

香溪河梯级小水电站对河流生态系统功能的影响

吴乃成^{1, 2} 唐涛¹ 周淑婵^{1, 2} 蒋万祥¹ 傅小城¹ 李凤清¹ 蔡庆华^{1†}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室,

湖北 武汉 430072; 2. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211)

【摘要】: 香溪河是长江三峡水库湖北省最大且靠近坝首的支流, 干流全长 94km, 流域面积为 3099km², 其水能资源丰富, 自然落差达 1540m。以香溪河流域内的 18 座小水电站为研究对象, 于 2005 年 10 月 20 日至 11 月 1 日分别对河流主要理化指标及生态系统功能(以附石藻叶绿素 a 浓度为代表)进行测量, 分析其对梯级水电站建设的响应。结果表明: 5 条河流(包括香溪河干流和 4 条主要支流)的空间异质性较大; 从全流域来看, 各主要理化因子如溶解氧、水深、浊度、流速等与附石藻叶绿素 a 含量相关性很高, 但不同支流的主要影响因子各异, 证明了流域空间异质性对研究小水电的影响具有重要作用; 梯级小水电站建设对河流生态系统功能已产生显著影响, 特别是在取水口下游的 3 号样点。由于取水造成的断流现象严重(采样时期, 50% 的电站出现断流, 最长距离达 3.2km), 因此在枯水期确定河流的最低生态需水量, 是一个亟待解决的问题。从流域角度出发, 通过多学科交叉手段研究小水电站建设如何与其他环境胁迫因子交互作用, 如何共同影响河流生物多样性、生态系统结构、功能与服务。这将是流域水电站管理的重要抓手及解决途径, 也是未来河流生态学的研究重点。

【关键词】: 梯级小水电站 叶绿素 a 浓度 空间异质性 流域水电管理

【中图分类号】: X321 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1458-08

小型水电站(<10MW)通常建在具有高海拔梯度的山区河流中, 这些生态系统通常支持适应激流生境的独特动植物群落^[1]。与大型水坝不同, 小水电站需要建设远程取水坝(约 3~5km 的距离), 通过取水管将上游河水持续地输送到下游的发电站。因此被作为清洁能源而广泛开发。同时, 许多当地政府也在补贴小水电站建设, 他们认为与大型水电站相比, 小水电站对河流生态的不利影响较小^[2]。目前来看, 全球小水电站数量已远远超过大型水坝数量: 综合数据显示, 在 150 个国家中正在运营或正在建设的小水电站有 82891 个。若将所有水力潜能开发, 还可建设 181976 个新的小水电站^[3]。中国小水电站的数量已超过 45000, 总装机容量超过 68GW, 位居世界第一。小水电站约占中国总发电量的 5%, 是农村电气化的主要支柱^[4]。因此, 小水电站在确保中国区域电力供应方面发挥着不可替代的作用。然而, 它们对包括水量、水质、生物多样性及渔业在内的生态系统服务的负面影响却受到越来越多的关注。小水电站建设会干扰甚至阻断上下游沉积物和养分的传输, 并最终破坏河流生态连通性, 进而影响河流生态功能与服务^[5~7]。此外, 这些水坝改变了水流状态并阻碍了生物群落的扩散和迁移, 这可能导致基因多样性减少, 并增加了敏感物种灭绝的风险^[8]。前期研究主要分析了小水电站建设对河流理化条件^[9]、底栖藻类^[6, 7]、河流浮游生物^[10, 11], 大型无脊椎动物^[12, 13]、鱼类^[14]及生物多样性动态^[8]等的影响。但与对大型水坝的深入研究相比, 关于小水电站在局域和流域尺度上对河流生态系统功能和服务的影响仍然较少^[8]。此外, 虽然生境变化对鱼类群落的影响方面已达成共识^[9, 14], 但对藻类、底栖动物生物量、群落组成和生物多样性的影响结果仍然具有分歧, 并受到空间异质性的显著影响^[8]。

作者简介: 吴乃成(1981~), 男, 教授, 主要研究方向为流域生态学、水文生态学及流域管理. E-mail: naichengwu88@gmail.com
蔡庆华 E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506406); 国家自然科学基金重点项目(30330140)

发源于神农架保护区的香溪河是长江三峡水库湖北省最大且靠近坝首的支流,干流全长 94km,流域面积为 3099km²[15~17],其水能资源丰富,自然落差达 1540m,年产水量 19.56 亿 m³[15]。流域内小水电站的梯级开发比较严重^[4],因此是研究流域梯级小水电站对河流生态系统影响的理想之地。然而,该区域的前期研究主要集中在物种组成、生物多样性等^[6,7,10~12]方面,对河流生态系统功能影响的研究较少。叶绿素 a 浓度是生态系统功能的重要指示指标之一^[18,19]。具有普生性的附石藻类是河流生态系统中的主要初级生产者,是维持河流生态系统功能与服务的重要组成部分,而且附石藻类对水质及生境变化具有快速反应性^[15,17]。在香溪河流域,有关附石藻类的研究很多^[6,15,20,21],但关于小水电站的开发对河流生态系统功能的影响却未有报道。因此,本文以附石藻叶绿素 a 浓度为研究对象,分析其在梯级小水电建设后的响应,探讨该影响的空间异质性(即不同支流的差异性),以期合理的水电开发和管理提供基础数据和科学依据。

1 材料与方方法

1.1 样点设置及研究区域概况

于 2005 年 10 月 20 日至 11 月 1 日,对香溪河流域内干流及 4 个主要支流水系(九冲河、古夫河、高岚河和孔子河)的 18 座小水电站(图 1)进行附石藻样品采集。分别在电站的取水口上游(约 200m)、取水口处、取水口下的水塘内、出水口上游(约 200m)和出水口处采样,样点名称分别为:1、2、3、4 和 5,电站名称以其英文缩写代替,例如:小当阳电站的 1 号样点记做 XDY1,其它样点依次类推。

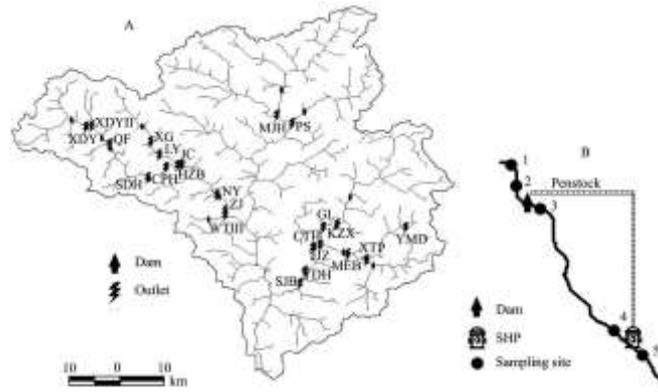


图 1 小水电站分布及样点示意图

1.2 采样方法

随机选取 3~5 块代表性的石头,在石块表面固定一定的面积(本次实验用半径为 2.7cm 的圆盖),先将盖子周围的藻类刷掉,再用无藻水将石头表面的附石藻类清洗干净,充分摇匀后装入 100mL 标本瓶,抽滤后冰冻保存,以测定附石藻类叶绿素 a 的含量。具体方法参考文献^[22]。现场用 GPS 测定样点坐标;用卷尺测量样点河段的水面宽度和平均水深;用 LJD 型打印式流速仪测定断面流速;用 Horiba 测量 pH、溶解氧(DO)、电导(COND)、总溶解性颗粒物(TDS)等因子。

1.3 数据分析

统计分析用 SPSS(10.0)软件进行,用双因素方差分析(Two-way ANOVA)分析电站间及内部 5 个样点间的差异性($P < 0.05$),用 Bivariate Correlations 分析各物理指标与附石藻类叶绿素 a 浓度的相关性($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 主要理化指标在各支流间的比较

Almodóvar 等^[23]、Parasiewicz 等^[24]认为流速改变是小水电开发对河流生态系统的主要影响,同时 Leland 等^[25]也提出水深是河流浮游藻类群落空间分布的主要水文特征。虽然这两个因素在香溪河干流及其 4 个支流间差异不显著($P>0.05$) (表 1),但 pH、COND、DO、TDS、 Cl^- 、 Ca^{2+} 则差异极其显著($P<0.001$)。这表明香溪河流域不同河流具有空间异质性特征,因此有必要分别讨论各流域内小水电开发对附石藻叶绿素 a 浓度的影响。

表 1 主要理化指标在香溪河干流及其支流的变化趋势

	香溪河干流	九冲河	古夫河	高岚河	孔子河
pH ^{***}	7.64±0.25	8.08±0.18	7.12±0.23	8.22±0.62	8.74±0.14
COND(ms/m) ^{***}	20.65±2.81	27.60±1.35	37.48±2.24	29.62±6.15	37.20±1.65
TURB(NUT) ^{***}	42.83±7.68	40.42±7.03	13.19±4.34	45.34±9.76	43.83±3.51
DO(mg/L) ^{***}	9.88±0.52	9.53±0.54	11.46±0.57	9.70±0.76	10.74±1.98
TDS(g/L) ^{***}	0.14±0.02	0.18±0.01	0.23±0.01	0.19±0.04	0.24±0.01
Cl^- (mg/L) ^{***}	10.00±6.11	9.48±3.40	11.94±1.28	15.74±2.07	12.10±0.75
Ca^{2+} (mg/L) ^{***}	2.90±0.13	3.17±0.16	2.84±0.10	3.04±0.24	3.09±0.18
河宽(m) [*]	19.12±9.29	11.30±6.64	12.50±8.80	19.50±9.00	20.06±8.35
水深(m)	0.59±0.24	0.48±0.25	0.41±0.21	0.60±0.99	0.31±0.12
流速(m/s)	0.43±0.43	0.40±0.38	0.48±0.35	0.39±0.32	0.53±0.33
Chla(mg/m ²)	17.26±14.88	6.18±3.32	19.69±11.71	15.00±14.62	13.37±14.38

2.2 叶绿素 a 浓度在各河流中的变化及与环境因子的关系

香溪河干流

香溪河干流小水电站开发比较严重,自 20 世纪 60 年代以来,修建的小水电站近 20 个^[26]。如图 2,不同样点之间,从样点 1~3 附石藻叶绿素 a 浓度依次升高,样点 4 降低,5 号样点又增大;而不同电站之间,由上到下游附石藻叶绿素 a 浓度呈现增加趋势(除苍坪河 CPH 电站外),这主要是由温度升高所引起的。

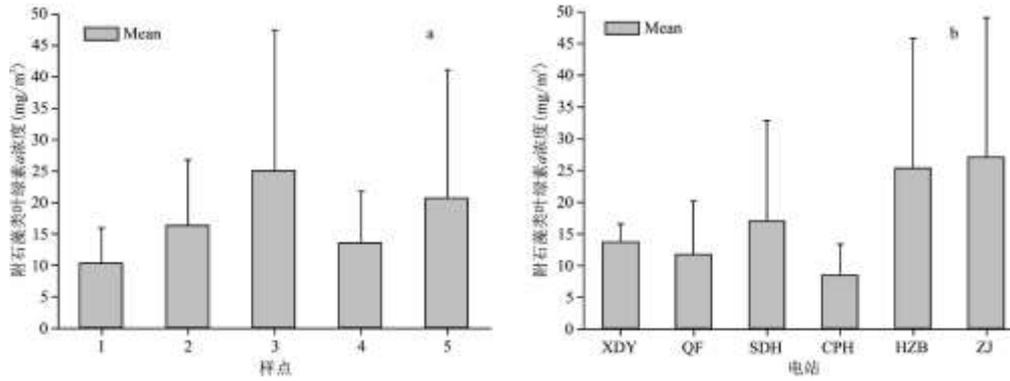


图 2 香溪河干流小水电站附石藻叶绿素 a 浓度的变化趋势 (a: 样点间, b: 电站间)

相关分析显示, 水深(5 个样点间差异显著, $F=5.479, P<0.01$)与叶绿素 a 浓度显著正相关($r=0.390, P<0.05$) (表 2)。这与 Leland 等^[26]的结果相一致。因为沉积作用, 水深是影响有机物质流失的重要因素^[27]。电站取水坝的建立, 使样点 3 的流速变为 0, 水深增加, 同样在 5 号样点因电站出水的冲击在河道内形成了一个流速相对较小的水塘, 因此样点 3、5 沉积增加, 有机物质积聚, 其叶绿素 a 浓度均显著高于其相邻样点。

表 2 叶绿素 a 浓度与环境因子的相关系数

	香溪干流	九冲河	古夫河	高岚河	孔子河	全流域
pH	0.270	-0.463	-0.049	0.468*	-0.234	0.038
TURB (NUT)	0.015	-0.691*	0.236	-0.007	-0.554	-0.101
DO (mg/L)	-0.001	-0.511	0.313	0.219	0.826**	0.303**
河宽 (m)	-0.226	-0.261	-0.188	0.601**	0.488	0.157
水深 (m)	0.390*	0.578	0.094	0.397	0.390	0.322**
流速 (m/s)	-0.090	-0.226	0.175	-0.110	-0.831**	-0.140

九冲河

它是香溪河上游的一大支流, 虽然长度很短(约 18km), 但自然落差较大, 境内小水电站有 5 个(包括东沟电站、齐沟电站), 上一个电站的出水不经过河道直接被下个电站取走, 所以仅采得样点 1、2、3 的附石藻类。与干流相似, 叶绿素 a 浓度在电站间和内部均存在一定的差异(图 3), 但因境内电站的梯级开发尤为严重, 河道内除少量的山体渗透和地表径流水外, 几乎干枯(电站取水坝下游的平均断流长度约 0.5km, JC 电站竟长达 1.3km), 所以对整条河来说, 生态系统功能的丧失不容忽视。

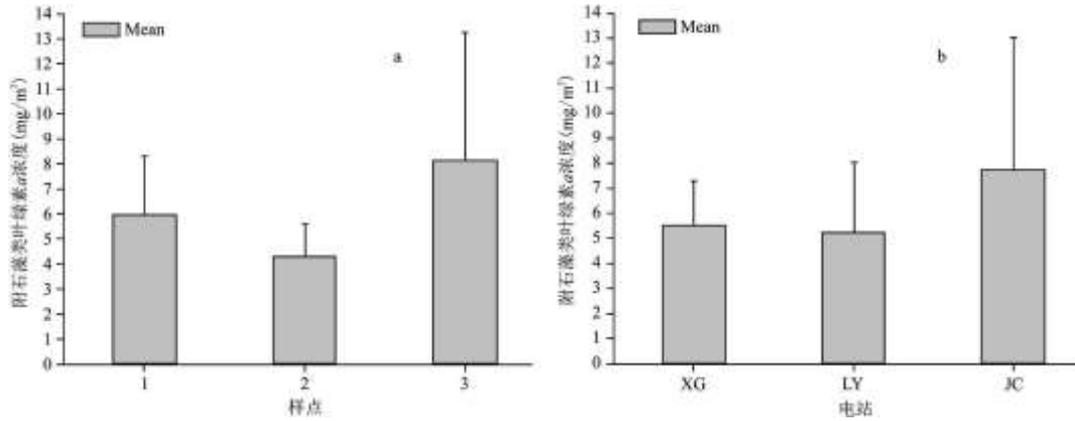


图3 九冲河小水电站附石藻叶绿素 a 浓度的变化趋势 (a:样点间, b:电站间)

相关分析显示, 浊度 (TURB) 是影响九冲河叶绿素 a 浓度的主要环境因子 ($r=-0.691, P<0.05$) (表 2)。浊度可以影响河流底部的光照强度, 而光照是藻类进行光合作用的必要条件。Stephens^[28] 发现在高低光照条件下, 硅藻群落组成有显著差异; Roberts 等^[29] 也认为: 藻类群落在形成优势的过程中, 物种对光照条件的适应性是至关重要的。Hillebrand^[30] 也指出: 在控制附石藻类生物量的方法中, 光照有着与营养元素同样重要的作用。因此, 浊度的大小也可以间接影响叶绿素 a 含量。

古夫河

它是香溪河中游的一大支流, 其流域面积明显大于九冲河, 但本次研究只对两个较大的电站 (马家河, MJH 与平水电站, PS) 进行采样。该河主要的两个蓄水型电站 (古洞口一、二级电站) 另做研究。由图 4 可见, 叶绿素 a 浓度从样点 1~5 逐渐增大, 而且两个电站的变化趋势相同。相关分析表明, 所测几项理化指标均与其无显著相关性 ($P>0.05$), 因此推断, 在古夫河附石藻类叶绿素 a 浓度可能与小水电的开发关系不大, 而与其它一些物理因素 (如海拔、光照等) 关系显著。March 等^[31] 认为, 海拔、光照等因子可以决定附石藻类的分布。

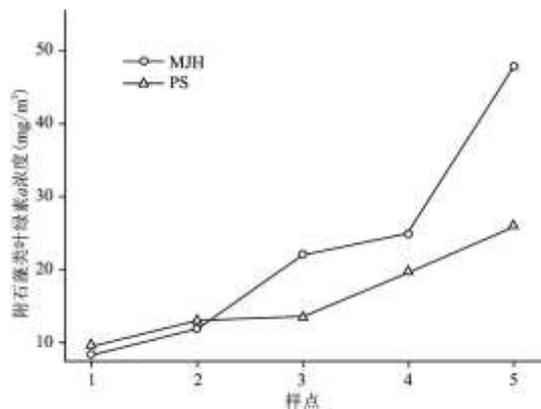


图4 古夫河小水电站附石藻叶绿素 a 浓度的变化趋势

高岚河

它是香溪河下游的一大支流, 采样时期该河的下游河段已经成为香溪河库湾的一部分。与香溪河干流相似, 附石藻类叶绿素 a 浓度在 3 号点最大, 1、2、4 号样点相似, 3、5 号样点几乎相同 (图 5a)。在电站之间 (图 5b), 从上游的学堂坪电站 (XTP) 到

杨道河电站 (YDH) 呈明显的递增趋势。双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 表明: 5 个电站间的差异显著 ($F=3.517, P<0.05$)。相关分析结果说明, 平均河宽和 pH 与叶绿素 a 浓度显著相关 ($P<0.05$)。河宽和水深等物理干扰对附石藻类结构和功能的显著影响, 现已被广泛认可^[32]。Tang 等^[20]、Pan 等^[33]也证明 pH 与附石藻类的分布密切相关。

孔子河

它是高岚河的一条重要支流, 境内森林覆盖较好, 且人群居住稀疏, 对河流几乎没有任何破坏, 因此, 在这里的研究意义重大, 更能准确地揭示水电开发对河流生态系统的影响。所以我们将建于该河的孔子峡 (KZX) 和高岚电站 (GL) 也作为分析的一部分。如图 6, 附石藻类叶绿素 a 浓度在电站内部变化明显, 3 号样点明显增大, 而其它样点基本相似; 两个电站的平均浓度相当 (KZX: $15.14\text{mg}/\text{m}^3$; GL: $11.60\text{mg}/\text{m}^3$)。方差分析表明, 样点 3 与其它样点浓度显著不同 ($F=64.03, P<0.001$)。相关分析表明, 平均流速和溶解氧 (DO) 浓度与叶绿素 a 浓度显著相关 ($P<0.01$) (表 2)。流速改变是小水电开发对河流生态系统的主要影响。与多数小水电站一样, 由于取水坝的建设, 样点 3 的流速、水深均与其它样点不同 (流速变小为 0, 水深也明显增大), 叶绿素 a 浓度受到了很大影响; 同时, DO 也是附石藻类的重要影响因子, Phillips 等^[34]研究发现 DO 与一种藻类 (*Peridinium aciculiferum*) 的密度显著相关 ($P=0.019$), Schönfelder 等^[35]应用 CCA 分析也发现 DO 是藻类分布的最重要因素 ($P<0.01$)。

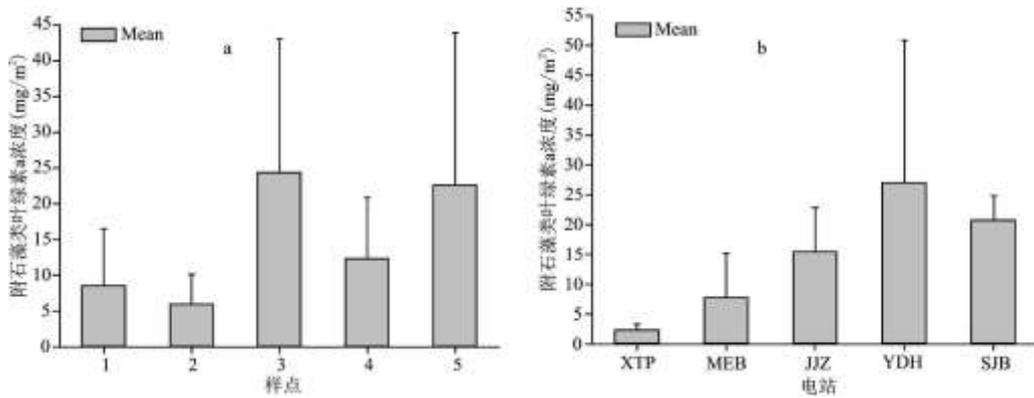


图 5 高岚河小水电站附石藻叶绿素 a 浓度的变化趋势 (a: 样点间, b: 电站间)

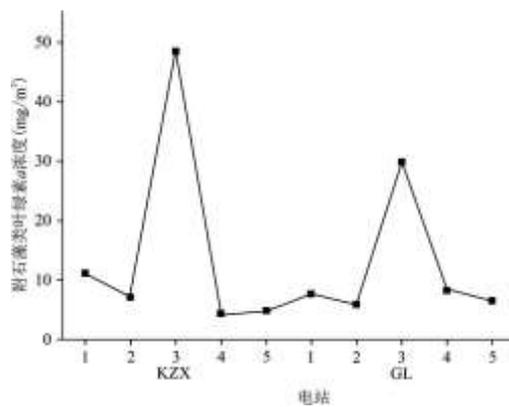


图 6 孔子河小水电站附石藻叶绿素 a 浓度的变化趋势

3 结论

根据河流连续统理论^[36],河流是一个连续且完整的生态系统,从较小的上游源头到下游开阔的河段其外源和内源性的营养物质具有连续的变化。这种连续不仅指地理空间上的连续,更是生态系统结构、功能和生态过程的连续。小水电站特别是梯级小水电站建设势必引起河流连续统的破坏,从而影响河流水生生物的物种组成及分布,进而影响河流生态系统的功能。本研究结果也证明了上述假设:梯级小水电站建设对河流生态系统功能(以附石藻叶绿素 a 含量为代表)已产生显著影响,特别是在取水口下游的 3 号样点(多数样点的流速变为 0),成为受影响最大的点(古夫河除外),与其邻近的上游样点相比,其叶绿素 a 浓度均出现不同程度的增高。

从全流域来看,各主要理化因子如 DO、水深、浊度、流速等与附石藻叶绿素 a 含量相关性很高($P < 0.01$) (表 2),但不同支流的主要影响因子各异。这证明流域空间异质性对研究小水电的影响具有重要作用,也说明对小水电研究进行“一站一策”的重要性。

此外,由于电站取水造成的河流断流现象不容忽视。采样期间,因小水电站建设 50%的河流出现了断流,其中 MJH 电站出现了长达 3.2km 的断流河段。因此对水电开发和管理者来说,在枯水期如何避免或减少小水电站开发对河流生态系统的影响。确定河流的最低生态需水量,是一个亟待解决的问题。同时,考虑到淡水生态系统正受到多重环境胁迫因子(如富营养化、全球变暖、河道及水文节律改变等)的影响,生物多样性正以前所未有的速度下降^[37,38]。从流域角度出发,通过多学科交叉手段研究小水电站建设如何与其他环境胁迫因子交互作用,如何共同影响河流生物多样性、生态系统结构、功能与服务。这将是流域水电管理的重要抓手及解决途径,也是河流生态学的研究重点。

参考文献:

- [1] ZARFL C, LUMSDON A E, BERLEKAMP J, et al. A global boom in hydropower dam construction[J]. *Aquatic Sciences*, 2015, 77(1):161-170.
- [2] KIBLER K M, TULLOS D D. Cumulative biophysical impact of small and large hydropower development in Nu River, China[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6):3104-3118.
- [3] COUTO T B, OLDEN J D. Global proliferation of small hydropower plants—science and policy[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(2):91-100.
- [4] CHENG C T, LIU B X, CHAU K W, et al. China's small hydropower and its dispatching management[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42:43-55.
- [5] JENKINS K M, BOULTON A J. Connectivity in a dryland river: Short-term aquatic microinvertebrate recruitment following floodplain inundation[J]. *Ecology*, 2003, 84(10):2708-2723.
- [6] WU N C, CAI Q H, FOHRER N. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity (D-IBI) for rivers impacted by Run-of-river dams[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18:108-117.
- [7] WU N C, TANG T, FU X C, et al. Impacts of cascade Run-of-river dams on benthic diatoms in the Xiangxi River, China[J]. *Aquatic Sciences*, 2010, 72(1):117-125.
- [8] LANGE K, MEIER P, TRAUTWEIN C, et al. Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(7):397-404.

-
- [9]ANDERSON D,MOGGRIDGE H,WARREN P,et al.The impacts of ‘Run-of-river’ hydropower on the physical and ecological condition of rivers[J].Water and Environment Journal,2015,29(2):268-276.
- [10]ZHOU S C,TANG T,WU N C,et al.Impacts of a small dam on riverine zooplankton[J].International Review of Hydrobiology,2008,93(3):297-311.
- [11]吴乃成,唐涛,周淑婵,等.香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响[J].应用生态学报,2007,18(5):1091-1096.
- [12]傅小城,吴乃成,周淑婵,等.引水型电站对河流底栖动物栖息地的影响及生态需水量[J].生态学报,2008,28(5):1942-1948.
- [13]ALMEIDA E F,OLIVEIRA R B,MUGNAI R,et al.Effects of small dams on the benthic community of streams in an Atlantic forest area of Southeastern Brazil[J].International Review of Hydrobiology,2009,94:179-193.
- [14]TURGEON K,TURPIN C,GREGORY-EAVES I.Dams have varying impacts on fish communities across latitudes:a quantitative synthesis[J].Ecology Letters,2019,22:1501-1516.
- [15]贾兴焕,吴乃成,唐涛,等.香溪河水系附石藻类的时空动态[J].应用生态学报,2008,19(4):881-886.
- [16]唐涛,黎道丰,潘文斌,等.香溪河河流连续统特征研究[J].应用生态学报,2004,15(1):141-144.
- [17]唐涛,渠晓东,蔡庆华,等.河流生态系统管理研究——以香溪河为例[J].长江流域资源与环境,2004,13(6):594-598.
- [18]LOHRER A M,THRUSH S F,HEWITT J E,et al.The up-scaling of ecosystem functions in a heterogeneous world[J].Scientific Reports,2015,5:10349-10349.
- [19]THOMPSON P L,DAVIES T J,GONZALEZ A.Ecosystem functions across trophic levels are linked to functional and phylogenetic diversity[J].Plos One,2015,10:e0117595.
- [20]TANG T,CAI Q H,LIU R Q,et al.Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors [J].Journal of Freshwater Ecology,2002,17(3):345-352
- [21]TANG T,QU X D,LI D F,et al.Benthic algae of the Xiangxi River,China[J].Journal of Freshwater Ecology,2004,19(4):597-604
- [22]黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社,2000:95-120.
- [23]ALMODÓVAR A,NICOLA G G.Effects of a small hydropower station upon brown trout *Salmo trutta* L. in the River Hoz Seca (Tagus basin,Spain) one year after regulation [J].Regulated Rivers:Research & Management,1999,15(5):477-484.
- [24]PARASIEWICZ P,SCHMUTZ S,MOOG O.The effect of managed hydropower peaking on the physical habitat,benthos and fish fauna in the River Bregenzerach in Austria [J].Fisheries Management and Ecology,1998,(5):403-417.

-
- [25]LELAND H V, BROWN L R, MUELLER D K. Distribution of algae in the San Joaquin River, California, in relation to nutrient supply, salinity and other environmental factors [J]. *Freshwater Biology*, 2001, 46(9):1139-1167.
- [26]唐涛. 香溪河附石藻类特征及河流生态系统管理研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2003:10-15.
- [27]BAHNWART M, HÜBENER T, SCHUBERT H. Downstream changes in phytoplankton composition and biomass in a lowland river-lake system (Warnow River, Germany) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 391(1-3):99-111.
- [28]STEPHENS S H, SMITH C M. Effects of light and nutrients on periphyton community composition in a Hawaiian Stream [J]. *Journal of Phycology*, 2003, 39 (s1):54-54.
- [29]ROBERTS S, SABATER S, BEARDALL J. Benthic microalgal colonization in streams of differing riparian cover and light availability [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40(6):1004-1012.
- [30]HILLEBRAND H. Light regime and consumer control of autotrophic biomass [J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(4):758-769.
- [31]MARCH J G, PRINGLE C P, TOWNSEND M J, et al. Effects of freshwater shrimp assemblages on benthic communities along an altitudinal gradient of a tropical island stream [J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(3):377-390.
- [32]LUTTENTON M R, BAISDEN C M. The relationships among disturbance, substratum size and periphyton community structure [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 561(1):111-117
- [33]PAN Y D, STEVENSON R J, HILL B H, et al. Using diatoms as indicators of ecological conditions in lotic systems: A regional assessment [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(4):481-495.
- [34]PHILLIPS K A, FAWLEY M W. Winter phytoplankton blooms under ice associated with elevated oxygen levels [J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38(6):1068-1073.
- [35]SCHÖNFELDER I, GELBRECHT J, SCHÖNFELDER J, et al. Relationships between littoral diatoms and their chemical environment in Northeastern German lakes and rivers [J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38(1):66-89.
- [36]VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37:130-137.
- [37]WU N C, THODSEN H, ANDERSEN HE, et al. Flow regimes filter species traits of benthic diatom communities and modify the functional features of lowland streams—a nationwide scale study [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651:357-366.
- [38]REID A J, CARLSON A K, CREED I F, et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity [J]. *Biological Reviews*, 2019, 94(3):849-873.