4	12	7	6
10	5	15	6.95	11.3
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
全年 Total year	34	102	6.7	127.3

河水 TN、TP 月平均浓度与总降雨量的关系见图 6,相关系数 $r = -0.011 (P = 0.736)$ 、 $r = -0.201 (P > 0.05)$,说明水库 TN、TP 浓度与降雨量的相关性小,影响显著,表现为降雨量对河水 TN、TP 浓度不具有明显的稀释效应。武威属典型的温带大陆性气候,昼夜温差大,干旱少雨,年平均气温 7.8℃,降水量 60~610 mm,蒸发量 1 400~3 010 mm,日照 2 200~3 030 h。从武威降水方面看,蒸发量大于降水量,属于干旱性气候。

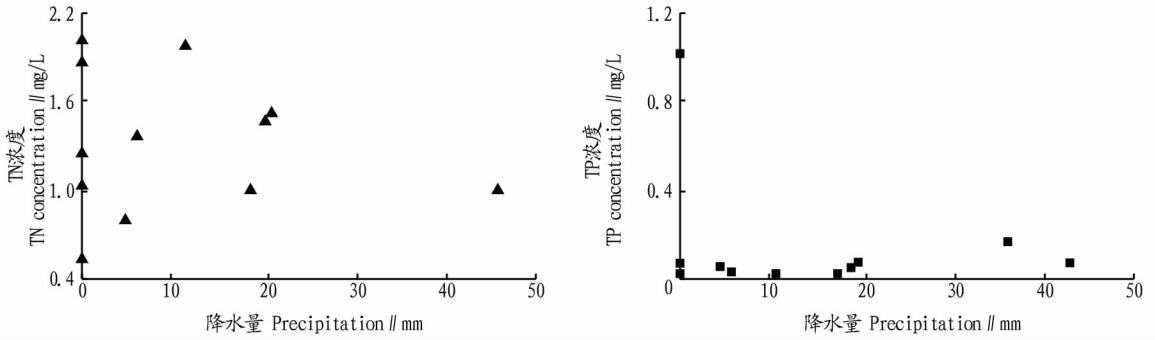


图6 2017年水库及断面地表水各时期TN、TP趋势

Fig. 6 TN/TP trend of reservoirs and cross-section surface water in 2017

2.4 水库及断面地表水总氮总磷的空间变化 扎子沟、红崖山作为武威市石羊河流域主要水库断面,由北向南经分支为西营河(西营水库)、黄羊河(黄羊水库)、金塔河(南营水库),同一时期水库断面TN、TP具有很强的空间变异性,扎子沟断面位于石羊河流域下游,12年TN平均浓度为1.726 mg/L,变化范围为0.360~5.063 mg/L,TP平均浓度为0.151 mg/L,变化范围为0.110~0.453 mg/L,污染严重,主要原因为断面来水主要为天然河道来水和市污水处理厂排放的废水,而2010—2015年的污染状况较2006—2010年污染明显减轻,主要原因:一是完成了武威市污水处理厂达标升

级改造工程,武威市污水处理厂的改建使城市生活污水能够达标排放,从而使水库污染减轻;二是建成投运武威工业园区、黄羊工业园区、宽沟工业园区等25家企业的污水处理厂,针对性地对污水的种类单独处理;三是关停黄羊河亚麻厂等10家企业,特种生产制造企业对水质环境的影响较为严重。红崖山水库12年TN平均浓度为0.811 mg/L,变化范围为0.308~2.114 mg/L,TP平均浓度为0.062 mg/L,变化范围为0.038~0.121 mg/L,污染较严重。其他水库周围污染源较少,水质自净能力强,TN、TP浓度较稳定(图7)。

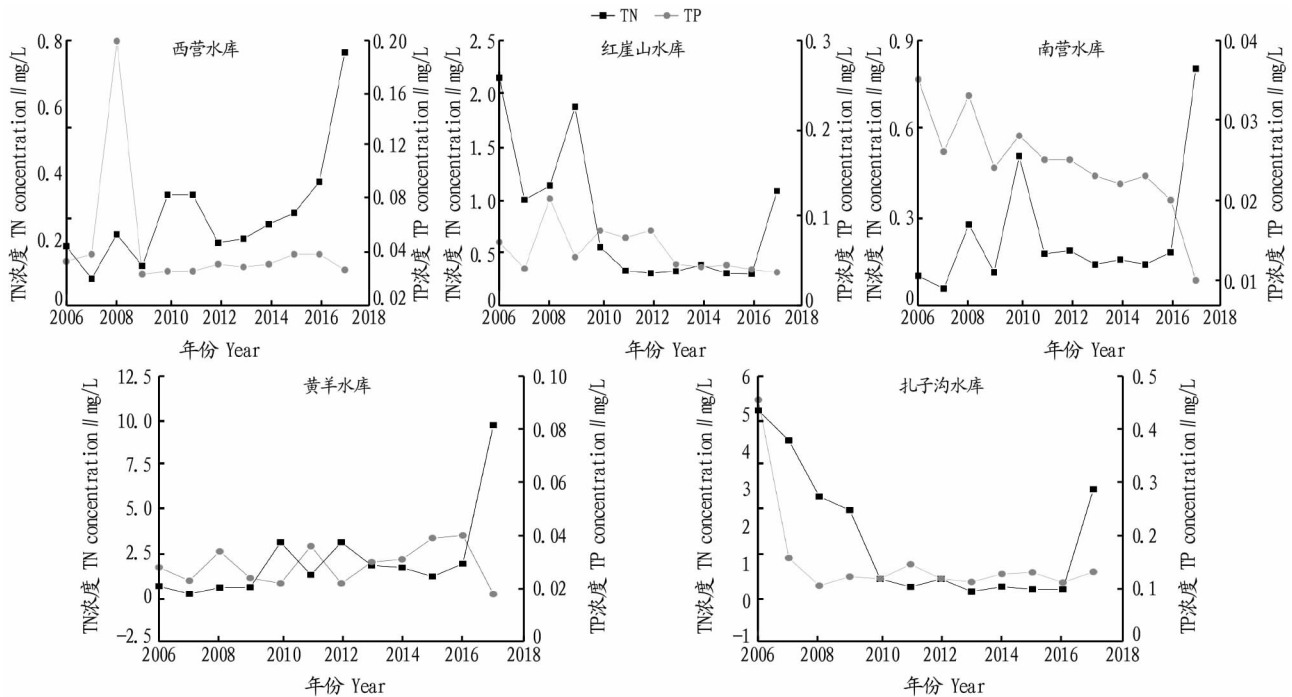


图7 水库及断面地表水各时期TN、TP空间变化

Fig. 7 TN/TP spatial variation of reservoir and cross-section

2.5 TN、TP污染特征

2.5.1 水体总氮污染。在环境水质分析中,总氮是判断饮用水、水源水、地表水污染程度的重要指标之一^[17],扎子沟断面TN的年均变化在0.302~5.063 mg/L,超出Ⅲ类标准。其主要来源:工业废水及生活污水的排放,且排放总量呈逐年上升趋势。其他水库TP呈平稳下降趋势,且氨氮在厌氧

条件下也会转化为亚硝酸盐氮;饮用水中硝酸盐氮在人体内经硝酸还原菌作用后被还原为亚硝酸盐氮,毒性将扩大为硝酸盐毒性的11倍。

2.5.2 水体总磷污染。水中磷主要来源为生活污水、化肥、有机磷农药及近代洗涤剂所用的磷酸盐增洁剂等。磷酸盐会干扰水厂中的混凝过程。扎子沟断面TP在0.110~

0.452 mg/L,超出Ⅲ类标准。其他水库 TP 呈平稳下降趋势,市污水处理厂排放废水是下游扎子沟断面总磷超标的主要原因。需加强石羊河扎子沟断面上游河道生态环境^[18]治理工程建设以及扎子沟地表水监测断面上游河道及两侧红线范围内工业点源、农业面源、养殖场(小区)废弃物、散养放养及畜禽粪便、居民生产生活垃圾的监管^[19-20]。

2.5.3 水质富营养化。氮磷污染是影响水库富营养化的主要原因^[20],水库等水体中氮磷等植物营养物质含量过多所引起的水质污染现象。当水体中总氮、总磷的浓度达 0.20 和 0.02 mg/L 时,可能发生“水华”现象^[21]。四大水库及断面不同月份水库总氮总磷浓度平均为 1.328 和 0.127 mg/L,超出标准为 6.64、6.35 倍,很有可能发生水华现象。

3 结论

(1) 年际变化。扎子沟断面总氮、总磷 2006—2009 年严重污染,2010—2016 年下降为轻度污染。红崖山水库水质污染变化呈逐年好转趋势,属于轻污染。其余 3 个水库断面黄羊水库、南营水库、西营水库水质从 2010 年后变化平稳,南营水库、西营水库水质达Ⅲ类标准,黄羊水库达Ⅱ类标准。

(2) 季节变化。5 个水库 TN 浓度从季节上看表现为秋季>冬季>春季>夏季。TP 表现为冬季>夏季>春季>秋季,从水期看,枯水期浓度高,丰水期浓度低,但相关性差,主要是由于各水库周边污染物和污染类型不同,总氮总磷浓度随之变化。

(3) 空间变化。从水库在流域的分布可见,同一时期不同水库的总氮、总磷的变规律不同,这与每个水库所处的位置及周边的生产生活布局不同有关,地表水断面从上游到下游面源污染减轻,与水体的自净、迁移扩散等水体生态系统的代谢有关,也与环境监管的力度增加有关。

(4) 五大水库及断面总氮、总磷处于富营养化状态,加强市区污染水体的全收集、全处理,把水体的治理作为乡村振兴计划^[22]的主要内容。

参考文献

- [1] 刘佳. 生态文明法治建设的实现路径[J]. 城市管理与科技, 2017(1): 50-52.
- [2] 许杰玉, 蒋蕾, 毛磊, 等. 典型西北干旱区水资源开发利用及保护对策研究: 以武威市为例[J]. 水利发展研究, 2016(5): 34-37.
- [3] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314-319.
- [4] 张强, 王润元, 邓振镛, 等. 中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 100-297.
- [5] 宋冬梅, 肖笃宁, 张志城, 等. 石羊河下游民勤绿洲生态安全时空变化分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 335-342.
- [6] STEENBERGH A K, BODELIER P L E, HELDAL M, et al. Does microbial stoichiometry modulate eutrophication of aquatic ecosystems[J]. Environmental microbiology, 2013, 15(5): 1572-1579.
- [7] 徐梦佳, 于磊, 赵彦伟, 等. 水库温排水增温模拟及其对富营养化影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1180-1188.
- [8] “生态文明建设若干战略问题研究(二期)”综合组. 生态文明建设若干战略问题研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 1-5.
- [9] 李红清, 马经安. 生物控制技术在富营养化防治中的应用[J]. 人民长江, 2005, 36(8): 60-61.
- [10] 余志敏, 袁晓燕, 施卫明. 面源污染水治理的人工湿地治理技术[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 264-268.
- [11] 肖朝卿. 甘肃农业面源污染防治问题研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [12] 韦瑛, 俞国基, 赵欢庆, 等. 武威市农业面源污染及其防治建议[J]. 甘肃农业科技, 2010(3): 47-50.
- [13] 王佳琪, 马瑞, 孙自永. 地表水与地下水相互作用带中氮素污染物的反应迁移机理及模型研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 270-280.
- [14] 赵青山, 贾维平, 赵一军, 等. 武威市环境质量报告书(2006-2010)[M]. 武威市环境保护局, 2011: 35-64.
- [15] 邵宗桃, 李清泉, 白福海, 等. 武威地区环境质量报告书(2010-2015)[M]. 武威地区环境保护监测站, 2016: 42-94.
- [16] 邵宗桃, 王明德, 张兴林, 等. 武威地区环境质量报告书(2015-2017)[M]. 甘肃省武威市环境保护局, 2018: 47-80.
- [17] 马乐宽, 赵康平, 赵越, 等. 湖库型水体总氮总量控制目标的区域分配研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(3): 54-57.
- [18] 沈清林, 苏中原, 李宗礼, 等. 西北干旱内陆河流域生态安全保障体系建设初步研究: 以石羊河流域为例[J]. 中国水利, 2005(21): 20-23.
- [19] 张振克, 孟红明, 殷勇. 中国水库环境面临的主要问题及其对策[J]. 科技导报, 2006, 24(12): 82-84.
- [20] 方创琳, YEHUA DENNIS WEI. 河西地区可持续发展能力评价及地域分异规律[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 561-569.
- [21] 马经安, 李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575-578.
- [22] 温竹箐. 乡村振兴战略的关键点及实践路径[J]. 改革与开放, 2018(11): 9-10.

(上接第 58 页)

- [9] ZHAO S Y, ZHU L X, WANG T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 86(1/2): 562-568.
- [10] IMHOF H K, SCHMID J, NIESSNER R, et al. A novel highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments[J]. Limnology & oceanography methods, 2012, 10(7): 524-537.
- [11] DEHAUT A, CASSONE A L, FRÈRE L, et al. Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization[J]. Environmental pollution, 2016, 215: 223-233.
- [12] FOSSI M C, COPPOLA D, BAINI M. Large filter feeding marine organisms as indicators of microplastic in the pelagic environment: The case studies of the Mediterranean basking shark (*Cetorhinus maximus*) and fin whale (*Balaenoptera physalus*) [J]. Marine environmental research, 2014, 100(3): 17-24.
- [13] REISSER J, SHAW J, WILCOX C, et al. Marine plastic pollution in waters around Australia: Characteristics, concentrations, and pathways[J]. PLoS One, 2013, 8(11): 1-11.
- [14] CORCORAN P L, BIESINGER M C, GRIFI M. Plastics and beaches: A degrading relationship[J]. Marine pollution bulletin, 2009, 58(1): 80-84.
- [15] VAN CAUWENBERGHE L, JANSSEN C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption[J]. Environmental pollution, 2014, 193: 65-70.
- [16] MATHALON A, HILL P. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 81(1): 69-79.
- [17] VAN CAUWENBERGHE L, CLAESSENS M, VANDEGEHUCHTE M B, et al. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats[J]. Environmental pollution, 2015, 199: 10-17.
- [18] FARRELL P, NELSON K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) [J]. Environmental pollution, 2013, 177(4): 1-3.
- [19] 周倩. 典型滨海滩涂及近海环境中微塑料污染特征与生态风险[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
- [20] EERKES-MEDRANO D, THOMPSON R C, ALDRIDGE D C. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs[J]. Water research, 2015, 75(3): 63-82.
- [21] CÓZAR A, SANZ-MARTÍN M, MARTÍ E, et al. Plastic accumulation in the Mediterranean Sea[J]. PLoS One, 2015, 10(4): 1-12.