

多尺度环境因子对神农架香溪河流域底栖藻类的影响

杨顺益^{1, 2} 李杨^{1, 2} 王勖² 谭路¹ 唐涛¹ 蔡庆华¹¹

(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. 长江航务管理局环境监测中心站, 湖北 武汉 430019)

【摘要】: 相比单一尺度的环境因子, 多尺度环境因子能更全面的反映流域水生生物空间分布。以香溪河流域溪流底栖藻类为例, 选择海拔、土地利用、水质和水文指标, 采用偏冗余分析和偏典范对应分析对四季的底栖藻类营养硅藻指数(TDI)、物种丰富度和群落组成进行方差分解, 分析大小尺度环境因子分别对底栖藻类空间分布的影响程度。结果显示: (1) TDI 主要受到小尺度环境因子影响, 解释率均为 100%, 无交互作用; (2) 物种丰富度在不同季节分别受到大尺度和小尺度环境因子的影响, 解释率均为 100%, 无交互作用; (3) 底栖藻类组成主要受海拔的影响, 并且与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 有交互作用, 为 43%。虽然结果表明更多的小尺度环境因子对底栖藻类具有影响, 但不能否认大尺度环境因子对整个流域底栖藻类分布的影响是长期而稳定的。

【关键词】: 神农架 香溪河流域 多尺度环境因子 底栖藻类

【中图分类号】: X173; X143 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1437-08

流域生态学(Watershed Ecology)理论的提出将对水体本身的研究扩展至整个流域, 囊括了陆地和水域的所有影响水生生物的环境因子^[1]。流域具有等级性, 即具有从大到小的空间尺度, 是具有等级性的多尺度空间系统, 包括流域、亚流域、河流、河段、静水/流水生境、微生境^[2]。与多尺度空间相对应的是多尺度的景观和环境, 大到经纬度、光照、气温、降水、海拔、土地利用格局等, 小到水环境、流速、微生境景观等。这种多尺度的环境因子在不同的空间尺度上形成了如同对物种筛选的“过滤器”^[3], 这种“过滤器”通过大尺度环境因子的筛选形成了流域尺度物种空间上的异质性, 随着空间尺度的减小, 小尺度的环境因子对亚流域或者河段尺度的物种进一步筛选, 从而形成从流域到亚流域, 再到河段、微生境生物的逐渐筛选模式^[4], 因而形成了流域生物的多样性。

大尺度环境因子对河流生物空间分布和多样性的影响是显而易见的, 在大的空间尺度上能呈现出一定的分布规律。例如, 物种多样性会随纬度升高而减少^[5, 6]; 底栖藻类、底栖动物和鱼类群落会沿着海拔梯度而变化^[7]; 鱼类多样性会在森林比例高的河流表现出较高的水平, 而在城镇化的河流中明显的降低^[8, 9], 底栖动物和藻类与土地利用格局也存在显著性关系^[10~12]。

小尺度环境因子与河流生物群落的关系也十分密切。营养盐类、阴阳离子和水文条件是影响藻类组成的主要因子^[13~16]。氮

作者简介: 杨顺益(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为河流生态学. E-mail: 364778253@qq.com

蔡庆华 E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFC0506406); 中国科学院战略先导 A 类项目(XDA23080101); 武汉市卫计委科研项目(WG15C08)

磷等营养盐能直接影响藻类生物量多寡、清洁种和耐污种比例以及多样性的高低^[17,18]。阴阳离子可以直接影响水体酸碱度和硬度以及某些藻类光合作用所需元素浓度从而影响藻类的群落组成和分布^[19]。流速等水文因素可直接对适应不同流速的藻类予以筛选并形成特殊的群落^[20,21]。

在过去的研究中,如果仅仅用大尺度或者小尺度环境因子解释生物群落的空间分布格局可能没有很好的相关性,用多尺度环境因子分析反而更加全面和客观。多尺度环境因子对河流生物群落的影响并非相互独立,而是相互作用,影响的程度也有差异,香溪河是三峡湖北库区最大支流,也是神农架南坡的主要河流,四季分明,生物多样性高。本文以香溪河流域为例,分析多尺度环境因子与溪流底栖藻类群落特征、多样性和组成的关系,揭示多尺度环境因子对底栖藻类群落的综合影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点设置

香溪河流域是三峡水库湖北库区最大的支流,是神农架南坡主要河流,流域面积 3099km²。干流全长 94km,其在兴山县境内干流长 78km,而在秭归县境内流长 11.1km,有九冲河、古夫河、高岚河三大支流,自然落差 1540m,水能资源丰富,年产水量 19.56 亿 m³。该流域属亚热带大陆性季风气候,春季冷暖交替多变,雨水颇丰,夏季炎热多伏旱,雨量集中;秋季多阴雨;冬季多雨雪、早霜,平均降水量为 800~2500mm,夏季降水最多,约占全年的 40%~45%,平均为 1584mm。土地利用类型以耕地、林地和草地为主,其中林地所占的比例最大。香溪河流域共设置 11 个样点(图 1),分别在 2008 年的春夏秋冬各采集一次。

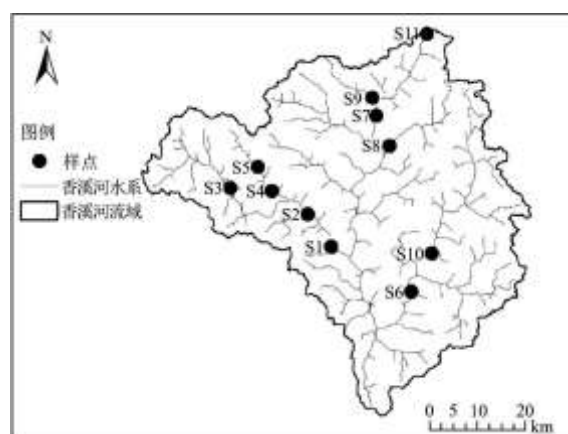


图 1 香溪河流域样点设置

1.2 样品采集及数据获取

底栖藻类参考美国环保署 (USEPA) 的方法采集^[22]。样品带回实验室后首先在×400 倍下进行非硅藻鉴定计数以及硅藻总数的计数,然后取一部分样品制成永久干片,在×1000 倍油镜下对硅藻进行鉴定计数。计数结果通过换算得到底栖藻类密度数据和相对丰度数据。鉴定所用的显微镜为 ZEISSAxioimager2。

采集底栖藻类的同时采集获取水体理化指标、水文指标和海拔 (Alt)。pH、溶解氧 (DOmg/L)、电导率 (Cond μ s/cm)、总溶解性颗粒 (TDSmg/L) 在现场用哈希 HQ40D 测定。总氮 (TNmg/L)、硝态氮 (NO₃-Nmg/L)、氨氮 (NH₃-Nmg/L)、总磷 (TPmg/L)、磷酸盐 (PO₄-Pmg/L) 用聚乙烯瓶采集,调整 pH 小于 2 带回实验室分析。高锰酸钾指数 (COD_{Mn}mg/L)、钙离子 (Ca²⁺mg/L)、碱度 (ALKmg/L)、硬度 (Hmg/L)、氯离子 (Cl⁻mg/L) 用聚乙烯瓶采集带回实验室分析。流速 (Vm/s) 现场用 Globewater 流速仪测定。理化指标测定方

法参照《水域生态系统观测规范》^[23]。

土地利用卫星图片采用 2007 年 9 月 15 日 LandsatTM4 或 TM5 (分辨率为 30m×30m, 光谱带为 Band1-7)。用 ErdasImagine9.2 解译, 用 Arcgis10.0 进行裁剪获取各样点河段尺度(样点上游长 1000m, 宽 400m 的区域)土地利用数据。土地利用数据分为林地(LD)、灌木和草地(G/C)、农业用地(ND)、城镇(CZ)4 类, 均以百分比(%)计。

将所有环境因子划分为小尺度环境因子(包括 TN、TP、NO₃-N、NH₃-N、PO₄-P、pH、Cond、TDS、Cl⁻、COD_{mn}、Ca²⁺、ALK、H、V)、大尺度环境因子(包括 Alt、LD、ND、CZ 和 G/C)。

1.3 数据处理及分析

Kelly 等^[17]在 1995 年建立了营养硅藻指数(TrophicDiatomIndex, TDI)用于评价河流底栖藻类的营养状态。在众多指数中 TDI 具有高敏感性的特点, 能较好的反映河流底栖藻类对河流不同营养水平的响应^[24]。该指数的计算公式为:

$$TDI = \frac{\sum_{j=1}^n a_j v_j i_j}{\sum_{j=1}^n a_j v_j} \quad (1)$$

式中: a_j 为物种 j 的相对丰度; v_j 为物种 j 指示值; i_j 为物种 j 污染敏感度值。

物种丰富度(Richness)是生物群落多样性的重要表征。物种丰富度的高低反映了群落物种的多度。

本文采用偏冗余分析(partial Redundancy analysis pRDA)和偏典范对应分析(partial Canonical Correspondence Analysis pCCA)对数据进行方差分解, 分析大尺度和小尺度环境因子分别对底栖藻类群落的影响和交互作用的影响。pRDA 用于多尺度环境因子对底栖藻类 TDI 和 Richness 变化趋势的影响, pCCA 用于分析多尺度环境因子对底栖藻类群落组成变化的影响。分析均在 Canococonversion4.5 中完成。

pRDA 和 pCCA 分析前, TDI 和 Richness、水体理化数据(除 pH 外)和海拔数据需要进行 $\log(x+1)$ 转换, 百分比数据如土地利用数据, 底栖藻类相对丰度数据进行 $\sqrt{x}$ 转化。最后所有数据进行归一化处理。

2 结果与分析

2.1 环境因子

香溪河流域各样点采集的环境因子离散程度有较大差异。变异系数大于等于 1 的环境因子有 NH₃-N、PO₄-P、CZ、G/S, 变异系数在 0.5~1 之间的环境因子有 TP、ND, 其余环境因子变异系数均小于 0.5(表 1)。

表 1 香溪河流域多尺度环境因子

环境因子	平均值±标准差	最小值	最大值	变异系数
------	---------	-----	-----	------

Cond (μ s/cm)	291.49 $\pm$ 44.47	204.70	387.00	0.15
TDS (mg/L)	136.71 $\pm$ 28.67	17.50	186.30	0.21
DO (mg/L)	8.99 $\pm$ 1.16	7.54	11.62	0.13
pH	7.96 $\pm$ 0.23	7.16	8.36	0.03
TN (mg/L)	0.93 $\pm$ 0.30	0.55	1.73	0.32
NO ₃ -N (mg/L)	0.81 $\pm$ 0.20	0.48	1.33	0.25
NH ₃ -N (mg/L)	0.03 $\pm$ 0.030	0.0	0.13	1.00
TP (mg/L)	0.02 $\pm$ 0.01	0.001	0.04	0.50
PO ₄ -P (mg/L)	0.02 $\pm$ 0.02	0.001	0.06	1.00
ALK (mg/L)	153.96 $\pm$ 63.37	40.04	370.37	0.41
H (mg/L)	10.80 $\pm$ 1.49	8.82	14.22	0.14
Ca ²⁺ (mg/L)	38.49 $\pm$ 7.22	23.23	56.42	0.19
Cl ⁻ (mg/L)	7.4 $\pm$ 3.0	4.00	15.00	0.41
COD _{mn} (mg/L)	1.44 $\pm$ 0.32	1.09	2.02	0.22
V (m/s)	0.47 $\pm$ 0.20	0.18	0.93	0.43
Alt (m)	561 $\pm$ 276	215	1052	0.49
ND (%)	24.72 $\pm$ 13.64	1.72	49.85	0.55
CZ (%)	1.29 $\pm$ 2.39	0.00	7.87	1.85
LD (%)	68.48 $\pm$ 15.87	41.53	93.43	0.23
G/S (%)	1.46 $\pm$ 3.66	0.00	12.34	2.51

2.2 底栖藻类群落

在香溪河流域共采集到底栖藻类有 151 个分类单元,以硅藻门为绝对优势类群,有 142 个分类单元,相对丰度为 95.9%。其余为蓝藻门(4%)和绿藻门(0.1%)。各季节底栖藻类优势种有所变化,但均以曲壳藻属(*Achnanthes*)为主要优势类群。线形曲壳藻(*Achnanthes linearis*)在四季均为绝对优势种,相对丰度为 32.17%~47.05%。*Achnanthes deflexa*、线形曲壳藻、扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)为主要且四季均出现的优势种(表 2)。TDI 范围在 2.58~3.40 之间, Richness 范围在 11~43 之间(表 3)。

2.3 多尺度环境因子对 TDI 的影响分析

利用 pRDA 分析各季节多尺度环境因子对 TDI 变化的影响(表 4)。小尺度环境因子和大尺度环境因子的解释率分别代表各自

占总解释率的百分比，交互作用解释率代表两组环境因子对 TDI 变化共同作用的解释率。结果显示，各季度与 TDI 有显著关系的均为小尺度环境因子(COD_{mn}、TDS、TP、NO₃-N)，解释率为 100%，大尺度环境因子的解释率为 0%，交互作用为 0%。

2.4 多尺度环境因子对 Richness 的影响分析

利用 pRDA 分析各季节多尺度环境因子对 Richness 变化的影响(表 5)。小尺度环境因子和大尺度环境因子的解释率分别代表各自占总解释率的百分比，交互作用解释率代表两组环境因子对 Richness 变化共同作用的解释率。香溪河流域春季和秋季小尺度环境因子(V、Cond)与 Richness 有显著关系，解释率均为 100%，大尺度环境因子的解释率为 0%，交互作用为 0%；夏季和冬季大尺度环境因子(ND、CZ)与 Richness 有显著关系，解释率均为 100%，小尺度环境因子的解释率为 0%，交互作用为 0%。

2.5 底栖藻类群落与多尺度环境因子的关系

利用 pCCA 分析各季节多尺度环境因子对底栖藻类群落组成变化的影响(表 6)。在香溪河流域春季大尺度环境因子(Alt)占总解释率的 100%，小尺度环境因子的解释率为 0%，交互作用为 0%；秋季小尺度环境因子(TDS)占总解释率的 100%，大尺度环境因子的解释率为 0%，交互作用为 0%；冬季大尺度环境因子(Alt)和小尺度环境因子(NO₃-N)的解释率均为 43.43%，交互作用为 13.15%。夏季由于洪水的原因数据不足以开展分析。

表 2 香溪河流域底栖藻类优势种

优势种(%)		春季	夏季	秋季	冬季
中文名	拉丁名				
	Achnanthes altergracillima	6.02	18.53		
	Achnanthes deflexa	12.92	7.73	11.88	6.18
线形曲壳藻	Achnanthes linearis	37.96	40.78	32.17	47.05
极细微曲壳藻	Achnanthes minutissima	8.97		5.14	
扁圆卵形藻	Cocconeis placentula	5.01	11.40	13.96	10.33
扭曲小环藻	Cyclotella acoma	5.75			
泰尔盖斯特异极藻	Gomphonema tergestinum			11.20	9.25
席藻	Phormidium sp.		9.61		

表 3 香溪河流域 TDI 和 Richness

	TDI			Richness		
	平均值±标准差	最小值	最大值	平均值±标准差	最小值	最大值
春季	3.06±0.23	2.58	3.40	26.5±8.8	13	39

夏季	2.89±0.16	2.65	3.28	22±7.1	13	31
秋季	3.01±0.11	2.88	3.22	22±11.3	13	43
冬季	2.98±0.07	2.84	3.05	23.8±8.96	11	39

表 4 多尺度环境因子对 TDI 变化的解释率

	环境因子	总解释率 (%)	小尺度环境因子 (%)	大尺度环境因子 (%)	交互作用 (%)
春季	COD _{mn}	49.50	100.00	0.00	0.00
夏季	TDS	57.60	100.00	0.00	0.00
秋季	TP	40.80	100.00	0.00	0.00
冬季	NO ₃ -N	49.50	100.00	0.00	0.00

表 5 多尺度环境因子对 Richness 变化的解释率

	环境因子	总解释率 (%)	小尺度环境因子 (%)	大尺度环境因子 (%)	交互作用 (%)
春季	V	4.5	100	0	0.00
夏季	ND	66.4	0.00	100	0.00
秋季	Cond	41.9	100	0.00	0.00
冬季	CZ	37.2	0.00	100	0.00

表 6 多尺度环境因子对底栖藻类群落组成的解释率

	环境因子	总解释率 (%)	小尺度环境因子 (%)	大尺度环境因子 (%)	交互作用 (%)
春季	Alt	14.25	0.00	100.00	0.00
夏季	/	/	/	/	/
秋季	TDS	16.36	100.00	0.00	0.00
冬季	NO ₃ -N、Alt	21.07	43.43	43.43	13.15

3 讨论与结论

3.1 TDI 与多尺度环境因子的关系

TDI 是表征底栖藻类群落营养状态的参数。Kelly 等^[17]在创建 TDI 时就证明与氮磷具有高度的相关性。后续研究也发现 TDI 与 TP、总溶解性磷 (TDP)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Cond 等因子高度相关。而河流营养盐水平的高低直接受到土地利用的影响^[25, 26], 有研究证明底栖藻类对农业和城镇等大尺度环境因子的增加也会有较快的响应, 所以在农业用地或者城镇占比较高的河流中 TDI 也会表现出较高的水平^[27, 28]。本研究发现在香溪河流域, TDI 主要受到小尺度环境因子的影响, 与大尺度环境因子并没有显著关系, 影响因子为 COD_{Mn} 、TDS、TP、 $\text{NO}_3\text{-N}$, 其中 TP 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 都是表征河流营养水平的重要因子。香溪河流域主要土地利用类型为林地, 覆盖率为 80%, 而农业用地覆盖率仅为 16%, 城镇覆盖率小于 4%。样点上游河段尺度的农业用地和城镇平均水平也较低, 分别为 24.72% 和 1.29% (表 1)。因此, 河流整体营养水平偏低, 其 TP 在 0.001~0.04mg/L 之间, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在 0.48~1.33mg/L 之间, COD_{Mn} 在 1.09~2.02mg/L 之间。TDI 也表现出较低水平在 2.58~3.40 之间。因此, 说明在香溪河流域大尺度的环境因子如农业用地和城镇没有表现出明显的空间差异, 从而并不能影响 TDI 的变化, 反而是小尺度的环境因子在较小空间尺度上的差异对 TDI 变化的影响更大。

3.2 Richness 与多尺度环境因子的关系

Richness 与环境因子的关系在植物和动物生态学中已有大量的研究^[29, 30]。Rocchini 等^[31]就发现植物的物种丰富度随着尺度的增大而增多, 与景观的复杂性呈显著正相关。Miyashita 等^[32]对 15 个不同空间尺度蜘蛛群落多样性的研究中发现, 在较大尺度上森林和稻田是影响蜘蛛多样性的主要因素, 而局部因素的影响很小。Reitalu 等^[33]的研究证明草本维管束植物在 plot 尺度 (50×50cm) 多样性与生境异质性显著正相关, 在 polygon 尺度 (0.1~4.8hm²) 与生境异质性、食草者密度等显著正相关。Li 等^[34]对底栖动物的研究也表明随着尺度的增加, 大尺度的环境因子起主导作用。以上研究均表明随着尺度的增大, 小尺度和大尺度环境因子对生物多样性的重要性也发生了变化。本研究发现 Richness 在春季和秋季主要受小尺度环境因子的影响, 而在夏季和冬季主要受大尺度环境因子的影响, 说明在不同的季节 Richness 受到了不同尺度环境因子的影响。虽然在流域尺度 Richness 并非每个季节都受到大尺度环境因子的影响, 但结果也说明在较大的空间尺度下 Richness 会响应土地利用的变化, 且土地利用具有决定性因素。

3.3 底栖藻类群落组成与多尺度环境因子的关系

pCCA 结果表明, 在不同的季节底栖藻类群落组成受到了不同尺度环境因子的影响, 并在冬季大尺度环境因子和小尺度环境因子产生了交互作用。海拔在春季和冬季均为显著的影响因子, 说明海拔是影响香溪河流域底栖藻类群落组成空间分布的主要而且稳定的环境因子。海拔对生物垂直分布的影响早已证明, 如 Ormerod 等^[7]就揭示了河流生态系统中底栖藻类, 底栖动物和鱼类群落沿着海拔梯度的分布格局。海拔属于大尺度的环境因子, 许多因子都与海拔相关。因为随着海拔的变化, 河流的理化环境会相应的产生变化, 最为明显的是温度和降水^[35, 36]。因为海拔的变化也可以影响土地利用格局的分布, 毕竟流域内高海拔地区限制了人类的活动和改造自然的能力。香溪河流域在低海拔地区农业用地和城镇的比例相对较低, 土地利用变化并不明显。因此 TDS、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等小尺度环境因子对底栖藻类组成的影响也起到关键作用。

3.4 多尺度环境因子与空间尺度的关系

有研究认为建立多空间尺度的指示因子对溪流结构和功能的保护和恢复无非比建立一个空间的指示因子来的更加有效^[37]。Esselman 等^[38]对面积为 45750km² 流域的研究发现与水深、河宽、底质等小尺度的环境因子相比, 海拔、流域面积等大尺度的环境因子对鱼类组成的解释率更高。Li 等^[34]在对韩国溪流的研究表明随着空间尺度的增大, 大尺度环境因子对底栖动物空间异质性更加重要。

通过对香溪河流域的研究发现大尺度环境因子有时不是影响底栖藻类的因素, 反而小尺度环境因子成为主导。相似的结论

出现在 Richards 等^[39]对 Saginow 流域(16317km²)的研究中,他们发现底栖动物群落特征与小尺度的环境因子高度相关,而与大尺度环境因子几乎没有相关性。为什么不同的研究区域会有不同的结果。有研究就认为造成结果的不同可能是因为研究区域尺度大小的问题,有些研究区域虽然划分了几个尺度,但是其最大的尺度仍然不够大。使得小尺度环境因子仍然具有相对的重要性^[34]。也有研究认为不同的生物类群对不同尺度的环境因子具有不同的响应^[40]。比如流域和缓冲带的土地利用、地形、河岸带植被带宽度、溪流大小等因子能影响鱼类 IBI、底栖动物密度、藻类物种数,然而底栖动物 FBI、EPT、硅藻污染指数却受到营养浓度和流动稳定性的影响,鱼类对土地利用敏感性更强,而底栖动物和藻类的敏感性则没有那么高^[41]。

本研究虽然表明更多的小尺度环境因子对底栖藻类具有影响,但不能否认大尺度环境因子对整个流域底栖藻类分布格局是有影响的,且有些大尺度环境因子是长期而稳定的影响因子。

参考文献:

- [1]蔡庆华, 吴刚, 刘健康. 流域生态学_水生生态系统多样性研究和保护的一个新途径[J]. 科技导报, 1997, 5:24-26.
- [2]ALLAN J D. Stream ecology: Structure and function of running waters[J]. Freshwater Biology, 2008, 53(9):1914-1914.
- [3]SOUTHWOOD T. Habitat, template for ecological strategies? presidential address to British ecological society[J]. Journal of Animal Ecology, 1977, 46(2):337-365.
- [4]POFF N L. Landscape filters and species traits towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1997, 16(2):391-409.
- [5]FISCHER A G. Latitudinal variation in organic diversity[J]. Evolution, 1960, 14:64-81.
- [6]WILLIG M R, KAUFMAN D M, STEVENS R D. Latitudinal gradients of biodiversity: Pattern, process, scale, and synthesis[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2003, 34(1):273-309.
- [7]ORMEROD S J, RUNDLE S D, WILKINSON S M, et al. Altitudinal trends in the diatoms, bryophytes, macroinvertebrates and fish of a Nepalese river system[J]. Freshwater Biology, 1994, 32:309-322.
- [8]WANG L, LYONS J, KANEHI P, et al. Watershed urbanization and changes in fish communities in southeastern Wisconsin Streams[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(5):1173-1189.
- [9]STAUFFER J C, GOLDSTEIN R M, NEWMAN R M. Relationship of wooded riparian zones and runoff potential to fish community composition in agricultural streams[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(2):307-316.
- [10]SPONSELLER R A, BENFIELD E F, VALETT H M. Relationships between land use, spatial scale and stream macroinvertebrate communities[J]. Freshwater Biology, 2001, 46(10):1409-1424.
- [11]BIXBY R J, BENSTEAD J P, DOUGLAS M M, et al. Relationships of stream algal community structure to catchment deforestation in eastern Madagascar[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2009, 28(2):466-479.

-
- [12]李艳利, 李艳粉, 李科. 不同尺度下人类活动对浑太河流域鱼类和大型底栖动物群落特征的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8):1145-1153.
- [13]WU N, TANG T, QU X, et al. Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China[J]. Aquatic Ecology, 2007, 43(1):37-49.
- [14]WU N, SCHMALZ B, FOHRER N. Distribution of phytoplankton in a German lowland river in relation to environmental factors[J]. Journal of Plankton Research, 2010, 33(5):807-820.
- [15]ZHANG M, CAI Q, XU Y, et al. Spatial distribution of macroinvertebrate community along a longitudinal gradient in a eutrophic reservoir-bay during different impoundment stages, China[J]. International Review of Hydrobiology, 2012, 97(3):169-183.
- [16]朱永锋, 琚珊珊, 蔡庆华, 等. 三峡水库春季浮游植物群落特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12):2893-2900.
- [17]KELLY M G, WHITTON B A. Trophic diatom index—a new index for monitoring eutrophication in rivers[J]. Journal of Applied Phycology, 1995, 7:433-444.
- [18]STEPHENS S H, BRASHER A M D, SMITH C M. Response of an algal assemblage to nutrient enrichment and shading in a Hawaiian stream[J]. Hydrobiologia, 2012, 683(1):135-150.
- [19]贾兴焕, 吴乃成, 唐涛, 等. 酸性矿山废水对底栖藻类的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(9):4620-4629.
- [20]WU N, CAI Q, 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.
- [21]IMBERGER S J, THOMPSON R M, GRACE M R. Urban catchment hydrology overwhelms reach scale effects of riparian vegetation on organic matter dynamics[J]. Freshwater Biology, 2011, 56(7):1370-1389.
- [22]LAZORCHAK J, KLEMM D, PECK D V. Environmental monitoring and assessment program-surface waters:Field operations and methods for measuring the ecological condition of wadeable streams[M]. Washington, D. C:U. S. Environmental Protection Agency, 1998.
- [23]蔡庆华. 水域生态系统观测规范—中国生态系统研究网络(CERN)长期观测规范丛书[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [24]RIMET F, CAUCHIE H-M, HOFFMANN L, et al. Response of diatom indices to simulated water quality improvements in a river[J]. Journal of Applied Phycology, 2005, 17(2):119-128.
- [25]闵敏, 林晨, 熊俊峰, 等. 不同土地利用模式下洪泽湖流域非点源颗粒态磷负荷时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4):606-614.

-
- [26]秦立,付宇文,吴起鑫,等.赤水河流域土地利用结构对氮素输出的影响[J].长江流域资源与环境, 2019, 28(1):175-183.
- [27]JUTTNER I, CHIMONIDES P J, ORMEROD S J. Using diatoms as quality indicators for a newly-formed urban lake and its catchment[J]. Environ Monit Assess, 2010, 162:47-65.
- [28]GABEL K W, WEHR J D, TRUHN K M. Assessment of the effectiveness of best management practices for streams draining agricultural landscapes using diatoms and macroinvertebrates[J]. Hydrobiologia, 2012, 680(1):247-264.
- [29]NASCIMBENE J, MARINI L, ÓDOR P. Drivers of lichen species richness at multiple spatial scales in temperate forests[J]. Plant Ecology & Diversity, 2012, 5(3):355-363.
- [30]KIRALY I, NASCIMBENE J, TINYA F, et al. Factors influencing epiphytic bryophyte and lichen species richness at different spatial scales in managed temperate forests[J]. Biodiversity and Conservation, 2013, 22:209-223.
- [31]ROCCHINI D, MCGLINN D, RICOTTA C, et al. Landscape complexity and spatial scale influence the relationship between remotely sensed spectral diversity and survey-based plant species richness[J]. Journal of Vegetation Science, 2011, 22:688-698.
- [32]MIYASHITA T, CHISHIKI Y, TAKAGI S. Landscape heterogeneity at multiple spatial scales enhances spider species richness in an agricultural landscape[J]. Population Ecology, 2012, 54:573-581.
- [33]REITALU T, PURSCHKE O, JOHANSSON L J, et al. Responses of grassland species richness to local and landscape factors depend on spatial scale and habitat specialization[J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23:41-51.
- [34]LI F, CHUNG N, BAE M J, et al. Relationships between stream macroinvertebrates and environmental variables at multiple spatial scales[J]. Freshwater Biology, 2012, 57(10):2107-2124.
- [35]OHMURA A. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 110:499-508.
- [36]REVADEKAR J V, HAMEED S, COLLINS D, et al. Impact of altitude and latitude on changes in temperature extremes over South Asia during 1971-2000[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33:199-209.
- [37]HUTCHENS J J, SCHULDT J A, RICHARDS C, et al. Multi-scale mechanistic indicators of Midwestern USA stream macroinvertebrates[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(6):1138-1150.
- [38]ESSELMAN P C, ALLAN J D. Relative influences of catchment- and reach-scale abiotic factors on freshwater fish communities in rivers of northeastern Mesoamerica[J]. Ecology of Freshwater Fish, 2010, 19(3):439-454.
- [39]RICHARDS C, HARO R J, JOHNSON L B, et al. Catchment and reach-scale properties as indicators of macroinvertebrate species traits[J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1):219-230.
- [40]HERING D, JOHNSON R K, KRAMM S, et al. Assessment of European streams with diatoms, macrophytes,

macroinvertebrates and fish:A comparative metric-based analysis of organism response to stress[J].Freshwater Biology, 2006, 51(9):1757-1785.

[41]FITZPATRICK F A, SCUDDER B C, LENZ B N, et al. Effects of Multi-Scale Environmental Characteristics on Agricultural Stream Biota in Eastern Wisconsin[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(6): 1489-1507.