

三峡库区笋溪河流域水质评价及其空间差异

郑永林¹, 王海燕¹, 秦倩倩¹, 杨丹丹¹, 王一格¹, 张正贵²

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083;

2. 重庆市江津区四面山森林资源管理局, 重庆 402296)

摘要: 为了解三峡水库库尾地区面源污染现状, 以重庆市江津区笋溪河流域为研究对象, 利用综合水质识别指数、内梅罗指数和主成分分析方法对笋溪河水质进行评价, 主要评价指标有水温、pH、电导率、溶解氧、化学需氧量、总氮和总磷。结果表明: (1) 笋溪河流域溶解氧为 5.98~8.70 mg/L、化学需氧量为 2~14 mg/L、总磷为 0.008~0.105 mg/L, 均处于 I 类或 II 类水质, 总氮为 0.64~2.03 mg/L, 处于 III~V 类水质, 污染严重。 (2) 3 种水质评价方法均显示下游水质劣于上游水质, 内梅罗指数在考虑平均超标水平的同时兼顾最大超标污染物, 研究认为该指数的评价结果最能表现该地区的水质现状。 (3) 笋溪河上下游之间, 溶解氧为上游显著高于下游, 水温、pH、电导率、化学需氧量和总氮均为下游显著高于上游 ($P < 0.05$), 总磷浓度未发现明显的差异 ($P > 0.05$)。在后续管理中应提升城镇污水和农村污水的处理率, 提高水肥利用率, 以消减污染负荷、控制水污染趋势, 从而改善区域水环境质量。

关键词: 笋溪河; 三峡库区; 面源污染; 氮污染; 水质评价

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)04-0001-09

与点源污染相比, 非点源污染(面源污染)已成为威胁生态环境的主要因素。据不完全统计, 滇池、巢湖、太湖以及黄河、淮河、汉江等水域, 面源污染比例已超过点源污染(乔卫芳等, 2013)。面源污染中, 氮和磷是决定淡水生态系统中浮游植物生长和分布最重要的营养元素, 过量的氮磷输入会造成水体酸化、富营养化以及产生毒性, 危害水体的生态系统健康(Collos & Harrison, 2014; Ludwig et al, 2010)。因此, 加强河流面源污染研究对生态环境保护具有重要意义。

三峡水库面源污染情况日益严重, 主要是由于水库蓄水后江水流速减缓, 水环境容量降低(陈洪波, 2006)。张广纳等(2015)研究了 2005-2011 年农业面源污染所导致的水质变化, 发现总氮和总磷的浓度已经超过地表水环境质量 III 类标准。彭滔等(2016)研究三峡水库重庆段农业面源污染驱动因素, 发现畜禽养殖的粪便排放和农药化肥的使用是总氮和总磷的主要来源, 其中总氮还受水土流失的

影响。娄保锋等(2011)研究了 1997-2009 年三峡水库污染负荷, 发现库区废水、污水排放总量随库区社会经济快速发展而显著增加, 虽然主要污染物化学需氧量和氨氮排放量增加态势得到了有效遏制, 但库区和上游水污染防治仍然不容疏忽。

三峡水库库首尤其是香溪河地区的相关研究较多(苏青青等, 2018a; 2018b), 而库尾地区水质状况鲜有研究。笋溪河地处三峡库区库尾, 流经整个江津区 2/3 的区域。自上游四面山风景区至下游先锋镇汇入綦江, 途径 8 个乡镇。该流域没有大型工厂, 其水体污染基本来自面源污染。流域上游山区多林地, 上、下游交汇处多农田, 下游地区多花椒等果园基地, 土地利用类型集中。而面源污染和土地利用现状又是影响河流水质的重要因素。因此, 本文选择在笋溪河进行水质评价, 分析溶解氧、化学需氧量、总氮和总磷的污染现状和空间差异, 以期对三峡库区面源污染控制和水生态修复提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

笋溪河 (28°37' ~ 29°13'N, 106°15' ~ 106°31'E), 又称笋溪、白溪。綦江左岸支流, 发源于贵州省习水县寨坝镇, 经重庆江津区汇入綦江。河长 126 km, 流域面积 1 198 km², 落差 980 m, 多年平均流量 19.9 m³/s。中咀以上为上游, 以下为下

收稿日期: 2020-01-31 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家十三五重点研发计划(2017YFC0505306)。

作者简介: 郑永林, 1995 年生, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为面源污染。E-mail: zhengyonglin95@126.com

通信作者: 王海燕, 1972 年生, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤学和植物营养学。E-mail: haiyanwang72@aliyun.com

游。笋溪河有支流飞龙河、复兴河、龙吟河和李市溪,最终于白溪村注入綦江。上游为海拔 800 m 以上的中低山区,植被良好;下游以丘陵为主,河岸高一般为 10~20 m,河面宽 5~50 m,林木稀疏。属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 13.6~18.3℃。多年平均降水量 1 050~1 480 mm,5~9 月降水量占全年的 70%~75%,最大年降水量 1 585.7 mm。

1.2 采样与水质测定

笋溪河流域水质数据采用实地调查方法,通过实地踏勘确定采样点 40 个(图 1),采样时间为 2018 年 10 月。采样方法、样品的预处理方法和测定方法均按照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局,2002)完成,车载冰箱保存样品,带回实验室进行分析。测定指标为水温、溶解氧、化学需氧量、电导率、总氮和总磷。其中水温用温度计法;溶解氧采用 JPB-607A 便携式溶解氧测定仪(上海雷磁)测定;电导率用 DDB-303A 便携式电导率仪(上海雷磁)测定;总氮采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;总磷用钼酸铵分光光度法。

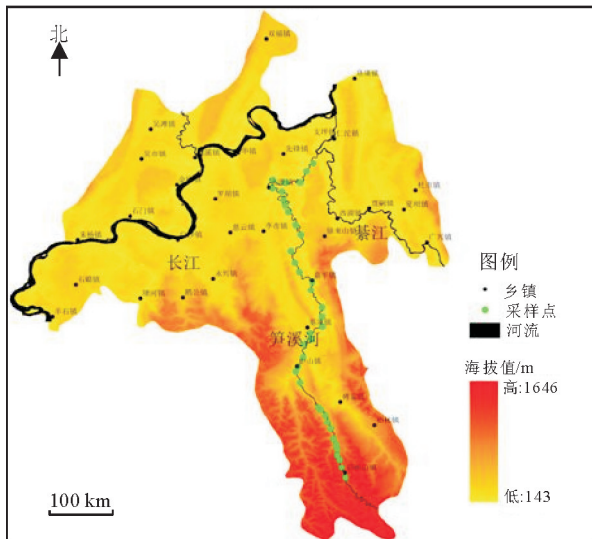


图 1 笋溪河流域水质采样点

Fig.1 Location of the water sampling sites along the Sunxi River

1.3 水质评价方法

1.3.1 单因子水质评价 根据国家《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》(简称国家标准),将每种指标的实测值与标准值进行比较,以评价水质类别,并以最差水质指标作为最终水质分级(彭文启和张祥伟,2005)。

1.3.2 综合水质标识指数评价 综合水质标识指数可以定性或定量评价水质,不受极端水质指标的

影响,可以对河流综合水质做出合理的评价(徐祖信,2005a; 2005b)。首先计算代表某一水质指标的水质类别 X_1 ,然后计算该测定数据在 X_1 类水质变化区间中所处的位置 X_2 。综合水质识别指数中还有代表劣于水环境功能目标单项指标数量的 X_3 和代表综合水质类别是否劣于水环境功能目标的 X_4 ,本文没有涉及这两部分,仅适用该方法的核心部分也就是 X_1 、 X_2 。但该方法中 X_2 仅保留 1 位有效数字,精确度较差。本文只探究水体的污染程度,故 X_2 保留 2 位有效数字。最后计算所有指标 X_1 、 X_2 的算术平均值,得到综合水质识别指数 $X_1 \cdot X_2'$ 。

1.3.3 内梅罗指数 内梅罗指数的计算参考《环境评价》(陆雍森,1999)。重庆市人民政府《渝府发[2012]4号》中规定了笋溪河水环境功能类别为Ⅲ类,对照《地表水环境质量标准 GB3838-2002》中水域功能和标准分类,在本文中均使用Ⅲ类水质标准计算内梅罗指数。本文中内梅罗指数的分级范围:Ⅰ类为 $P < 0.59$;Ⅱ类为 $0.59 \leq P < 0.71$;Ⅲ类为 $0.71 \leq P < 1$;Ⅳ类为 $1 \leq P < 3.63$;Ⅴ类为 $3.63 \leq P$ 。

1.3.4 主成分分析 主成分分析利用降维思想,将错综复杂的变量归纳总结为少数几个综合变量,每个综合变量都是原始变量的线性组合,主成分之间互不相关,却可以反映原始变量绝大部分的信息。此方法可以全面地分析水体的污染程度和主要污染类别,得出该区域污染排名状况。

1.4 数据处理与指标选择

采用 Excel 2016 和 SPSS 24 对数据进行独立样本 t 检验、相关性分析(Pearson 法)。由于《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中未对水温进行具体的规定,所以水温不能纳入综合水质标识指数评价和内梅罗指数,但水温通过影响溶解氧的饱和值,间接参与了评价。《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中对于 pH 仅有一个评价范围,Ⅰ~Ⅴ类均为 6~9,笋溪河 pH 值 7.85~8.47,均值 8.01,变异系数 1.8%,故而在综合水质标识指数评价和内梅罗指数中未纳入计算。电导率在《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中未有明确规定,在欧盟《饮用水水质指令(93/83/EC)》中规定电导率上限为 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$,本研究中电导率为 79.7~243 $\mu\text{S}/\text{cm}$,故未纳入综合水质标识指数评价和内梅罗指数计算。在主成分分析中,由于水温、pH 和电导率与其余 4 个指标有很强的相关性故将其纳入分析。对低于检测限的 COD,采用检测下限值的 1/2(2 mg/L)来进行计算(Land et al,2016)。

2 结果与分析

2.1 笋溪河流域水质现状

由表 1 可知,笋溪河水温自上游(16.34 ± 0.96) $^{\circ}\text{C}$ 到下游(17.77 ± 0.36) $^{\circ}\text{C}$ 有升高的趋势。溶解氧从上游(7.86 ± 0.48) mg/L 到下游(6.37 ± 0.33) mg/L ,有明显的下降过程,由上游的 I 类下降至 II 类(若下文中没有明确说明,则水质评价结果

均为单因子水质评价结果),根据国家标准溶解氧未发现异常。上、下游化学需氧量含量无明显差异,均为 I 类。

通过实地踏勘发现,笋溪河上游多为森林,尤其途径四面山风景区和双凤风景区,环境优美,人员分散,农田稀少,人为干扰较少。下游途径中山镇、蔡家镇、嘉坪镇和李市镇,人员集中,有大规模的种植区域以及畜牧养殖,人为干扰较多。

表 1 笋溪河水温、溶解氧、化学需氧量和采样点状况

Tab.1 Water temperature, dissolved oxygen, chemical oxygen demand and sampling site information along the Sunxi River

采样点编号	水温/ $^{\circ}\text{C}$	溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	化学需氧量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	采样点附近环境
1	16.0	7.70	8.00	笋溪河上游,水库上端
2	15.3	7.40	6.00	笋溪河上游,水库下端
3	14.6	7.70	4.00	笋溪河上游,四面山镇下方
4	15.0	8.00	-	笋溪河上游,周围植被状态良好
5	15.4	8.70	-	笋溪河上游,周围植被状态良好
6	15.9	8.10	-	笋溪河上游,周围有少许农户
7	15.6	8.70	-	笋溪河上游,周围有少许农户
8	16.1	8.10	-	笋溪河上游,周围植被状态良好
9	16.0	8.50	5.00	笋溪河上游,周围有部分耕地
10	16.9	8.10	-	笋溪河上游,周围植被状态良好
11	17.2	7.70	-	笋溪河上游,周围有部分耕地
12	17.1	8.00	-	笋溪河上游,水流缓慢,耕地较多
13	16.8	7.50	4.00	笋溪河上游,水流缓慢,耕地较多
14	17.4	7.20	5.00	笋溪河上游,水流较快,耕地多
15	17.4	7.20	5.00	笋溪河上游,中山镇前,耕地较多
16	17.5	7.70	-	笋溪河上游,中山镇中采样
17	17.6	7.30	-	笋溪河上游,中山镇后侧采样
18	18.7	6.80	-	笋溪河下游,周围农田多,主要种水稻
19	17.9	7.00	4.00	笋溪河下游,周围林地耕地交错
20	18.4	7.00	-	笋溪河下游,附近有村落
21	18.3	7.00	5.00	笋溪河下游,周围有村落林地耕地交错
22	17.7	6.60	5.00	笋溪河下游,附近有鱼塘,农户
23	17.6	6.10	8.00	笋溪河下游,月沱镇中
24	17.6	6.40	5.00	笋溪河下游,大量林地,少量坡耕地
25	17.3	6.10	6.00	笋溪河下游,嘉坪镇中
26	17.5	6.20	6.00	笋溪河下游,河岸两边耕地和林地
27	17.7	6.00	5.00	笋溪河下游,下游蓄水,水流缓慢
28	17.8	6.20	7.00	笋溪河下游,村镇地区,岸边多坡耕地
29	17.7	6.40	6.00	笋溪河下游,附近林地梯田并存
30	17.2	6.20	8.00	笋溪河下游,附近大量耕地
31	17.5	6.00	7.00	笋溪河下游,村镇所在地
32	17.4	6.20	6.00	笋溪河下游,有部分坡地种植红薯
33	17.8	6.10	5.00	笋溪河下游,附近大量园地
34	17.5	6.40	8.00	笋溪河下游,附近大量耕地,有村落
35	18.1	6.30	14.00	笋溪河下游,附近大量园地
36	18.1	6.30	8.00	笋溪河下游,附近大量园地
37	18.0	6.60	9.00	笋溪河下游,附近大量园地
38	17.7	5.90	5.00	笋溪河下游,附近部分园地
39	17.7	6.30	4.00	笋溪河下游,附近大量园地,有村落
40	17.6	6.40	5.00	笋溪河下游,附近大量园地,有村落

注:“-”表示低于检测限,无法准确度量。

Note:“-” indicates that the chemical oxygen demand was lower than the detection limit.

笋溪河 pH 值自上游到下游呈现先升高后降低最后趋于平缓的趋势(图 2), 总体来看, 整段河流水质偏碱性。1~6 号采样点河水 pH 值偏高, 而后趋于平缓, 但在 30 号采样点时突增。笋溪河全段总氮污染严重, 有 27.5% 的河段处于 III 类水质标准, 有 52.5% 的河段处于 IV 类水质标准, 17.5% 的河段处于 V 类水质标准, 2.5% 的河段处于劣 V 类(图 3); 从上游到下游表现为先增高后降低, 最后缓缓升高的

趋势。

1~6 号采样点总氮浓度缓慢上升, 这是由于笋溪河流出四面山风景区后, 途径四面山镇时, 城镇生活污水和建筑工地产生的废水导致笋溪河总氮浓度上升。然后汇入支流飞龙河后, 总氮浓度有所下降。下游几个异常点均在村落或城镇附近, 可见城镇生活污水对笋溪河总氮浓度有较大影响。笋溪河总磷浓度大多处于 II 类水质标准, 无明显异常。

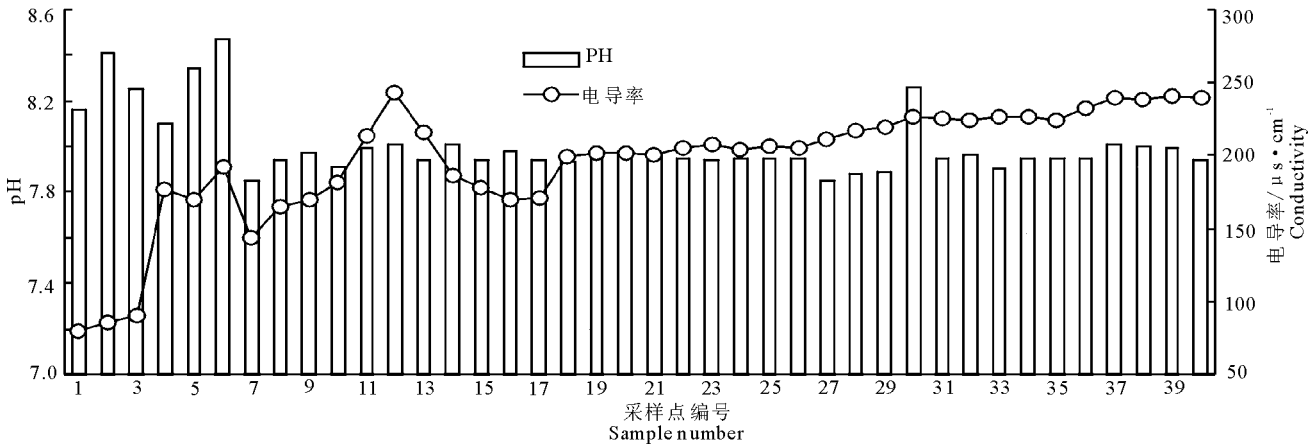


图 2 笋溪河 pH 与电导率

Fig.2 Variation in pH and conductivity of the Sunxi River

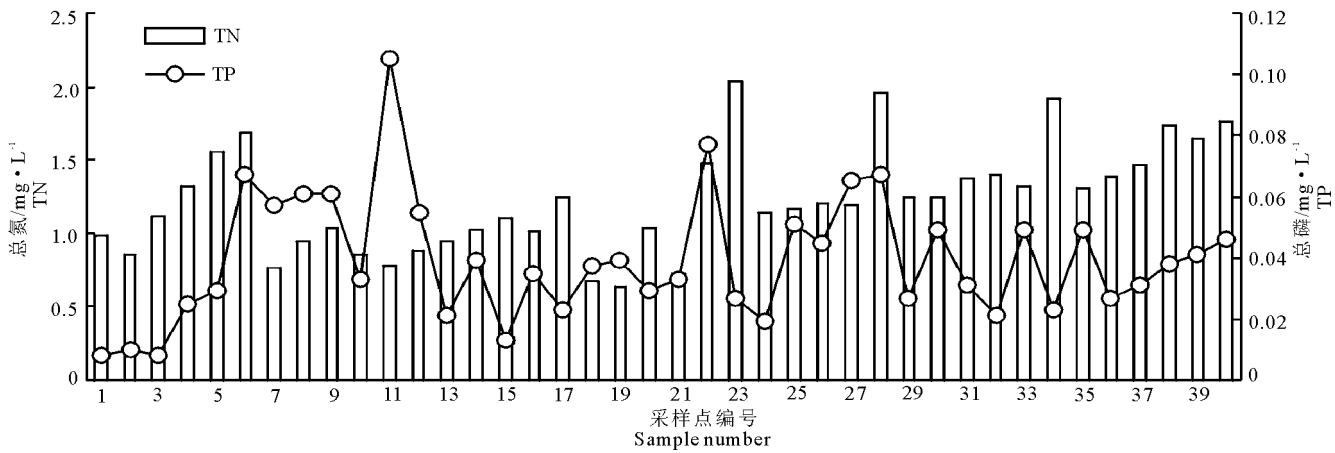


图 3 笋溪河 TN 和 TP

Fig.3 Variation in total nitrogen and total phosphorus of the Sunxi River

2.2 3 种评价方法评价笋溪河水质

2.2.1 综合水质标识指数法 根据徐祖信(2005a; 2005b)的方法, 本文计算了溶解氧、化学需氧量、总氮和总磷的综合水质标识指数, 结果如表 2 所示, 57.5% 的采样点水质处于 II 类水质标准, 其余采样点均处于 III 类水质标准, 上游(1~17 采样点)水质明显优于下游(18~40 采样点)。

2.2.2 内梅罗指数法 由 40 个采样点的内梅罗指数及其排名(表 2)可知, 20% 的采样点水质处于 II 类水质标准, 37.5% 的的采样点水质处于 III 类水质

标准, 其余采样点均处于 IV 类水质标准。上下游之间未见明显的水质差异, 但是除少数异常点外, 从上游到下游水质存在变差的趋势。

2.2.3 主成分分析法 以水温、pH、溶解氧、电导率、化学需氧量、总氮和总磷值这 7 个指标标准化后的数据进行水质评价。提取主成分时采取主成分累积贡献率高于 80%、特征值高于 1 的原则(Singh et al, 2005)。第 1、2 和 3 主成分的方差贡献率分别是 44.59%、21.57% 和 14.51%, 累积贡献率为 80.67%。第 1 主成分主要代表水体环境变化特征,

包括水温、pH、溶解氧和电导率值;第2主成分代表水体有机污染程度,包括化学需氧量;第3主成分代表水体面源污染量,包括总氮和总磷。根据各指标的得分系数,计算第1、2和3主成分的得分 P_1 、 P_2 和 P_3 。以方差贡献率为权重进行加权求和:综合得

分 $= (0.4459P_1 + 0.2157P_2 + 0.1451P_3) / 0.8067$ 。由水质评价得分(表2)可知,上游(1~17样点)得分明显低于下游(18~40样点)。1~6号采样点得分有上升的趋势,至7号采样点得分突降,然后趋于平缓,但是流经城镇时会出现突增现象。

表2 综合水质识别指数、内梅罗指数和主成分分析评价结果

Tab.2 Water quality assessment results using the comprehensive water quality identification index, Nemerow index and principal component analysis

编号	综合水质标识指数		内梅罗指数		主成分分析		编号	综合水质标识指数		内梅罗指数		主成分分析	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名		得分	排名	得分	排名	得分	排名
1	2.55	7	0.77	11	-0.63	6	21	2.60	12	0.60	3	-0.31	17
2	2.54	3	0.67	7	-0.75	5	22	3.16	33	1.42	32	0.39	27
3	2.55	5	0.93	17	-0.84	4	23	3.42	39	1.92	40	1.07	40
4	2.68	15	1.20	25	-0.56	9	24	2.86	21	1.00	18	0.08	22
5	2.73	19	1.46	33	-0.44	14	25	3.03	25	1.04	19	0.27	23
6	2.96	23	1.59	35	0	21	26	3.02	24	1.09	21	0.28	25
7	2.41	1	0.60	4	-1.27	1	27	3.08	28	1.09	20	0.27	24
8	2.58	10	0.73	9	-0.85	3	28	3.47	40	1.86	39	1.00	38
9	2.63	13	0.84	15	-0.63	7	29	2.96	22	1.15	23	0.29	26
10	2.46	2	0.66	6	-0.85	2	30	3.08	30	1.17	24	0.63	32
11	2.66	14	0.64	5	-0.55	10	31	3.11	32	1.30	28	0.58	30
12	2.54	4	0.68	8	-0.50	12	32	3.05	26	1.32	30	0.48	29
13	2.57	9	0.73	10	-0.40	15	33	3.08	29	1.24	26	0.42	28
14	2.72	18	0.82	13	-0.22	20	34	3.31	38	1.82	38	0.97	38
15	2.69	17	0.93	16	-0.25	19	35	3.20	35	1.26	27	0.96	37
16	2.59	11	0.78	12	-0.62	8	36	3.08	27	1.32	29	0.65	33
17	2.73	20	1.12	22	-0.37	16	37	3.09	31	1.41	31	0.75	35
18	2.57	8	0.55	2	-0.51	11	38	3.30	37	1.66	36	0.84	36
19	2.55	6	0.53	1	-0.47	13	39	3.17	34	1.57	34	0.63	32
20	2.69	16	0.84	14	-0.28	18	40	3.25	36	1.69	37	0.74	34

2.2.4 3种评价方法比较 对比评价结果发现,3种评价方法在评价低污染区域时,结果相差较大;但是在评价高污染区域时,结果较为接近。对3种水质评价排名进行相关性分析,结果表明:3种评价方法均存在极显著正相关,其中,主成分分析和综合水质识别指数相关系数高达0.95 ($P < 0.01, n = 40$),与内梅罗指数相关系数为0.80 ($P < 0.01, n = 40$);综合水质识别指数与内梅罗指数相关系数为0.89 ($P < 0.01, n = 40$)。

2.3 笋溪河分段水质状况

通过对笋溪河上下游水质状况进行独立样本 t 检验(表3),发现笋溪河上、下游之间,水温、pH、溶解氧、电导率、化学需氧量和总氮均存在显著差异 ($P < 0.05$),其中溶解氧为上游显著高于下游 ($P < 0.05$),其余指标均为下游显著高于上游 ($P < 0.05$)。上游总氮浓度为1.06 mg/L,显著低于下游1.35 mg/L。总磷浓度未发现明显差异 ($P > 0.05$)。

表3 笋溪河流域上下游水质状况

Tab.3 Water quality in the upstream and downstream of Sunxi River

位置	上游	下游
样点数/个	17	23
水温/ $^{\circ}\text{C}$	$16.34 \pm 0.96^{\text{A}}$	$17.77 \pm 0.36^{\text{B}}$
pH	$8.07 \pm 0.19^{\text{A}}$	$7.96 \pm 0.08^{\text{B}}$
溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$7.86 \pm 0.48^{\text{A}}$	$6.37 \pm 0.33^{\text{B}}$
电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$166.56 \pm 45.15^{\text{A}}$	$218.21 \pm 14.09^{\text{B}}$
化学需氧量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$3.35 \pm 1.87^{\text{A}}$	$6.09 \pm 2.50^{\text{B}}$
总氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.06 \pm 0.26^{\text{A}}$	$1.35 \pm 0.38^{\text{B}}$
总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.02

注:表中数据为平均值 \pm 标准差;同行不同大写字母表示上、下游之间水质指标差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: Data are presented as mean \pm SD. Different capital letters in the same column indicate significant differences between upstream and downstream ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 笋溪河水质现状

2018年10月,笋溪河监测水质为III类,部分河段为II类,流量为25.5 m/s,年径流量为

8.04 亿 m^3 。笋溪河 pH 为 7.85~8.47, 偏碱性。电导率代表水中离子浓度, 与碱度、硬度和溶解性盐有关 (Lamontagne et al, 2000)。笋溪河电导率值在 79.7~243 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 从上游到下游整体呈上升趋势, 主要是生活污水和农业生产活动的输入导致水体中离子浓度增加所致。笋溪河溶解氧在 5.9~8.7 mg/L , 属于 I 类和 II 类水质。温度、大气压和盐度是引起溶解氧数值变化主要因素, 溶解氧与温度和盐度呈负相关, 与大气压呈正相关 (Varol & Sen, 2009; Hanafiah et al, 2018)。化学需氧量是氧化水中可溶性和颗粒状有机物所需氧气的量 (Boyd, 1973), 笋溪河化学需氧量最大值为 14 mg/L , 大部分区域在 10 mg/L 以下, 属于 I 类水质。农业面源污染是河流中总氮和总磷的主要来源, 而土壤养分迁移到河流主要有 2 种形式: (1) 污染物结合在悬浮颗粒上, 随土壤流失进入水体; (2) 水溶性较强的污染物, 通过淋溶进入地表径流 (尹澄清等, 2002)。从污染物的生物地球化学循环角度来看, 面源污染实质上是一个扩散的过程, 不同养分类型间的扩散过程差异较大 (Kronyang et al, 2005)。笋溪河总磷浓度在 0.008~0.105 mg/L , 均值为 0.039 mg/L , 属于 II 类水质, 低于三峡水库中部支流汝溪河总磷浓度 0.11~0.29 mg/L (康元昊等, 2018) 和澎溪河总磷浓度 0.07 mg/L (卢珏安等, 2019)。河流中总磷来源于耕地中进行的农业活动和村镇生活污水, 说明笋溪河流域秋季耕地磷素没有过多的流失, 村镇污水中含磷量也不高。

笋溪河总氮浓度在 0.64~2.03 mg/L , 均值为 1.23 mg/L , 大多属于 IV 类水质, 低于三峡水库中段支流汝溪河总氮浓度 1.09~3.15 mg/L (康元昊等, 2018), 高于三峡水库中段支流澎溪河总氮浓度 0.73 mg/L (卢珏安等, 2019), 污染较为严重。氮素主要以 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 两种形态流失 (Moog & Whiting, 2002)。土壤对 NO_3^--N 的吸附能力较弱, NO_3^--N 容易随降雨或灌溉水淋溶进入地下水或通过地表径流汇入地表水, 从而造成水体污染。雨季的强降雨过程中, 对地表的冲刷剧烈使得河流氮含量增加。河道两边树木茂盛, 水面接受的光照强度下降, 水体中初级生产力和养分需求均下降 (Hill et al, 2001)。而土壤胶体对 NH_4^+-N 的吸附能力很强, 使得大部分可交换的 NH_4^+-N 保存在土壤中, 因此流失量小。河流中的 NH_4^+-N 主要与有机化合物或工业废水, 生活污水有关 (Grove et al, 2015)。 NH_4^+-N 硝化耗氧过程是河流生态系统中氮循环的

重要环节 (Henriksen et al, 1981), 其对河流溶解氧消耗的贡献比例最大能达到 81% (Lehman et al, 2004), 这将会严重影响到水体中的溶氧平衡, 使水体发黑发臭。

3.2 笋溪河水质评价

3 种评价结果均表明从上游到下游水体质量有所下降。1~6 号采样点, 水质得分呈上升趋势, 虽地处四面山风景区, 但笋溪河流经四面山镇以后, 未经处理的村镇生活污水排入导致污染加重。流过四面山镇后, 支流飞龙河汇入使得水质评价得分有所降低, 水体质量上升, 主要表现为溶解氧增大, 电导率、总氮和总磷浓度降低。7~40 号点水质得分逐渐上升, 水体污染程度加重。在城镇或者村落的聚集地 (如 25、28 和 34 号采样点), 由于人为因素, 包括城镇污水和陡坡地开荒种植等, 导致水体污染程度增加。

综合水质识别指数、内梅罗指数和主成分分析 3 种评价结果, 就排名来看主成分分析和综合水质识别指数相关性最高 (0.95)。主成分分析综合了全部 7 种指标的情况, 水质评价结果较为全面, 可信度较高; 缺点是不能对水质类型进行明确的分级, 没有考虑到标准值, 只能通过比较实测值得到所有采样点的水质排名情况。综合水质识别指数和内梅罗指数综合了地表水水质标准的指标, 考虑实测值和标准值, 能反映水质的平均超标程度。综合水质识别指数法可以准确地识别出每一个因子所处的水质等级以及在该等级所处的区域, 但因其计算的算术平均数是等权重思想, 忽略了各种污染物对环境的不同影响; 而内梅罗指数则在考虑平均超标水平的同时兼顾最大超标污染物。如本研究在计算过程中总氮严重超标, 其余指标均良好, 单因子水质评价结果 III 类水质 27.5%, IV 类水质 52.5%, V 类水质 17.5%, 劣 V 类水质 2.5%。与综合水质识别指数结果 II 类水质占 57.5%, III 类水质占 42.5%, 相差较大, 但与内梅罗指数结果 III 类水质 22.5%, IV 类水质 57.5% 较为接近。结合笋溪河流域高氮低磷污染现状, 本文认为内梅罗指数的评价结果最能体现该地区的水体污染现状。

3.3 笋溪河水质空间差异

对笋溪河上、下游进行独立样本 t 检验, 发现溶解氧值为上游显著高于下游, 而水温、pH、电导率、化学需氧量和总氮均为下游显著高于上游。这主要是因为上游地势陡峭, 地处四面山风景区和双凤风景区, 植被状况良好, 并且四面山自然保护区内人为

活动较少,减少了人为干扰,基本没有耕地,减少了土壤侵蚀和肥料施用。而下游区域多村镇,村镇附近有大量开垦种植的梯田,实地踏查也发现部分陡坡种植红薯等。尤其在先锋镇内梯田中大量种植花椒树,花椒基地盖度低,根系浅,施肥量大,造成该区域土地大部分裸露,暴雨会引发严重的水土流失,部分肥料未被植物利用而随地表径流流入笋溪河。此外,村镇附近大量未经处理的生活污水和人畜粪便直接排入笋溪河,导致了上游溶解氧显著高于下游,而电导率、化学需氧量和总氮下游显著高于上游。上游地区(地形陡峭)河流较浅和窄,流速较快,促进了更高的溶解氧值(Sim & Tai, 2018)。下游地区由于水土流失,加上农业径流、地表径流以及未经处理的生活污水携带氮颗粒进入河流,致使水中总氮含量超标,也会使水体电导率值增加。笋溪河高氮低磷的水质现状与韩黎阳等(2014)研究结果一致。氮磷差异主要是由于氮磷输出机制不同,即地表径流中氮素输出以水溶态为主,而磷素以泥沙结合态为主(Abrantes et al, 2010)。

一个流域内,河岸两边的植被类型、人口数量和工业布局是影响河流氮污染的重要因素(廖剑宇等, 2013; 汤云等, 2019)。笋溪河流域山区段,林地广泛分布,基本无污染源,水质较好,氮污染较轻。平原段氮素浓度较高,分析原因是笋溪河流域下游地区绝大部分为梯田、城镇和农村聚落,分布着各中小型城市,人口密集,生活污水排放量大,同时农田面积大,化肥流失严重,畜禽养殖规模较大,氮、磷等污染物多。农业面源污染排入河的大量污染物是造成笋溪河流域氮污染严重的主要原因。在后期的河流管理中,应加强城镇污水和农村污水的处理率,以消减污染负荷(降低化学需氧量、总氮和总磷排放总量)、控制水污染趋势和改善区域水环境质量。同时进行科学的水肥管理,提高肥料利用率,以减少农业面源污染,从而改善笋溪河流域水质污染现状。

本研究在空间尺度上设立了多个采样点,遍布笋溪河(重庆段),研究结果表明河流水质有明显的区域变化特征,上、下游污染情况存在显著差异。由于对笋溪河的采样仅一次,而水质受自然因素和人为因素多方面的影响处于不断的时空变化中,具有复杂性和不确定性,若能持续跟踪获得多年监测数据,进行较长时间序列分析,则更能准确把握水质的空间变化特征,为水资源的管理决策者提供更为科学可靠的结论。因此,对三峡水库笋溪河流域水质进行长时间序列的追踪研究显得尤为必要。

参考文献

- 陈洪波, 2006. 三峡库区水环境农业非点源污染综合评价与控制对策研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院.
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等, 2014. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. 环境科学, 35(3): 1091 - 1097.
- 康元昊, 施军琼, 杨燕君, 等, 2018. 三峡库区汝溪河浮游植物动态及其与水质的关系[J]. 水生生态学杂志, 39(6): 23 - 29.
- 廖剑宇, 彭秋志, 郑楚涛, 等, 2013. 东江干流水体氮素的时空变化特征[J]. 资源科学, 35(3): 505 - 513.
- 娄保锋, 臧小平, 吴炳方, 2011. 三峡水库蓄水运用期化学需氧量和氨氮污染负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 20(10): 1268 - 1273.
- 卢珏安, 谌书, 蒋卉, 等, 2019. 三峡水库典型支流水体氮磷分布特征及污染评价[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 44(1): 104 - 112.
- 陆雍森, 1999. 环境评价[M]. 上海: 同济大学出版社.
- 彭滔, 邵景安, 王金亮, 等, 2016. 三峡库区(重庆段)农村面源污染驱动因素分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 38(3): 126 - 135.
- 彭文启, 张祥伟, 2005. 现代水环境质量评价理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 乔卫芳, 牛海鹏, 赵同谦, 2013. 基于 SWAT 模型的丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 22(2): 219 - 225.
- 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 等, 2018a. 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征[J]. 环境科学, 39(5): 2135 - 2144.
- 苏青青, 刘德富, 刘绿波, 等, 2018b. 三峡水库蓄水期支流水体营养盐来源估算[J]. 中国环境科学, 38(10): 3925 - 3932.
- 汤云, 卢毅敏, 吴升, 2019. 闽江流域水质时空分布特征及污染源解析[J]. 长江科学院院报, 36(8): 30 - 35, 48.
- 徐祖信, 2005a. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(4): 482 - 488.
- 徐祖信, 2005b. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(3): 321 - 325.
- 尹澄清, 毛战坡, 2002. 用生态工程技术控制农村非点源水污染[J]. 应用生态学报, 13(2): 229 - 232.
- 张广纳, 邵景安, 王金亮, 2015. 基于农业面源污染的三峡库区重庆段水质时空格局演变特征[J]. 自然资源学报, 30(11): 1872 - 1884.
- Abrantes N, Pereira R, Figueiredo D R D, et al, 2010. A whole sample toxicity assessment to evaluate the sub-lethal toxicity of water and sediment elutriates from a

- lake exposed to diffuse pollution[J]. *Environ Toxicol*, 24 (3): 259 - 270.
- Boyd C E, 1973. The chemical oxygen demand of waters and biological materials from ponds[J]. *T Am Fish Soc*, 102 (3): 606 - 611.
- Collos Y, Harrison P J, 2014. Acclimation and toxicity of high ammonium concentrations to unicellular algae[J]. *Mar Pollut Bull*, 80 (1/2): 8 - 23.
- Grove M K, Bilotta G S, Woockman R R, et al, 2015. Suspended sediment regimes in contrasting reference-condition freshwater ecosystems: Implications for water quality guidelines and management[J]. *Sci Total Environ*, 502: 481 - 492.
- Hanafiah M M, Yussof M K M, Hasan M, et al, 2018. Water quality assessment of Tekala River, Selangor, Malaysia [J]. *Appl Ecol Env Res*, 16 (4), 5157 - 5174.
- Henriksen K, Hansen J I, Blackburn T H, 1981. Rates of nitrification, distribution of nitrifying bacteria, and nitrate fluxes in different types of sediment from Danish waters[J]. *Mar Biol*, 61 (4): 299 - 304.
- Hill W R, Mulholland P J, Marzolf E R, 2001. Stream ecosystem responses to forest leaf emergence in spring[J]. *Ecology*, 82 (8): 2306 - 2319.
- Lamontagne S, Carignan R, D'Arcy P, et al, 2000. Element export in runoff from eastern canadian boreal shield drainage[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 57 (S2): 118 - 128.
- Land, M, Granéli W, Grimvall, A, et al, 2016. How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review[J]. *Environ Evi*, 5 (1): 9.
- Lehman P W, Sevier J, Giulianotti J, et al, 2004. Sources of oxygen demand in the lower San Joaquin River, California[J]. *Estuaries*, 27 (3): 405 - 418.
- Ludwig R, Pringault O, Wit R D, et al, 2010. Limitation of oxygenic photosynthesis and oxygen consumption by phosphate and organic nitrogen in a hypersaline microbial mat: a microsensor study[J]. *Fems Microbiol Ecol*, 57 (1): 9 - 17.
- Moog D B, Whiting P J, 2002. Climatic and agricultural factors in nutrient exports from two watersheds in Ohio [J]. *J Environ Qual*, 31 (1): 72 - 83.
- Sim S F, Tai S E, 2018. Assessment of a physicochemical indexing method for evaluation of tropical river water quality[J]. *J Chem-ny* (2018): 1 - 12.
- Singh K P, Malik A, Sinha S. 2005. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques-a case study[J]. *Anal Chim Acta*, 538 (1): 355 - 374.
- Varol M, Sen B, 2009. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Behrimaz Stream, Turkey[J]. *Environ Monit Assess*, 159 (1/2/3/4): 543 - 553.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Assessment and Spatial Variation of Water Quality in the Sunxi River Basin in the Three Gorges Reservoir Area

ZHENG Yong-lin¹, WANG Hai-yan¹, QIN Qian-qian¹, YANG Dan-dan¹,
WANG Yi-ge¹, ZHANG Zheng-gui²

(1.College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P.R.China;

2.Forest Resources Administration Bureau, Simianshan Town, Jiangjin District, Chongqing 402296, P.R.China)

Abstract: Non-point source (NPS) pollution is a primary threat to the aquatic environment and it is therefore important to strengthen research on river NPS pollution to support conservation of river ecosystems. To understand the status of NPS pollution in the Three Gorges Reservoir area, we analyzed the pollution status and spatial variation of dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the Sunxi River basin, located in the Jiangjin District of Chongqing City. The water quality of Sunxi River basin was assessed using the comprehensive water quality identification index, the Nemerow index and principal component analysis. In October 2018, water samples were collected at 40 sampling sites from upstream to downstream along the Sunxi River, and seven water quality parameters were measured, including water temperature (WT), pH, conductivity, DO, COD, TN and TP. Results show that: (1) WT increased from upstream ($16.34 \pm 0.96^\circ\text{C}$) to downstream ($17.77 \pm 0.36^\circ\text{C}$). The ranges of DO (5.98 – 8.7 mg/L), COD (2 – 14 mg/L) and TP (0.008 – 0.105 mg/L) all fell between national standards for Class I and Class II water bodies (GB3838 – 2002), and TN (0.64 – 2.03 mg/L) was classified as Class III and V, indicating serious pollution in Sunxi River. (2) Water quality evaluation by the three water quality assessment methods all show that downstream water quality was inferior to upstream, but the Nemerow index better reflects local water quality status. (3) In terms of the spatial distribution, DO was significantly higher upstream, but WT, pH, conductivity, COD and TN were significantly higher downstream ($P < 0.05$). The difference between upstream and downstream TP was not significant. To improve the regional water environment quality, we recommend reducing pollutant loads and improving treatment of urban and rural sewage and using less water and fertilizer.

Key words: Sunxi River; Three Gorges Reservoir area; non-point source pollution; nitrogen pollution; water quality assessment