

大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别

韩爽, 夏春龙, 王永东, 蔡喜运

引用本文:

韩爽, 夏春龙, 王永东, 等. 大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1568–1575.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0234>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于输出系数模型的1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征分析

韦晓雪, 李晓琳, 郑毅

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 171–181 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0389>

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242–2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751>

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究——以淮河流域为例

宋太平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219–1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>

太湖地区农业源对水体氮污染的贡献——以宜溧河流域为例

罗永霞, 高波, 颜晓元, 姜小三, 逄超普

农业环境科学学报. 2015(12): 2318–2326 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.010>

林芝市农业面源污染负荷时空变化与分布特征

郝守宁, 付意成

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1308–1315 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0499>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韩爽, 夏春龙, 王永东, 等. 大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1568–1575.

HAN Shuang, XIA Chun-long, WANG Yong-dong, et al. Changes in water quality and identification of the sources of water pollution in the drainage basin of Dahuofang Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1568–1575.



开放科学 OSID

大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别

韩爽¹, 夏春龙², 王永东², 蔡喜运^{1*}

(1. 大连理工大学环境学院工业生态与环境工程教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁省抚顺水文局, 辽宁 抚顺 113005)

摘要:为识别大伙房水库控制流域水体水质现状及主要污染因子, 通过统计分析2014—2018年大伙房水库控制流域水体的水质数据, 采用综合加权指数法和主成分分析方法, 开展了大伙房水库控制流域水体水质变化趋势及成因识别研究。结果表明: 大伙房水库控制流域水体水质情况总体良好, 主要污染因子为总氮和粪大肠菌群。库区水体营养状态整体为中营养, 磷限制型, 且综合营养状态指数呈逐年下降趋势。水库控制流域水体水质受到地质、气候、农业、畜禽养殖、居民生活等复合影响, 主要污染源为农业种植、农村生活及畜禽养殖等农业面源。农业种植源是水体中总氮的主要来源, 其贡献总体上先增高再缓慢降低, 而农村生活及畜禽养殖源是粪大肠菌群的主要来源, 其贡献年际无明显变化。研究表明, 大伙房水库控制流域水体中总氮超标严重, 主要原因为农业面源污染的氮排放, 同时水体中总磷的缺乏限制总氮的去除, 加剧了这一现象。

关键词:富营养化; 农业面源污染; 主成分分析; 大伙房水库

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)07-1568-08 doi:10.11654/jaes.2020-0234

Changes in water quality and identification of the sources of water pollution in the drainage basin of Dahuofang Reservoir

HAN Shuang¹, XIA Chun-long², WANG Yong-dong², CAI Xi-yun^{1*}

(1. Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering (Ministry of Education), School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Fushun Hydrology Bureau of Liaoning Province, Fushun 113005, China)

Abstract: The aim of this study was to assess water quality and identify factors of water pollution in the basin of the Dahuofang Reservoir. We analyzed the water quality data of the basin from 2014 to 2018 using the comprehensive weighted average nutritional status index and principal component analysis methods. Results showed that the major water pollution factors in the basin were total nitrogen (TN) and fecal coliform (FC). Water in the reservoir had the middle nutrient level, limited by phosphorus, and the eutrophication index gradually decreased over years. The sources of water pollution in the basin were primarily agricultural cultivation (for TN), and rural activities and livestock breeding (for FC). The contribution of agricultural cultivation as a source initially increased and sequentially decreased over the years. The contribution of rural activities and livestock breeding remained constant over the years. Therefore, the heavy pollution of total nitrogen in the waters of the basin was attributed to both the continuous emission from agricultural activities and the poor utilization of total nitrogen in waters with a lack of phosphorous.

Keywords: eutrophication; agricultural non-point source pollution; principle component analysis; Dahuofang Reservoir

收稿日期: 2020-03-02 录用日期: 2020-03-23

作者简介: 韩爽(1995—), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 从事环境污染评价与模拟研究。E-mail: 1963882469@qq.com

*通信作者: 蔡喜运 E-mail: xiyuncai@dlut.edu.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503107); 国家重点研发计划项目(2017YFD08000700)

Project supported: The Special Scientific Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503107); National Key R&D Program of China (2017YFD08000700)

水资源短缺已成为全球面临的一个重要挑战。湖泊水库是淡水资源的重要组成部分,其水质变化特征及成因解析对于保障水资源合理利用具有重要意义。全球71个大型湖泊1985—2010年期间夏季水华研究结果显示,68%的湖泊夏季富营养化峰值强度呈增加趋势,只有8%的湖泊富营养化强度显著降低,表明全球水华状况正在恶化^[1]。导致湖泊富营养化程度恶化的主要因素为化肥使用、降雨或温度等,这些因素的影响与变化规律在不同湖泊之间并不相同。

大伙房水库位于辽宁省抚顺市,是辽宁中、南城市群的主要饮用水源地,供水人口达到2 300万^[2]。近年来水库水质发生明显变化,多种污染物指标超标,对饮用水安全造成了威胁^[3]。王琼等^[4]通过对大伙房水库控制流域2012年8—9月水质数据进行分析,确定了氨氮、总氮为流域内主要污染物,入库支流水质与环库区面源污染对水库水质有一定影响。李晓丹^[5]根据大伙房水库库区2015年水质数据,确定了首要污染物为总氮,但尚未出现富营养化现象。《抚顺市环境质量报告书(2016)》显示,大伙房水库水质和富营养化发展形势严峻,推断主要污染源为种植业、养殖业、林业和农村生活污水。目前的大伙房水库控制流域水质研究存在时间周期短、水质变化趋势与成因不明确等问题。

因此,本研究开展了2014—2018年的水质监测,阐明了大伙房水库控制流域水体水质及富营养化趋势,识别了水质影响因素及时空变化规律,旨为水体保护及流域可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大伙房水库位于浑河中上游,水库总库容21.87亿m³,东西长约35 km,水面最宽处达4 km,最窄处约

0.3 km,是一个带状河谷型水库^[6]。水库最大水深为37 m,最大蓄水面积为114 km²,集雨面积为5 437 km²。大伙房水库控制流域地处长白山低山丘陵区,土壤为棕色森林土,植被条件较好^[7]。本研究根据大伙房水库控制流域内水系分布,分别在3条主要入库河流和水库库区选取样点。

1.2 数据来源

大伙房水库控制流域内6—10月为丰水期,其余月份为枯水期。选取了水库最大的3条入库河流——浑河上游段、社河和苏子河的19个监测样点,样点分布如图1所示。于2014—2018年5—11月(6月除外)采样并分析,采用《水和废水监测分析方法》^[8]中规定的方法检测总氮、总磷、粪大肠菌群等37个水质指标。

1.3 富营养化评价方法

本研究基于大伙房水库库区及入库口样点水质检测数据,采用《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》^[9]的综合加权指数法评价大伙房水库库区及入库口的富营养化水平。评价指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素(Chla)。营养状态分级标准如表1所示。

$$TLI = \sum_{i=1}^n w_i \times TLI(i)$$

$$w_i = \frac{r_i^2}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

式中:TLI为综合营养状态指数; w_i 为第*i*个指标的权重; r_i 为*i*指标与叶绿素的相关系数。TLI(*i*)和 r_i 的计算公式及数值取值见参考文献[9]。

1.4 数据处理

采用SPSS 24、Origin 2017和Excel软件对数据进行分析统计。为消除数据间由量纲引起的差异,首先使用SPSS 24软件将所有水质指标进行标准化处理,

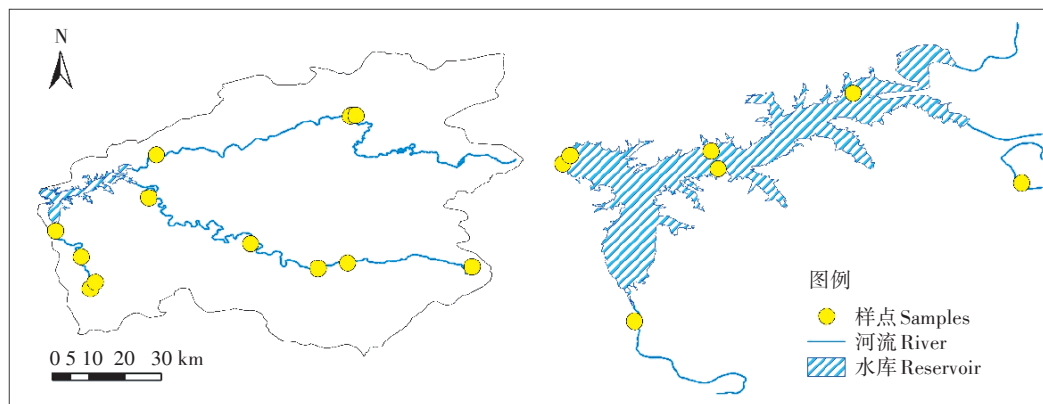


图1 大伙房水库控制流域样点位置示意图

Figure 1 Locations of sampling sites in the Dahuofang Reservoir basin

表1 营养状态分级标准
Table 1 Classification standard of eutrophication

营养状况分级 Nutritional level	评分值 <i>TLI</i> Score <i>TLI</i>	定性评价 Qualitative evaluation
贫营养	$TLI \leq 30$	优
中营养	$30 < TLI \leq 50$	良好
轻度富营养	$50 < TLI \leq 60$	轻度污染
中度富营养	$60 < TLI \leq 70$	中度污染
重度富营养	$70 < TLI \leq 100$	重度污染

处理后的各指标均值为0,方差为1。

2 结果与讨论

2.1 大伙房水库控制流域水体污染因子

样点水温、pH、溶解氧等部分水质指标统计结果如表2所示。铜、锌、氟化物、硒、砷、汞、六价铬、铅、氰化物、石油类、阴离子表面活性剂、硫化物、硫酸盐、氯化物、硝酸盐氮等指标的最大值均不超标(未列出)。与地表水环境质量标准Ⅱ类标准限值比较,粪大肠菌群和总氮超标率高,而COD_{Cr}等其他指标的整体超标率低于8%,说明控制流域内水体水质状况整体良好。

大伙房水库控制流域水体水质水平与主要污染因子随时间发生了明显的变化,但总氮通常为主要污染物。2011—2015年大伙房水库库区主要污染物为总氮,5年总氮均为劣Ⅴ类;水库库区次要污染物为

总磷,超标率为8.2%~48.3%^[5]。2012年8—9月大伙房水库入库河流87%的点位COD_{Cr}符合Ⅲ类以上地表水环境质量标准,100%的点位总磷和氨氮达到Ⅱ类标准,97%的点位总氮达到Ⅱ类标准^[4]。2000—2003年水质数据分析显示,主要污染因子为与工业废水排放相关的pH、COD_{Cr}、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、总氮和镉^[10]。

2.1.1 总氮

2014—2018年大伙房水库控制流域水体中总氮浓度范围为0.61~9.17 mg·L⁻¹,平均值为2.76 mg·L⁻¹(图2)。100%的样本超过了Ⅱ类地表水环境质量标准限值(0.5 mg·L⁻¹),98%的样本超过了Ⅲ类标准限值(1.0 mg·L⁻¹),92%的样本超过Ⅳ类标准限值(1.5 mg·L⁻¹),77%的样本超过Ⅴ类标准限值(2.0 mg·L⁻¹),表明该地总氮污染严重。这与2011—2015年水库水质评价结果一致。2011—2015年水库库区水体中总氮为主要污染物,连续5年总氮均为劣Ⅴ类^[5]。

2014—2018年水库控制流域水体中总氮浓度总体呈现逐年降低趋势,年内变化为春季高-夏季下降-秋冬季升高。王琮等^[4]根据2012年秋季检测数据发现,大伙房水库入库河流除1个点位总氮达到Ⅲ类地表水水质标准外,其余38个点位均满足Ⅱ类水质标准。另外,水库控制流域库区及3条主要入库河流水体中总氮浓度存在明显的区域差异。其中,浑河上游总氮浓度($C_{\text{mean}}=3.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}, n=71$)最高,苏子河($C_{\text{mean}}=2.91$

表2 大伙房水库控制流域水质指标统计结果
Table 2 Water quality indicators statistics in the Dahufang Reservoir basin

指标 Index	样本数 Samples	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	水质标准* Water quality standards*	超标率 Over-limit ratio/%
水温 Water temperature/℃	454	0	31	18.1	7.3	—	—
pH	454	6.4	9.6	8.1	0.6	6~9	2.8
溶解氧 DO/mg·L ⁻¹	454	3.3	12.9	8.1	1.8	≥6	7.9
COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	454	0	32.1	2.6	1.6	4	4.4
COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	454	<10	74	9.6	5.4	15	6.2
五日生化需氧量 BOD ₅ /mg·L ⁻¹	454	0	3.7	1.5	0.8	3	2.0
氨氮 NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	454	<0.025	2.73	0.22	0.3	0.5	5.7
TP/mg·L ⁻¹	453	<0.01	0.31	0.043	0.041	0.1	4.6
TN/mg·L ⁻¹	393	0.61	9.17	2.76	1.1	0.5	100
粪大肠菌群 Fecal coliform/mg·L ⁻¹	454	0	1 980 000	29 431	162 558	2 000	41
硝酸盐氮 NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	343	0.59	4.54	2.29	0.77	10	0
铁 Fe/mg·L ⁻¹	341	<0.03	1.01	0.097	0.16	0.3	7.3
锰 Mn/mg·L ⁻¹	342	<0.01	0.65	0.036	0.075	0.1	8.5
Chla/ mg·m ⁻³	165	0.79	75.5	12.63	13.14	—	—

注:*地表水环境质量标准Ⅱ类(适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区)^[11]。
Note: *Class Ⅱ environmental quality standard for surface water (applicable to class I protection area of centralized drinking water surface water source area)^[11].

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=114$)次之,社河($C_{\text{mean}}=2.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=76$)和库区($C_{\text{mean}}=2.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=132$)浓度较低,表明浑河上游和苏子河对库区水体总氮影响较大。

2.1.2 粪大肠菌群

大伙房水库控制流域全部样点粪大肠菌群浓度范围为 $0\sim1.98\times10^6\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3),其中41%的样本超过Ⅱ类地表水环境质量标准限值($2\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),24%的样本超过Ⅲ类标准限值($10\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),19%的样本超过Ⅳ类标准限值($20\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$),11%的样本超过Ⅴ类标准限值($40\,000\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$)。样点粪大肠菌群浓度变异系数为552%,表明其在不同时空呈现出明显的异质性。

粪大肠菌群空间分布与总氮类似,浑河上游浓度($C_{\text{mean}}=121\,222\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=84$)最高,苏子河($C_{\text{mean}}=17\,368\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=150$)次之,社河($C_{\text{mean}}=6\,160\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=90$)和库区($C_{\text{mean}}=148\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=130$)浓度低。2014—2018年粪大肠菌群浓度年际间无差异,同年内先增加再降低,峰值通常出现在7—9月,夏季降雨强度大,地表径流携带更多污染物进入水体。

2.2 大伙房水库库区及入库口富营养化评价

2014—2017年大伙房水库库区和入库口8个样点的综合营养状态指数范围为29~61(图4)。所采集的164个样本中80%的样本处于贫营养和中营养等级,定性评价为优或良好,未达到富营养化状态。19%的样本呈现轻度富营养化,1%的样本为中度富营养化。李晓丹等^[5]研究发现,2011—2015年大伙房水库库区水质污染类型为营养盐类(氮、磷)污染,未出现富营养化现象。

水库库区及入库口水体的营养状态指数整体上逐年降低,2014年有29%的样本处于轻度及中度富营养层级,至2017年只有7%的样本为轻度富营养层级。2014—2016年,水体营养状态指数在年内呈现夏季高、春秋季节低的倒U型分布。然而,2017年营养状态稳定在中营养水平,年内各季度间没有显著差异。同时,在2014—2017年期间,处于浑河入库口的浑73与北杂木两样点水体营养状态指数高于其他样点,处于轻度富营养层级,且通常情况下浑73营养状态指数高于北杂木。分别位于苏子河和社河入库口

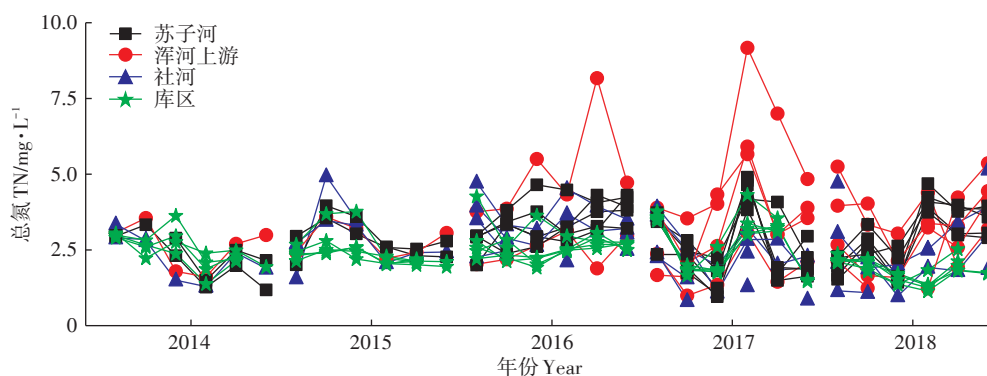


图2 大伙房水库库区及入库河流总氮浓度时空变化

Figure 2 Temporal-spatial variation of TN in Dahuofang Reservoir and its joint rivers

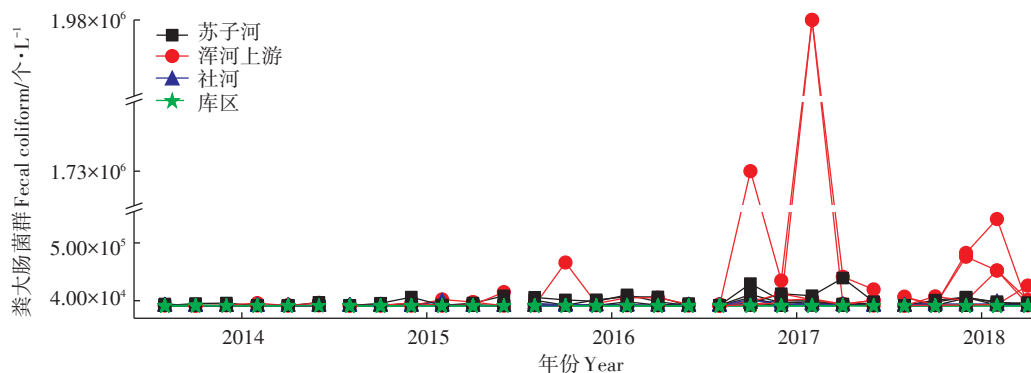


图3 大伙房水库库区及入库河流粪大肠菌群浓度时空变化

Figure 3 Temporal-spatial variation of fecal coliform in Dahuofang Reservoir and its joint rivers

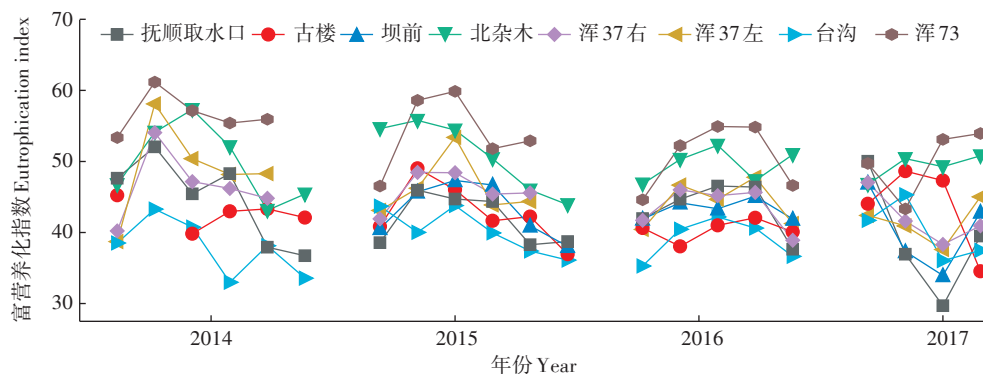


图4 大伙房水库库区及入库口营养状态指数分布图

Figure 4 Distribution of eutrophication index in Dahuofang Reservoir and its entrances

的古楼、台沟两个样点在所有调查时间内均处于中营养等级。因此,浑河上游来水可能对大伙房水库库区营养盐的输入具有更大贡献。

库区及入库口样本的氮磷比为15~836,平均值为167,表明水体营养状态为磷限制型。相关性分析结果也显示,综合营养状态指数与总磷具有极显著正相关关系($n=161, r=0.729, P<0.01$),与总氮无显著相关关系($P>0.05$)。刘韶华^[12]采用美国 Row Column AESOP 水质模型模拟各支流营养盐输入对大伙房水库库区水质的影响,也得到了类似的结果。该研究模拟结果表明:减少氮素的输入,对库区营养水平无明显影响,而减少磷的输入,会降低水体富营养化水平。值得关注的是,水体中氮、磷的循环密切相关,适宜藻类生长的氮磷比为10~40^[13],水体中磷的缺乏限制了藻类生长,成为营养限制性因子,同时也限制了水体中氮、磷的生物利用与自然消除。水库库区及入库口水体的氮磷比显著高于适宜的氮磷比,其中氮磷比超过40的样本占比为90%、超过80的样本占比为70%、超过120的样本占比为4%、超过200的样本占比为21%。因此,库区水体中总磷含量低可能不利于水体中总氮的消减。

2.3 大伙房水库控制流域水体水质影响因素识别

基于大伙房水库控制流域内354个样本的18项指标标准化数据,采用主成分分析方法识别大伙房水库控制流域水体污染的影响因素。KMO(>0.6)和巴特利特检验($P<0.001$)结果显示适合采用主成分分析,提取出7个主成分(PC),累计贡献率为75.1%。各主成分特征向量及方差贡献率如表3所示。

第一个主成分包括总磷、氟化物、铁、锰等指标,解释了总体方差的20.8%,推测为地下水补给及河流底泥沉积的污染物释放。根据《抚顺市地质环境监测

成果报告》,抚顺市地下水中氟化物、铁、锰浓度普遍超标,超标率为10%~63%,地下水与河流及水库之间互相补给,污染物会互相迁移。Spearman相关性分析结果显示,总磷和铁极显著正相关($n=393, r=0.513, P<0.01$)。农业面源流失的磷主要为颗粒形态,易于沉积在底泥之中,而底泥能够释放出铁、磷等污染物,尤其是在厌氧条件下,吸附在氢氧化铁上的磷容易解析出来^[14]。因此,将PC1定义为长期污染排放及积累导致的地下水污染及底泥释放源。这个结果很好地解释了库区水体总氮超标严重但营养水平较低的现象(图2和图4)。因为,总磷富集在底泥沉积物中,水体中藻类可利用的磷含量低,限制了藻类的生长,导致大量的氮因无法被利用而积累^[15]。

第二个主成分包括气温、水温和溶解氧3个指标,解释了总体方差的15.5%。Spearman相关性分析结果显示,水温与溶解氧极显著负相关($n=454, r=-0.532, P<0.01$),因为水温升高,水中溶解的氧气变少,导致溶解氧下降。水温与气温不属于污染源,是自然气候变化,因此定义PC2为气候因素。

第三个主成分包括总氮和硝酸盐氮两个指标,解释了总体方差的9.9%。Spearman相关性分析结果显示,总氮与硝酸盐氮极显著正相关($n=393, r=0.798, P<0.01$)。水体中氮素的主要来源有大气沉降、化肥流失、动物排泄、生活污水等,其中硝酸盐氮主要来源于化肥流失和动物粪便^[16]。PC3中除总氮和硝酸盐氮外,不含粪大肠菌群等畜禽养殖特征指标^[17],因此推测来源于农田流失。此外,全市每年以尿素为主的化肥使用量达6万t,全市种植业排放总氮627.63t、氨氮102.8t、总磷41.32t^[18]。水库控制流域内3条入库河流主要流经农业种植地区,且研究区域属于丘陵地带,夏季降雨集中,易发生水土流失,有种植业化肥

表3 特征向量及方差贡献率

Table 3 Unit eigenvector and variance contribution rate

指标 Index	1	2	3	4	5	6	7
气温 Air temperature	0.080	0.876	-0.049	0.040	0.047	0.067	0.342
水温 Water temperature	0.049	0.904	-0.137	0.037	0.083	0.083	0.265
pH	-0.068	0.239	-0.065	-0.150	0.055	-0.008	0.811
DO	-0.095	-0.798	0.007	-0.065	-0.069	0.124	0.376
COD _{Mn}	0.219	0.057	-0.046	-0.072	0.896	-0.035	0.026
COD _{Cr}	0.073	0.104	-0.070	0.260	0.876	0.145	0.021
BOD ₅	0.288	0.014	-0.318	0.420	0.105	0.105	0.208
NH ₄ -N	0.250	0.062	0.186	0.639	0.183	-0.039	-0.295
TP	0.648	0.065	0.206	0.520	0.197	-0.031	-0.126
TN	0.071	-0.129	0.885	0.312	0.024	-0.039	0.002
氟化物 Fluoride	0.495	-0.014	-0.227	0.233	-0.035	-0.352	0.399
As	0.413	0.247	0.009	-0.088	0.060	0.646	-0.145
粪大肠菌群 Fecal coliform	-0.016	0.045	0.164	0.757	-0.028	0.182	-0.008
硫酸盐 Sulfate	0.092	-0.125	-0.103	0.081	-0.081	0.763	0.103
氯化物 Chloride	-0.222	0.055	0.014	0.308	0.251	0.656	-0.049
NO ₃ -N	-0.003	-0.048	0.936	0.020	-0.113	-0.028	-0.097
Fe	0.834	0.051	0.147	0.092	0.144	0.115	0.062
Mn	0.833	0.094	-0.126	0.013	0.088	0.057	-0.109
贡献率 Rate/%	20.8	15.5	9.9	9.6	7.4	6.3	5.6

流失的风险。因此将PC3定义为农业种植源。

第四个主成分包括粪大肠菌群、五日生化需氧量、氨氮和总磷等指标,解释了总体方差的9.6%,推测来自于畜禽养殖和农村生活。抚顺市每年畜禽养殖业排放化学需氧量24 518.08 t,总氮4 549.22 t、氨氮680.65 t、总磷737.05 t^[18]。水库控制流域2014年数据分析显示,粪大肠菌群和人口数极显著正相关($n=8, r=0.996, P<0.01$),与畜禽养殖总量显著正相关($n=8, r=0.911, P<0.05$)。粪大肠菌群与总氮、总磷、氨氮都具有显著正相关性($n=393, P<0.05$),相关性系数分别为0.467、0.198、0.131,表明总氮、氨氮和总磷可能为畜禽养殖和农村生活产生的污染物。因此定义PC4为农村生活及畜禽养殖源,其中畜禽养殖对流域水体中的氮、磷具有重要贡献。

第五个主成分包括COD_{Mn}和COD_{Cr}两个指标,解释了总体方差的7.4%。COD_{Mn}与氨氮、总磷、氟化物、汞、铁、锰、砷等都具有极显著相关性($n=393, r \geq 0.140, P<0.01$),COD_{Cr}与氨氮、总磷、氟化物、砷、粪大肠菌群、氯化物等都具有极显著相关性($n=393, r \geq 0.155, P<0.01$)。工业废水、生活废水、农业污水及动植物腐烂分解都会产生有机污染物,因此定义PC5为有机污染复合源。

第六个主成分包括砷、硫酸盐和氯化物,解释了

总体方差的6.3%。水体中的砷主要来源于矿物及岩石风化、火山喷发、温泉溢水等,硫酸盐和氯化物也来自于岩石矿物的溶解^[19]。因此将PC6定义为地质源。

第七个主成分为水体pH,解释了总体方差的5.6%。pH与水体内的钾、钠、钙、镁等离子浓度有关,可能是由于采矿历史造成的长期影响。根据《大伙房水库志》^[20],建库初期水库上游水质清澈无污染,属于天然中性水,进入20世纪70年代开始产生污染。因此将PC7定义为历史积累因素。

综上,大伙房水库控制流域水体水质的影响因素复杂,影响因素的重要性依次为历史污染积累所导致的地下水污染与底泥释放、自然气候因素、农业种植、农村生活及畜禽养殖源、工业-生活有机污染复合等。其中,水库控制流域内水体主要污染因子总氮来自于农业种植源,粪大肠菌群来自于畜禽养殖与农村生活源。因此,大伙房水库控制流域主要污染源为农业种植和畜禽养殖与农村生活两类农业面源。黄瑞等^[10]根据2000—2003年大伙房水库3个入库口断面水质数据进行主成分分析,识别出浑河主要污染源为工业废水和生活废水排放,苏子河主要受农业污染影响,社河受农业污染和生活污染双重影响。这些结果进一步证实了农业面源污染是大伙房水库控制流域水体污染的重要因素。

2.4 大伙房水库控制流域水体农业面源污染贡献的变化趋势

农业种植源的贡献整体上呈现先增加再降低的变化趋势(图5)。2014—2018年期间农业种植源的得分先升高再降低,其中2016年得分达到最高值,2018年仍高于2014年,表明近年来农业种植排放总氮有不同程度的增加。农业种植源的贡献呈现出明显的春季高、夏季降低、秋季再次升高的变化特征。这是由于农业种植源污染与化肥施用方式、灌溉方式、降雨、土地覆盖率、作物类型等都有关。春季施用化肥,污染物流失多;夏季作物生长快速利用肥料,同时作物密度大,污染物随降雨径流流失量减少;秋季收割后地表裸露,流失增加。同时,农业种植源的得分在水库控制流域样点间存在差异。浑河上游北杂木和苏子河的红升水库、永陵、古楼等样点得分较高。这与上述样点所在的乡镇耕地面积大有关。根据2014年统计数据,北杂木样点上游的红透山镇及南口前镇耕地总面积为7 666.7 hm²,永陵样点所在的永陵镇耕地面积为7 133.3 hm²,古楼样点上游上夹河镇耕地面积为3 600 hm²。

农村生活及畜禽养殖源得分分布如图6所示。得

分高的样点为浑河上游的北杂木和浑河的上夹河镇、永陵,说明浑河上游和苏子河受农村生活及畜禽养殖影响较为严重。根据普查数据,浑河入库口红透山镇有家禽4万余只,苏子河入库口上夹河镇有家禽2万余只,社河入库口上马乡有家禽7 000余只。2016—2017年得分有明显下降趋势,可能是抚顺市政府及各县区实施了畜禽禁养区划定带来的政策影响。

综合农业种植源和农村生活及畜禽养殖源时空分布特征发现,大伙房水库控制流域内浑河上游北杂木及苏子河永陵受农业面源污染影响严重,这些样点所在乡镇人口多、农业种植面积大且畜禽养殖量大。

3 结论

(1)大伙房水库控制流域水体主要污染因子为总氮和粪大肠菌群,分别来自于农业种植源、农村生活及畜禽养殖源,高污染区域为浑河北杂木和苏子河永陵。2014—2018年农业种植源的贡献先增高再降低,总体呈现不同程度的增加,而农村生活及畜禽养殖源的贡献年际无明显变化。

(2)大伙房水库库区水体整体处于磷限制型中营

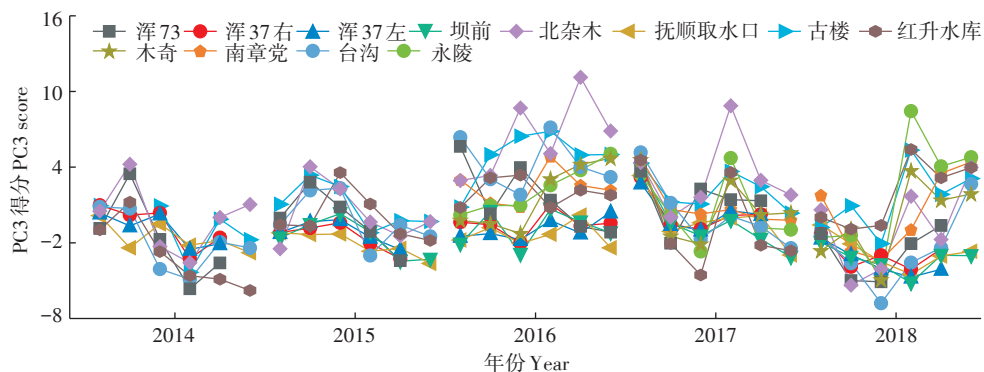


图5 农业种植源得分分布

Figure 5 Distribution of scores of agricultural planting sources

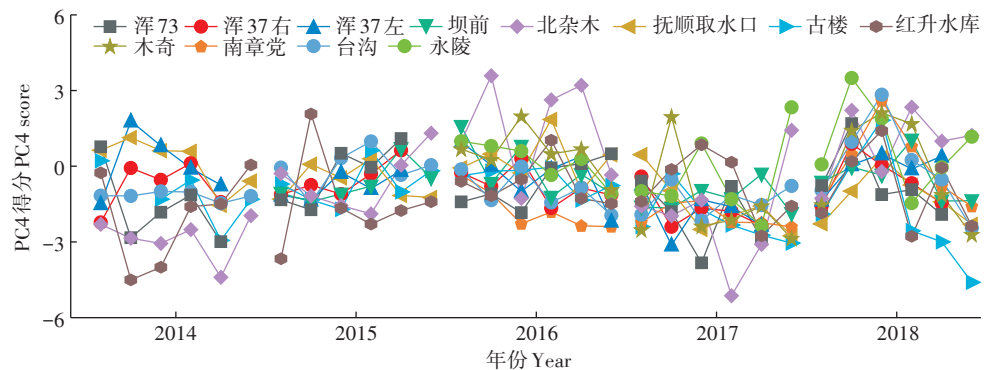


图6 农村生活及畜禽养殖源得分分布

Figure 6 Distribution of scores of rural life and livestock breeding sources

养等级,综合营养状态指数呈逐年下降趋势。水体中磷缺乏限制总氮的消耗,加剧了总氮污染的现象。

参考文献:

- [1] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. *Nature*, 2019, 574(7780):667-670.
- [2] 孙丽娜. 辽宁大伙房水库周边森林和湿地生态治理修复[J]. 中国林副特产, 2019(5):90-92.
SUN Li-na. Restoration of forest and wetland ecological restoration around the Dahuofang Reservoir in Liaoning[J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2019(5):90-92.
- [3] 王 琼, 李法云, 范志平, 等. 辽宁省大伙房水库及入库河流水质空间特征与河库水质关系[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4):775-784.
WANG Qiong, LI Fa-yun, FAN Zhi-ping, et al. Spatial variations of water quality in Dahuofang Reservoir and its joint rivers, and the relationship of water quality between river and reservoir (Liaoning Province)[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(4):775-784.
- [4] 王 琼, 李法云, 范志平, 等. 大伙房水库入库河流物理生境评价及其对水质状况的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9):2850-2859.
WANG Qiong, LI Fa-yun, FAN Zhi-ping, et al. Assessment of river physical habitat and its relationship with water quality in the Dahuofang Reservoir inflow rivers[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9):2850-2859.
- [5] 李晓丹. 大伙房水库水环境现状评估与污染原因分析[J]. 科学技术创新, 2017(19):47-48.
LI Xiao-dan. Water environment assessment and pollution cause analysis of Dahuofang Reservoir[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2017(19):47-48.
- [6] 闫 滨, 黄万霞, 刘羽婷. 考虑时间维度的灰水足迹核算与评价:以浑河大伙房水库上游段为例[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7):40-45.
YAN Bin, HUANG Wan-xia, LIU Yu-ting. Calculation and assessment of grey water footprint in consideration of time dimension: A case study on the upstream of Dahuofang Reservoir of Hunhe River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(7):40-45.
- [7] 刘瑞民, 王嘉薇, 张培培, 等. 大伙房水库控制流域土壤侵蚀评价及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8):1597-1601.
LIU Rui-min, WANG Jia-wei, ZHANG Pei-pei, et al. Evaluation of soil erosion based on GIS in the drainage basin of Dahuofang Reservoir and its influencing factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1597-1601.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and waste water[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [9] 国家环境保护总局, 中国环境监测总站. 湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
State Environmental Protection Administration, China Environmental Monitoring Headquarters. Methods for eutrophication evaluation of lakes (reservoirs) and technical provisions for their classification[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [10] 黄 瑞, 张防修, 孙 娟, 等. 大伙房水库监测断面水质特征分析[J]. 水科学与工程, 2012(1):78-81.
HUANG Rui, ZHANG Fang-xiu, SUN Juan, et al. Water quality analysis in Dahuofang Reservoir monitoring sections[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2012(1):78-81.
- [11] 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[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [12] 刘绍华. 大伙房水库水体富营养化及其影响因素分析[J]. 水科学与工程, 2018(6):14-19.
LIU Shao-hua. Study on eutrophication of Dahuofang Reservoir and its influencing factors[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2018(6):14-19.
- [13] 李付宽, 郑剑锋, 贾泽宇, 等. 海河干流天津段氮磷对藻类生长的影响及动力学分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2):959-964.
LI Fu-kuan, ZHENG Jian-feng, JIA Ze-yu, et al. Impact of nitrogen and phosphorus on algal growth and kinetics in Haihe River of Tianjin [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2):959-964.
- [14] 郗晓丹. 水体底泥对污染物的吸附-解吸机理的研究[J]. 四川环境, 2014, 33(2):117-121.
XI Xiao-dan. Study of adsorption and desorption mechanism of sediment on pollutants[J]. *Sichuan Environment*, 2014, 33(2):117-121.
- [15] Finlay J C, Small G E, Sterner R W. Human influences on nitrogen removal in lakes[J]. *Science*, 2013, 342(6155):247-250.
- [16] 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 等. 太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程[J]. 环境科学, 2018, 39(3):1076-1084.
LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, et al. Identification of nitrate sources and the fate of nitrate in downstream areas: A case study in the Taizi River basin[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3):1076-1084.
- [17] 马 芳, 赵陆萍, 曹静静, 等. 环境监测中粪大肠菌群监测方法应用分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(2):157-159.
MA Fang, ZHAO Lu-ping, CAO Jing-jing, et al. Application analysis of monitoring methods of fecal coliforms in environmental monitoring [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(2):157-159.
- [18] 南秀杰. 抚顺市农业环境污染防治综合防治战略对策[J]. 黑龙江科技信息, 2016(5):37.
NAN Xiu-jie. Comprehensive countermeasures for agricultural environmental pollution prevention and control in Fushun[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2016(5):37.
- [19] 蔡长卿, 熊玮玮. 饮用水除砷常用工艺总结[J]. 四川水泥, 2018(9):113.
CAI Chang-qing, XIONG Yi-wei. The summary of arsenic removal from drinking water[J]. *Sichuan Cement*, 2018(9):113.
- [20] 辽宁省大伙房水库管理局. 大伙房水库志[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006:124.
Dahuofang Reservoir Administration Bureau of Liaoning Province. Dahuofang Reservoir records[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006:124.