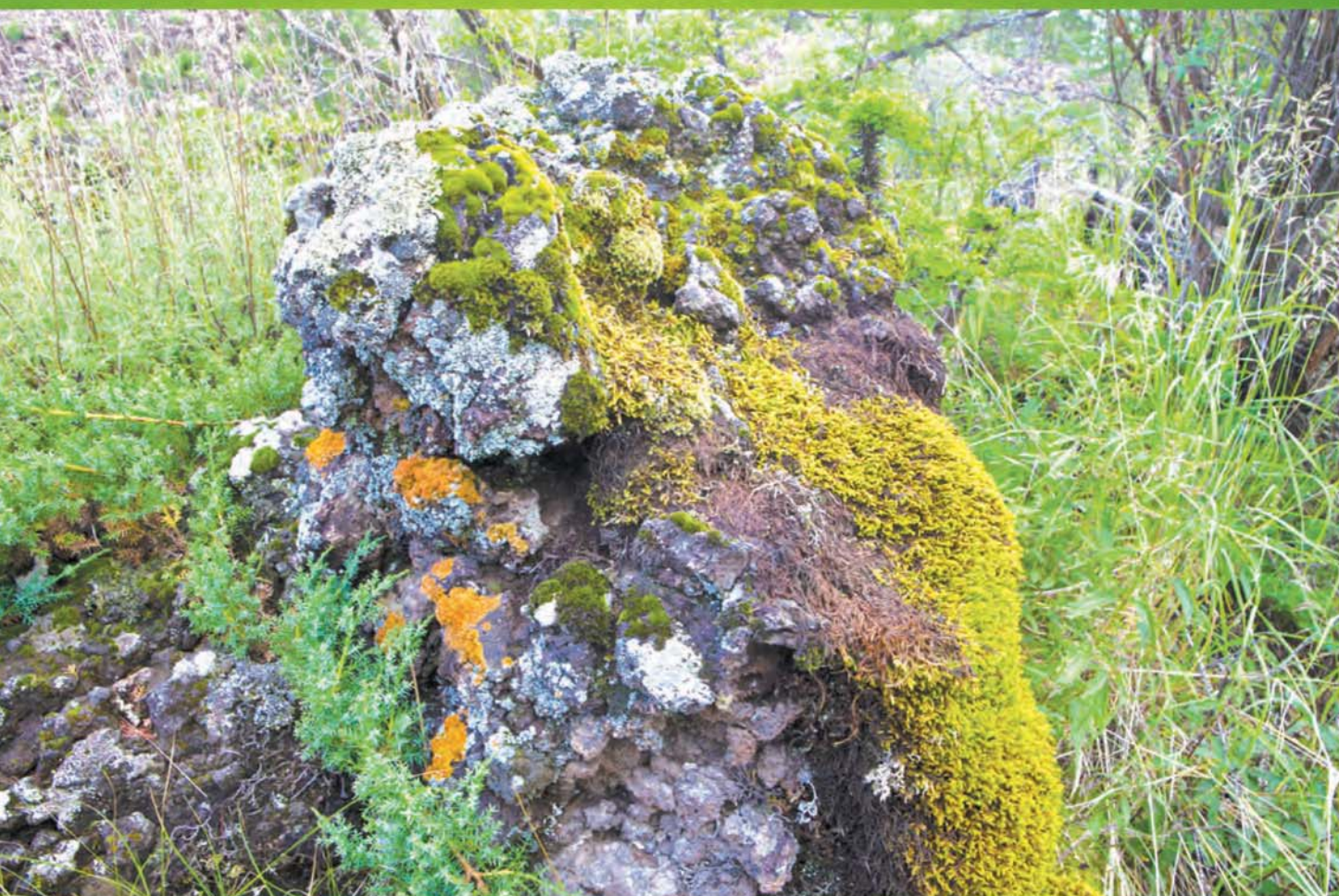


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

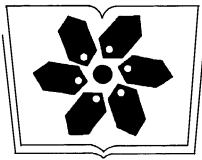
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 6 期

2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例.....	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价.....	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用.....	杞金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系.....	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究.....	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征.....	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学特性.....	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析.....	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响.....	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择.....	赵宪南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象.....	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响.....	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响.....	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用.....	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征.....	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析.....	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分部分布特征.....	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 N_2O 排放及其主要影响因素.....	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素.....	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图.....	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征.....	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响.....	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划.....	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现.....	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析.....	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定.....	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响.....	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究.....	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素.....	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究.....	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析.....	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
专论与综述	
生态补偿效率研究综述.....	赵雪雁 (1960)
研究简报	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响.....	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 34 * 2012-03	

封面图说: 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201102090159

殷旭旺,渠晓东,李庆南,刘颖,张远,孟伟. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(6): 1677-1691.

Yin X W, Qu X D, Li Q N, Liu Y, Zhang Y, Meng W. Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1677-1691.

基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价

殷旭旺¹, 渠晓东², 李庆南¹, 刘颖¹, 张远^{2,*}, 孟伟²

(1. 大连海洋大学, 水产与生命学院, 辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023;

2. 中国环境科学研究院, 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012)

摘要:以辽宁省太子河流域为研究范例,调查了全流域范围内 69 个样点的着生藻类群落和水环境理化特征,并在此基础上应用硅藻生物评价指数(DBI)和生物完整性评价指数(P-IBI),同时结合栖息地环境质量评价指数(QHEI),对太子河流域水生态系统进行健康评价。结果表明,太子河流域着生藻类群落结构具有明显的空间异质性,CCA 结果显示驱动着生藻类群落结构形成的水环境因子为电导率、总溶解固体和总氮。虽然 DBI、P-IBI 和 QHEI 在太子河流域某些河段上的评价结果有较大出入,但从全流域尺度上看,DBI、P-IBI 和 QHEI 的评价结果基本一致,表现为太子河上游健康状况较好,中游健康状况一般,而下游健康状况较差。讨论了水环境理化因子与着生藻类群落结构的相互关系,并对比分析了 DBI、P-IBI 和 QHEI 这 3 种河流健康评价方法。

关键词:生物完整性;硅藻生物评价指数;栖息地环境质量评价;典范对应分析;主成分分析;群落结构

Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China

YIN Xuwang¹, QU Xiaodong², LI Qingnan¹, LIU Ying¹, ZHANG Yuan^{2,*}, MENG Wei²

1 Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

2 Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Biological community structures have long been used to assess the impact of human activity on running waters. Compared to macroinvertebrates and fish community, periphyton community was infrequently used as indicator of stream conditions because of the large number of species and the need for taxonomic expertise. However, periphyton is valuable indicator of stream health because they are relative simple to collect and response rapidly and predictably to changes in stream chemistry and habitat quality. In the present work, we investigated the community structure of periphyton and characteristics of environmental factors among 69 sample sites in Taizi River Basin of Liaoning Province, Northeast China. Using the periphyton assemblages, we assessed stream conditions of Taizi River Basin based on Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI), Diatom Bioassessment Index (DBI) and Periphyton Index of Biological Integrity (P-IBI).

The results indicated that the dominant species of periphyton in Taizi River Basin were *Melosira varians*, *Diatoma vulgare*, *Cymbella tumida*, *C. hustedtii*, *Navicula cryptocephala*, *Gomphonema olivaceum*, *Achnanthes minutissima*, *Synedra acus*, *S. ulna*, *S. ulna oxyrhynchus*, *Nitzschia palea*, *Cocconeis placentula*, *Scenedesmus quadricauda*, *Oscillatoria tenuis* and *Phormidium tenus*. There was great difference in the periphyton community structure in Taizi River Basin. Based on principal component analysis, conductivity, suspended solid, velocity, total dissolved solid, hardness, alkalinity, ammonia nitrogen, nitric acid nitrogen and total nitrogen were the main environmental factors in Taizi River Basin.

基金项目:国家重大科技专项(水体污染控制与治理);流域水生态功能评价与分区技术课题(2008ZX07526-001)

收稿日期:2011-02-09; **修订日期:**2011-11-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyuan@craes.org.cn

Canonical correspondence analysis showed that conductivity, total dissolved solids and total nitrogen significantly influenced the community structure of periphyton in Taizi River Basin.

The metrics of DBI were species richness, diversity index, tolerance index, sensitive species and similarity of community, and the metrics of QHEI were epifaunal substrate, embeddedness, velocity, sediment deposition, channel flow status, channel alteration, frequency of riffles, bank stability, vegetative protection and riparian vegetative zone width. The merits of P-IBI were filtered with box-plots analysis and correlation analysis, and the ultimate index merits of P-IBI were total genera of green algae, relative species richness of sensitive diatoms, relative richness of diatom taxons, relative richness of blue-green algae taxons, percent of *Nitzschia*, percent of *Oscillatoria*, percent of motile diatoms, percent of diatoms with handle, Chlorophyll a content of periphyton and cell density of periphyton.

The results of stream condition assessment based on DBI, P-IBI and QHEI were in consensus in Taizi River Basin, although assessment results of some tributary were not in compatible. The results of stream condition assessment showed that upstream area of Taizi River Basin were in excellent ecological integrity, while, the downstream area of Taizi River Basin were in severe impairment. The results of correlation analysis showed that there were significant correlations among the scores of DBI, P-IBI and QHEI in sample sites of Taizi River Basin, and moreover, significant correlations were also detected between scores of DBI, P-IBI, QHEI and conductivity, total dissolved solid and total nitrogen. In the paper, we also discussed the relationship between periphyton community structure and environmental factors, and moreover, we evaluated the merit and deficiency of DBI, P-IBI and QHEI in the assessment of stream conditions of Taizi River Basin.

Key Words: biological integrity; diatom bioassessment index; qualitative habitat evaluation; canonical correspondence analysis; principal component analysis; community structure

随着人类对河流水资源开发和利用的不断提高,河流生态系统出现了河道断流、枯竭、生物多样性丧失以及水环境污染等问题,严重破坏了河流应有的服务功能和生态系统健康。为此,国内外许多学者开始关注河流生态系统的健康评价^[1-3]。最初的河流健康评价多从河流水环境的物理化学特征和有毒污染物含量入手,而忽视了水生生物在健康评价中的作用^[1]。随着研究的深入,学者们发现,河流中的水生生物群落具有整合不同时间尺度上各种化学、物理和生物影响的能力,进行一次水生生物监测和评价所获得的信息远要比仅进行一次水体理化特征分析所获得的信息更有价值^[4]。因此,一系列的生物评价因子,尤其是基于生物完整性的河流生态系统健康评价方法被广泛应用^[3]。

与大型底栖动物和鱼类相比,着生藻类在河流健康评价中的应用相对较少^[5-6],原因是该类群的物种数量巨大,且对分类的专业背景要求较高^[7]。然而,着生藻类却是指示河流生态系统健康状况极佳的类群,原因是:(1)着生藻类是河流中的初级生产者,担负着将无机营养元素转移至更高级有机生命体的任务^[8];(2)着生藻类群落的更新时间较短,对河流水化学和栖息地环境质量的反应迅速,且群落变化趋势的可预测性较强^[9-11];(3)着生藻类物种多样性较高,群落结构特征具有较强的地域性^[12];(4)着生藻类样品便于采集^[1]。国际上的学者已经越来越重视着生藻类在河流生态系统评价中的作用^[4],而国内仅在长江流域的香溪河和辽河流域的浑河进行过相关研究^[13-15]。本研究调查了辽宁省太子河流域着生藻类的群落结构特征,并在此基础上应用单因子评价(硅藻生物评价指数)和生物完整性评价体系对太子河流域水生生态系统进行健康评价,希望以此为例,为我国河流着生藻类健康评价指标和方法的建立提供参考,还为太子河流域水生生态系统健康的维护及管理提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 研究区域

太子河流域(东经 122° 30'—124° 50';北纬 40° 30'—41° 40')位于我国辽宁省东部地区,流域面积 1.4×10⁴ km²。水系发源于辽宁省新宾县境内的长白山脉,向西流经本溪、辽阳、鞍山三市,在三岔河与浑河汇合形

成大辽河后至营口注入渤海,全长 413 km(图 1)。太子河跨越 3 个水生态二级区,上游地区(观音阁水库以上)为山地森林多水区,植被保护较好(森林覆盖率>50%),占全流域面积的 69%;中游地区(观音阁水库至葭窝水库段)为低山丘陵区,占全流域面积的 6.1%;下游地区(葭窝水库以下)为平原农作物少水区,土地开发程度高,城镇化明显,占全流域面积的 24.9%。太子河流域属温带季风气候,年内温差较大,降雨多集中在 6—8 月,占全年总降雨量的 71.2%。

1.2 着生藻类样品采集

本研究中,太子河流域设定 69 个调查站位,其中太子河干流 21 个,各支流 48 个(图 1),于 2009 年 8 月末至 9 月初进行采样调查,用全球定位系统(MAGELLAN eXplorist-200)记录采样点的经纬度和海拔高度。在采样点河流上下游 100 m 范围内,依据河流生境的不同(流速、水深和透明度),挑选 9 个石块,从各石块上用硬毛刷分别刮取面积为 15.2 cm²(直径 4.4 cm 的圆形塑胶环)的着生藻类,用自来水冲刷至不锈钢托盘中,加入甲醛(5% 体积)固定后转移到广口塑料瓶中保存,作为着生藻类的定量样品。依据以上采样方法,重新从原 9 个石块上采集两份样品,其中一份用甲醛固定后作为着生藻类的种类鉴定样品;另一份用孔径 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜抽滤后,黑暗低温(4 ℃)条件下用丙酮萃取 12 h 后,以分光光度法测定叶绿素 a 含量^[16]。着生藻类的种类鉴定依据相关文献^[17-18]。

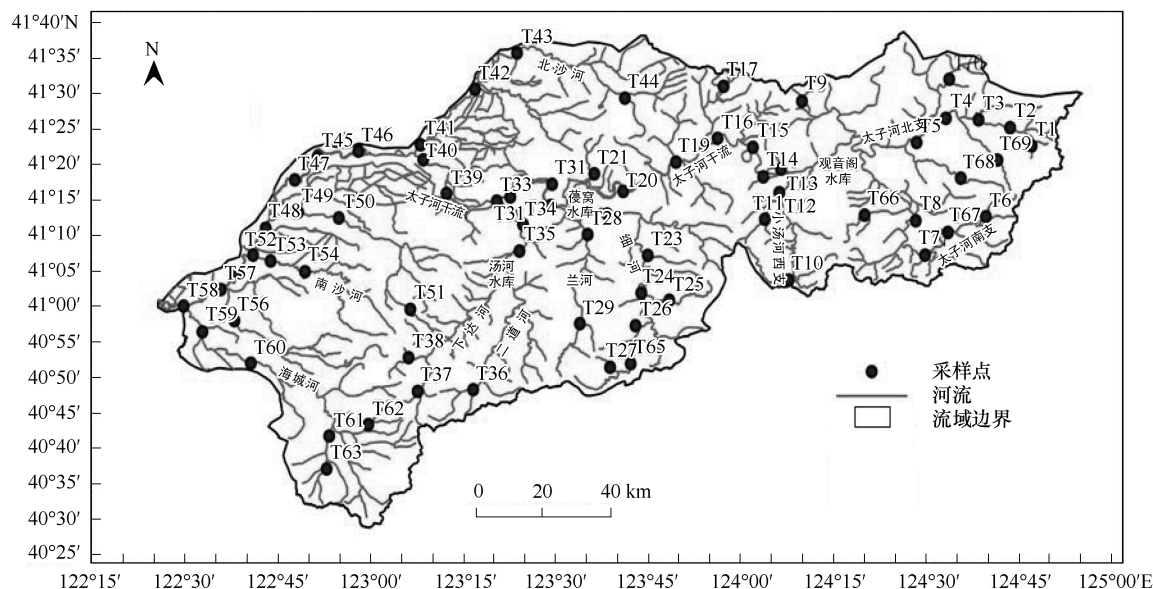


图 1 太子河流域采样点位示意图

Fig. 1 Location map of sample sites in Taizi River Basin

1.3 栖息地环境质量评价及水体理化性质的测定

对太子河流域各采样点的栖息地环境质量进行评价(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)时,选取 10 个评价指标(底质、栖境复杂性、速度和深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型),每项 20 分,总分 200 分,共计 4 个得分等级(健康、较好、一般和较差)。所有点位的栖息地评分均由同一位调查者完成,以消除由于人为误差导致的评价结果不一致。各评价指标的判定标准详见相关研究^[19]。

同期对各样点进行水体理化性质的测定。水温(Temp)、电导率(Cond)、总溶解固体(TDS)和 pH 值用 Hach 水质分析仪(sension156)现场测定;水深(Dept)和流速(CS)用流速仪现场测定;底质含沙量(Sand)用一套底质分样筛网(孔径为 16、8、4、2、1 mm)测定;溶解氧(DO)现场用硫酸锰和碱性碘化钾固定水样后,用碘量法测定^[16];在各样点采集两个平行水样(各 2 L),置于低温保温箱中,于 48 h 内带回实验室,根据标准方

法^[16],测定以下水化学指标:悬浮物(SS)、氯离子(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})、硅酸盐(SiO_4^{2-})、氨氮(NH_4^+-N)、亚硝酸氮(NO_2^--N)、硝酸氮(NO_3^--N)、总氮(TN)、活性磷($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、总磷(TP)、碱度(Alk)、硬度(TD)、生物需氧量(BOD_5)、化学耗氧量(COD_{Cr})和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。

1.4 数据分析和处理

1.4.1 着生藻类群落结构特征和水环境因子分析

各样点的着生藻类计算以下群落特征参数:物种多度、密度、香农多样性指数和均匀度指数。

对各样点水环境理化数据,首先进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),以判定影响太子河流域水环境质量的主要环境因子。将筛选出的主要环境因子进行偏相关分析(Partial Correlation Test, PCT),显著相关($P < 0.05$)的两个水体理化因子仅保留其一。对各样点着生藻类相对多度数据进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)后发现,第一轴的特征值为0.270,梯度长度在4个轴中最大,值为3.837,介于3—4之间,因此选用线性模型(冗余分析)和单峰模型(典范对应分析)均可。在本研究中选用单峰模型,对水体理化数据和着生藻类群落数据进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA),CCA时,水体理化参数为PCA和PCT筛选出的指标,着生藻类密度数据均转化为相对多度(%);与此同时,对数据进行9999次蒙特卡洛循环检验(monte carlo test, MCT),以判定显著影响着生藻类群落空间分布特征的水环境因子($P < 0.05$)。进行PCA、PCT、DCA和CCA时,除pH值以外的所有水体理化数据和着生藻类相对多度数据均进行数据转换($\log_{10}[x+1]$)。

1.4.2 单因子评价指标体系

本研究中选用的河流硅藻生物评价指数(Diatom Bioassessment Index, DBI)包括5个评价因子:物种丰富度、香农多样性指数、硅藻耐受性指数、敏感种相对多度和群落相似性指数。其中,1—2分为健康状况较差,2—3分为健康状况一般,3—4分为健康状况较好,4—5分为健康状况极好(表1),DBI为以上5种评价因子的加权平均,以得到最终的健康评价结果。DBI中5个评价因子的参数内涵详见相关研究^[4]。

1.4.3 着生藻类生物完整性(P-IBI)评价指标体系

为构建太子河流域着生藻类生物完整性(P-IBI)评价体系,首先提出了分属于6类属性(物种丰富度、敏感类群、群落多样性、相对丰度、生态型和密度与生物量),且对环境变化较为敏感的28个指标作为候选指标(表2)。对此28个候选指标进行分布范围、判别能力和相关性分析的筛选。分布范围的筛选指若某指标在超过95%的样点得分均为零,则放弃该指标。判别能力的筛选是比较各候选指标在参照点位和受损点位的数值在百分之25—75分位数范围内重叠的情况,利用箱体图进行判别的标准详见相关文献^[1,21-22]。对箱体图判别筛选出的参数两两进行Pearson相关性检验,显著相关($P < 0.05$)的两个指标中仅取其一。

表1 太子河流域硅藻生物评价指数与对应分值

Table 1 Metrics and scoring ranges of Diatom Bioassessment Index in Taizi River Basin

得分 Score	物种丰富度 Species richness	香农多样性指数 Diversity index	硅藻耐受性指数 Tolerance index	敏感种相对多度 Sensitive species /%	群落相似性指数 Similarity of community
1	< 20	< 1.5	1.0 — 1.5	< 0.1	>10
2	20 — 30	1.5 — 2.5	1.5 — 2.0	0.1 — 1	10 — 30
3	30 — 50	2.5 — 3.5	2.0 — 2.5	1.0 — 5.0	30 — 50
4	50 — 70	3.5 — 4.5	2.5 — 3.0	5.0 — 20	50 — 75
5	> 70	> 4.5	> 3.0	20 — 100	75 — 100

本研究中,参照点位的选择没有遵照以往研究所制定的原则^[1,21],原因是太子河全流域极少有无人干扰较小或没有人类干扰的区域,即使在太子河源头支流(太子河南支和太子河北支),河道两岸也多为农田覆盖。因此,采用Hughes等和裴雪娇等建议的方法^[3,22],综合各点位水体理化特征、栖息地环境质量及CCA结果,找出人类干扰相对较小的点位作为参照点位。

通过以上分析,确定 P-IBI 评价的核心参数,根据所有点位核心参数的分布范围,对核心参数进行赋分。本研究中使用四分法进行赋分^[4],通过对核心参数的赋分,累加得到最终的 P-IBI 得分。以参照点位 P-IBI 得分值分布的 25th 分位数作为健康评价的标准^[21],点位的 P-IBI 分值大于 25th 分位数值,则表示该站点受到的干扰很小,是健康的;对小于 25th 分位数值值的分布范围,进行三等分,确定出健康、较好、一般、较差 4 个等级的划分标准。

鉴于各 P-IBI 参数对干扰的响应模式不同,对各参数进行标准化处理,方法详见相关文献^[21-22]。对于随干扰增强得分值减小的参数,分值越高,赋分值也越高;对于随干扰增强得分值越小的参数,分值越高,赋分值越小。将核心参数按其分布范围进行四等分,对随干扰强度的增加参数值减小的参数,采用以下附分原则:分布范围>百分之 75 分位数的,分值为 10 分;百分之 75—50 分位数的,分值为 7 分;百分之 50—25 分位数的,分值为 4 分;分布范围<百分之 25 分位数的,分值为 1 分;对于对随干扰强度的增加参数值增加的参数,附分原则为:分布范围>百分之 75 分位数的,分值为 1 分;百分之 75—50 分位数的,分值为 4 分;百分之 50—25 分位数的,分值为 7 分;分布范围<百分之 25 分位数的,分值为 10 分。

为了检验 P-IBI 的可靠性,将太子河流域各调查点位的 QHEI、DBI 和 P-IBI 得分两两进行相关分析,并分别与主要水环境因子(电导率、总溶解固体和总氮)进行相关性分析。

1.4.4 数据分析

用 Biodiversity Professional 2.0 计算香农多样性指数,用 SPSS 12.0 进行数据的相关性分析,PCA 在 Statistica 8.0 上进行,DCA 和 CCA 在 Canoco 4.5 上进行,箱体图分析在 Origin 7.5 上进行,太子河流域着生藻类群落结构图和水生态健康评价图在 ArcMap 9.3 上完成。

表 2 太子河流域着生藻类生物完整性(P-IBI)评价指标体系与参数描述
Table 2 Attribute and description of candidate metrics of P-IBI in Taizi River Basin

序号 Number	候选参数 Candidate metrics	参数描述 Attributes of metrics	对干扰的响应 Response to disturbance
物种丰富度 Species richness			
A1	着生藻类总分类单元数	种水平上的物种数量	下降
A2	硅藻总分类单元数	种水平上的硅藻物种数量	下降
A3	绿藻总分类单元数	种水平上的绿藻物种数量	下降
A4	蓝藻总分类单元数	种水平上的蓝藻物种数量	下降
A5	着生藻类属的总数	着生藻类属的数量	下降
A6	硅藻属的总数	硅藻属的总数量	下降
A7	绿藻属的总数	绿藻属的总数量	下降
A8	蓝藻属的总数	蓝藻属的总数量	下降
敏感类群 Sensitive groups			
A9	敏感性物种相对多度/%	所有敏感硅藻物种相对多度之和(Σ),其中敏感物种的定义为 $V_i=4$, V_i 的界定参照相关文献 ^[20]	下降
群落多样性 Diversity index			
A10	香农多样性指数	$H' = -\sum P_i \times \log_2 P_i$,式中 P_i 为群落中第 i 个物种个体数占总个体数的百分比	下降
A11	均匀性指数	$J = H' / H'_{\max}$, $H'_{\max} = \log_2 S$,式中 S 为总物种数	下降
相对丰度 Relative abundance			
A12	硅藻分类单元相对多度	硅藻分类单元数 / 总分类单元数	上升
A13	蓝藻分类单元相对多度	蓝藻分类单元数 / 总分类单元数	下降
A14	绿藻分类单元相对多度	绿藻分类单元数 / 总分类单元数	下降
A15	曲壳藻百分比/%	曲壳藻硅藻细胞数 / 所有藻类细胞数	下降
A16	桥弯藻百分比/%	桥弯藻硅藻细胞数 / 所有藻类细胞数	下降
A17	菱形藻百分比/%	菱形藻硅藻细胞数 / 所有藻类细胞数	上升

续表

序号 Number	候选参数 Candidate metrics	参数描述 Attributes of metrics	对干扰的响应 Response to disturbance
A18	舟形藻百分比/%	舟形藻硅藻细胞数 / 所有藻类细胞数	上升
A19	丝状绿藻百分比/%	(刚毛藻目+丝藻目+双星藻目绿藻细胞数)/ 所有藻类细胞数	下降
A20	颤藻百分比/%	颤藻目蓝藻细胞数 / 所有藻类细胞数	下降
A21	硅藻百分比/%	硅藻细胞数 / 所有藻类细胞数	上升
A22	绿藻百分比/%	绿藻细胞数 / 所有藻类细胞数	下降
A23	蓝藻百分比/%	蓝藻细胞数 / 所有藻类细胞数	下降
A24	<i>Achnanthes minutissima</i> /%	极细微曲壳藻细胞数 / 所有藻类细胞数	下降
生态型 Ecotype			
A25	可运动硅藻百分比 /%	(舟形藻属 + 菱形藻属 + 双菱藻属硅藻细胞数)/ 所有藻类细胞数	上升
A26	具柄硅藻百分比 /%	(异极藻属 + 楔形藻属 + 曲壳藻属硅藻细胞数)/ 所有藻类细胞数	下降
密度与生物量 Density and biomass			
A27	着生藻类叶绿素 a 含量/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	下降	
A28	单位面积着生藻类密度/(个/ cm^2)	下降	

2 结果

2.1 着生藻类群落结构特征和水环境因子分析

太子河流域共计采集到着生藻类 217 种,其中硅藻门 142 种,占 65.4%;绿藻门 47 种,占 21.7%;蓝藻门 21 种,占 9.7%;其他种类 7 种,占 3.2%。着生藻类常见种类包括:变异直链藻(*Melosira varians*)、普通等片藻(*Diatoma vulgare*)、偏肿桥弯藻(*Cymbella tumida*)、胡斯特桥弯藻(*C. hustedtii*)、喙头舟形藻(*Navicula cryptocephala*)、橄榄绿色异极藻(*Gomphonema olivaceum*)、极细微曲壳藻(*Achnanthes minutissima*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、肘状针杆藻(*S. ulna*)、肘状针杆藻尖喙变种(*S. ulna oxyrhynchus*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)和小席藻(*Phormidium tenue*)。

太子河上游着生藻类的种类数量较多,其中以太子河北支和太子河干流观音阁水库坝下支本溪市河段的种类为最多(图 2),最高可达 56 种,平均为 43 种;而在北沙河、南沙河、杨柳河、海城五道河和太子河干流菱窝水库至三岔河口区段,藻类的种类较少,在某些点位(如杨柳河和海城五道河)甚至没有采集到着生藻类,这些区域着生藻类平均为 27 种。在全流域尺度上,着生藻类平均为 31 种。着生藻类密度的空间分布格局见图 2 所示,密度较高的区域集中在太子河的上游地区,其中以太子河南支、小汤河西支、太子河干流观音阁水库坝下至本溪市市区段以及太子河干流菱窝水库至辽阳段为较高,密度最高可达每平方厘米近 2000 万个细胞,平均为 2.67×10^6 个/ cm^2 ;而密度较低的区域集中在太子河干流菱窝水库坝下至三岔河口段、北沙河、南沙河、杨柳河和海城五道河,密度最低为每平方厘米 0 个细胞,平均为 2×10^4 个/ cm^2 。全流域着生藻类密度平均为 1.33×10^6 个/ cm^2 。着生藻类香农多样性指数在全流域的分布没有明显的规律可循,总体的趋势表现为中上游干流和支流上的多样性较高,而下游的干流和支流的多样性较低。最高值为 4.9,出现在太子河干流鞍山河段;最低值为 0,多出现在污染较严重的南沙河和海城五道河,全流域着生藻类香农多样性指数平均为 2.98(图 2)。

太子河流域水环境理化因子 PCA 结果表明,随着特征值曲线的递减,两个因子轴被保留下来,它们解释了总体变量的 54.94%(图 3)。起主要影响作用的环境因子包括:电导率、悬浮物、流速、总溶解固体、硬度、碱度、氨氮、硝酸氮和总氮,其中对第一主成分贡献较大的为电导率、悬浮物、总溶解固体、硬度、碱度、氨氮、硝酸氮和总氮;流速对第二主成分贡献较大。

依据 PCA 的结果,对以上 9 个环境因子进行 PCT(表 3),最终筛选出电导率、总溶解固体和总氮进入 CCA。CCA 显示,第一轴特征值(λ)为 0.166,物种与环境因子的相关系数为 0.894;第二轴特征值(λ)为

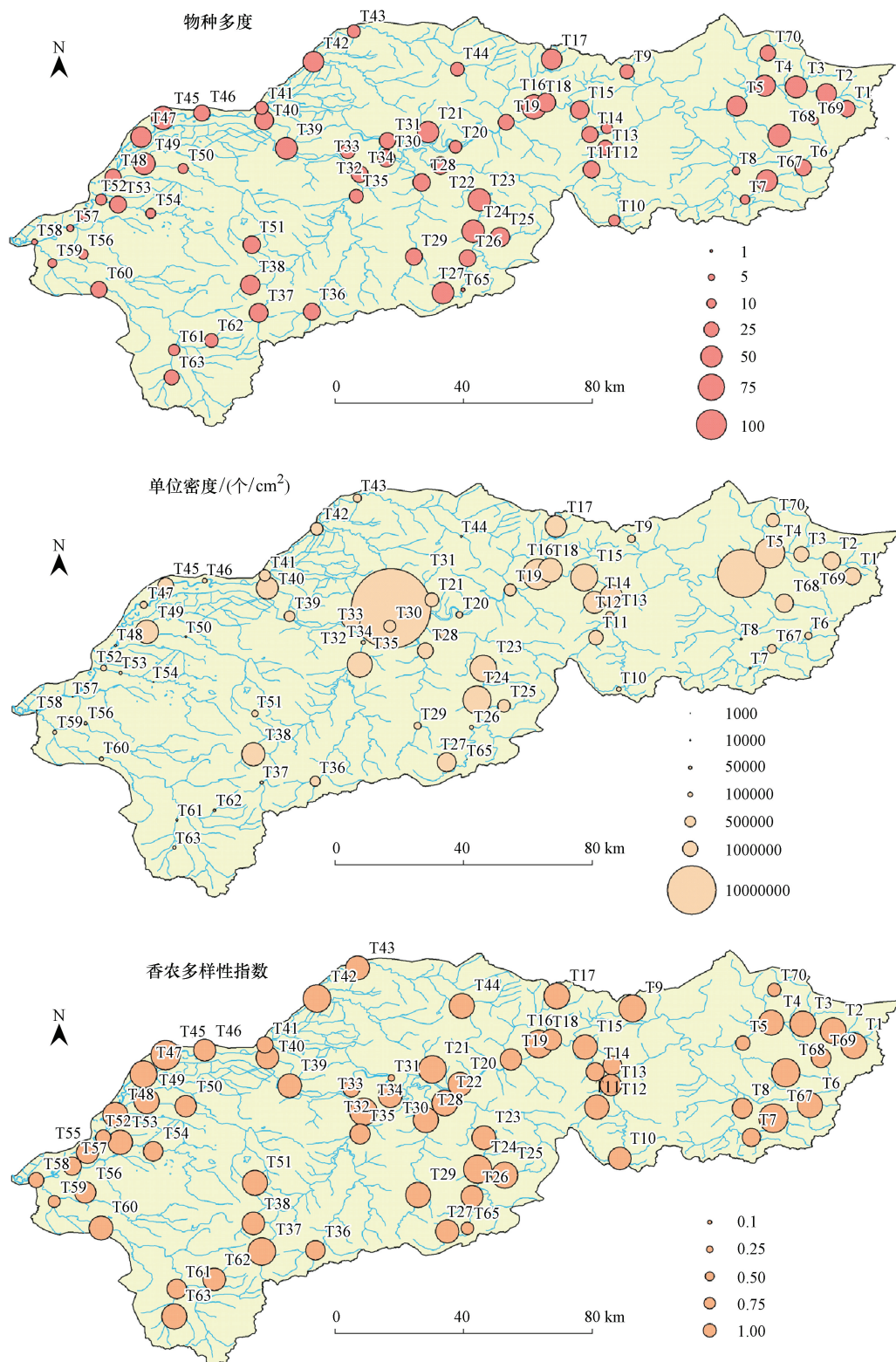


图2 太子河流域着生藻类群落结构特征

Fig. 2 Community structure of periphyton in Taizi River Basins

0.074, 物种与环境因子的相关系数为 0.801 (图 4)。CCA 表明, 显著影响太子河流域着生藻类群落结构的环境因子为电导率、总溶解固体和总氮 (MCT, $P < 0.05$)。

2.2 P-IBI 体系的建立和健康评价标准

太子河流域栖息地环境质量评价结果表明,生境质量较高的点位主要集中在太子河源头的太子河南支、太子河北支和小汤河西支。CCA 表明,影响太子河流域水环境质量的环 境因子主要为营养盐和溶解盐类(图 4),太子河南支和太子河北支的点位营养盐水平和溶解盐含量较低,且在 CCA 结果中对营养盐和溶解盐类的反应模式相同(均为负向的作用模式,图 4)。综合栖息地环境质量评价和 CCA 结果,最终将太子河南支和太子河北支的所有采样点位设定为参照点位。

通过箱体图分析,共有 18 个 P-IBI 参数进入 Pearson 相关性检验(图 5;表 4)。最终筛选出 10 个参数成为构建太子河流域 P-IBI 体系的核心参数:绿藻属的总数、敏感性物种相对多度、硅藻分类单元相对多度、蓝藻分类单元相对多度、菱形藻百分比、颤藻百分比、可运动硅藻百分比、具柄硅藻百分比、着生藻类叶绿素 a 含量和着生藻类密度,它们的分布范围和赋分标准见表 5 所示。基于 P-IBI 的太子河水生态系统健康标准见表 6 所示。

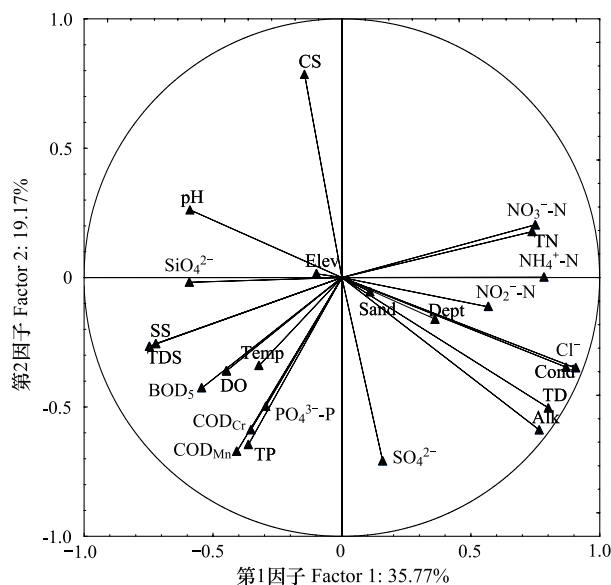


图 3 太子河流域水环境理化因子的主成分分析(PCA)

Fig. 3 Principal component analysis of environmental factors of Taizi River Basin

TSS: 总悬浮物 Total suspended solid; TN: 总氮 Total nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus; Alk: 碱度 Alkalinity; TDS: 总溶解固体 Total dissolved solid; TD: 硬度 Total hardness; CODCr: 化学耗氧量 Chemical oxygen demand; CODMn: 高锰酸盐指数 Permanganate index; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; CS: 流速 Velocity; Cond: 电导率 Conductivity; Temp: 温度 Temperature; Dept: 水深 Water depth; Elev: 海拔 Elevation

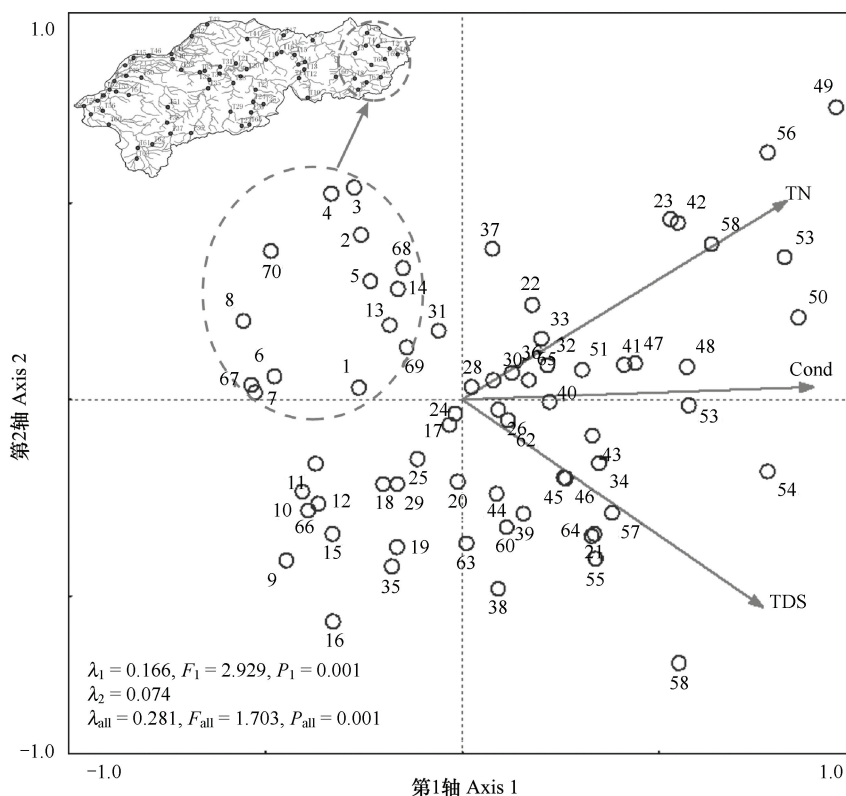


图 4 太子河流域水环境理化因子与着生藻类群落的典范对应分析(CCA)

Fig. 4 Canonical correspondence analysis of species-environmental relationships in Taizi River Basin

表 3 太子河流域水环境因子间的偏相关分析

Table 3 Partial correlation tests among environmental factors in Taizi River Basin

	SS	TDS	CS	Alk	TD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN
Con	0.167 ns	0.014 ns	-0.169 ns	0.458 ***	0.375 **	0.125 ns	0.058 ns	0.105 ^{ns}
SS	1	0.743 ***	-0.138 ns	-0.194 ns	0.107 ns	0.255 *	0.288 *	-0.158 ns
TDS		1	0.006 ns	0.100 ns	-0.115 ns	-0.115 ns	-0.179 ns	0.114 ns
CS			1	-0.118 ns	0.165 ns	-0.389 **	-0.365 **	0.501 ***
Alk				1	0.496 ***	-0.215 ns	-0.234 ns	0.147 ns
TD					1	0.153 ns	0.174 ns	-0.194 ns
NH ₄ ⁺ -N						1	-0.897 ***	0.904 ***
NO ₃ ⁻ -N							1	0.860 ***

ns 代表 $P>0.05$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

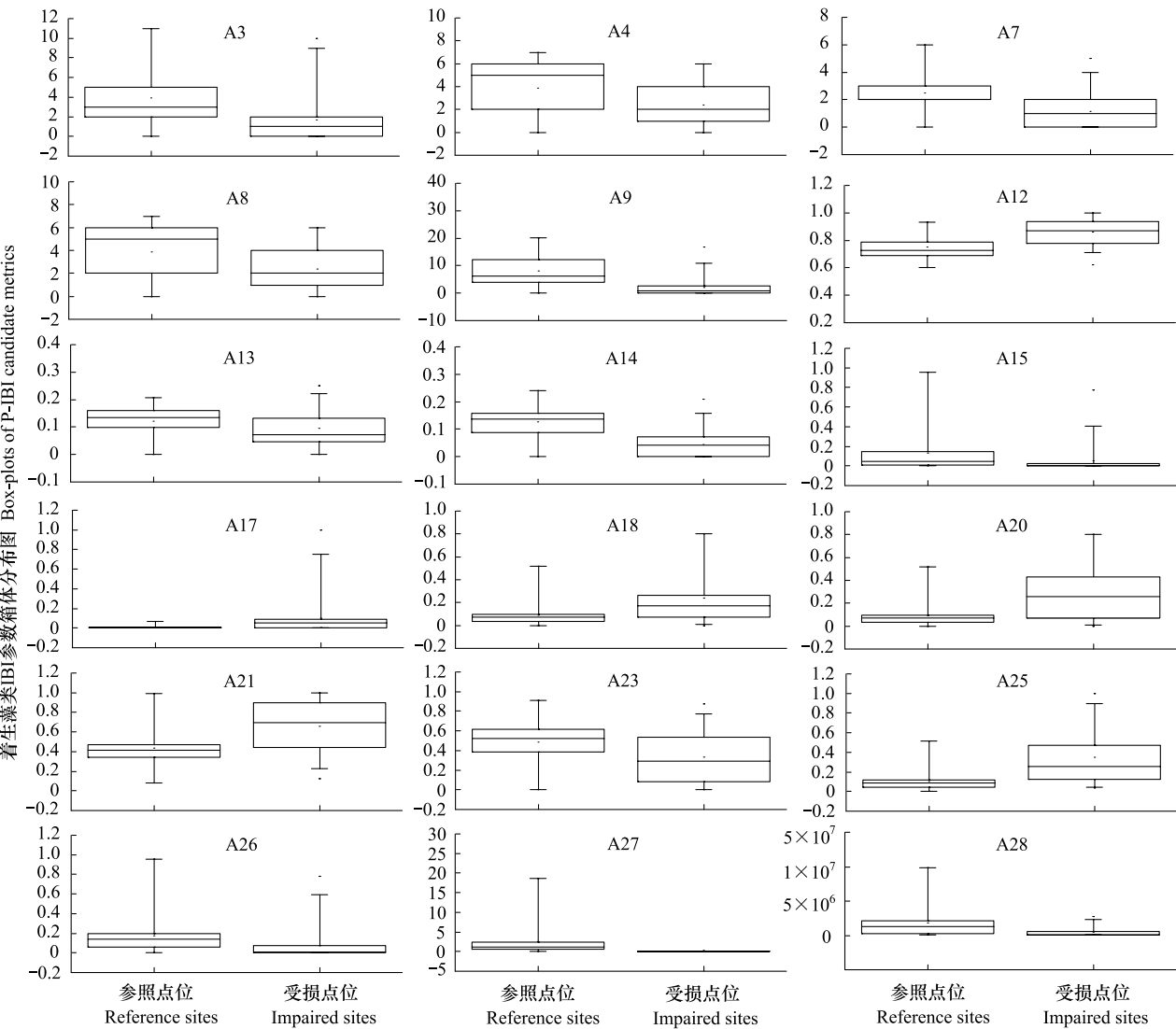


图 5 太子河流域 18 个候选 P-IBI 参数在参照点位和受损点位的箱体分布图

Fig. 5 Box-plots of 18 candidate P-IBI metrics between reference and impaired sites in Taizi River Basin

表 4 太子河流域 18 个着生藻类生物完整性 (P-IBI) 候选参数指标间的相关系数
Table 4 Correlation analysis of 18 P-IBI candidate metrics in Taizi River Basin

	A3	A4	A7	A8	A9	A12	A13	A14	A15	A17	A18	A20	A21	A23	A25	A26	A27
A4	0.56*	1															
A7	0.92	0.61*	1														
A8	0.56	1.00	0.61*	1													
A9	0.10	0.19	0.13	0.19	1												
A12	0.38	-0.37	-0.41	-0.37	-0.22	1											
A13	0.10	0.64*	0.20	0.64*	0.22	-0.43	1										
A14	0.87*	0.45	0.88*	0.45	0.22	-0.48	0.23	1									
A15	0.21	0.10	0.22	0.09	0.27	-0.04	-0.02	0.22	1								
A17	-0.12	-0.19	-0.11	-0.19	-0.21	0.18	-0.19	-0.10	-0.12	1							
A18	-0.22	-0.31	-0.25	-0.31	-0.09	0.31	-0.17	-0.31	-0.26	-0.14	1						
A20	0.05	0.39	0.08	0.39	-0.01	-0.09	0.43	0.03	-0.28	-0.26	-0.27	1					
A21	-0.15	-0.44	-0.20	0.44	-0.08	0.48	-0.50*	-0.25	0.25	0.34	0.41	0.88*	1				
A23	0.05	0.40	0.09	0.40	0.04	-0.37	0.46	0.11	-0.29	-0.31	-0.37	0.91	-0.98*	1			
A25	-0.27	-0.39	-0.29	-0.39	-0.21	0.38	-0.27	-0.33	-0.31	0.51	0.78*	-0.40	0.58*	-0.52*	1		
A26	0.22	0.12	0.25	0.12	0.24	-0.04	0.01	0.22	0.97*	-0.14	-0.30	-0.31	0.27	-0.30	-0.35	1	
A27	0.18	0.15	0.21	0.15	-0.16	0.05	-0.04	0.09	0.13	0.12	-0.02	-0.18	0.25	-0.22	0.06	0.13	1
A28	0.15	0.15	0.12	0.14	0.12	-0.01	-0.01	0.10	0.04	-0.11	-0.19	0.34	-0.32	0.34	-0.24	0.01	0.02

* $P < 0.05$; 英文字母含义见表 2

表 5 太子河流域着生藻类生物完整性(P-IBI)核心参数的分布范围及其赋分标准(英文字母含义见表 2)

Table 5 Distribution and scoring ranges of core P-IBI metrics in Taizi River Basin(See Table 2 for the meaning of abbreviations)

核心参数 Core metrics	参数附分 Score of metrics				参数分布描述 Distribution of metrics			
	10	7	4	1	最大值 Max. value	最小值 Min. value	95 th 分位数 percentile	5 th 分位数 percentile
A7	>3	=3 或 2	=1	=0	6	0	4.45	0
A9	>7.2	7.2—2.70	2.7—0	=0	27.08	0	20.07	0
A12	<0.73	0.73—0.83	0.83—0.91	>0.91	1	0	1	0.61
A13	>0.14	0.14—0.10	0.10—0.06	<0.06	0.28	0	0.24	0
A17	0	0—0.01	0.01—0.05	>0.05	1	0	0.22	0
A20	>0.55	0.55—0.32	0.32—0.07	<0.07	0.98	0	0.92	0
A25	>0.28	0.28—0.16	0.16—0.09	<0.09	1	0	0.85	0.02
A26	>0.18	0.18—0.06	0.06—0.003	<0.003	0.96	0	0.53	0
A27	>3.33	3.33—1.26	1.26—0.51	<0.51	18.76	0	11.84	0.17
A28	>1.5×10 ⁶	1.5—0.4×10 ⁶	0.4—0.07×10 ⁶	<0.07×10 ⁶	2.7×10 ⁷	0	3.9×10 ⁶	2600

表 6 基于着生藻类生物完整性指数(P-IBI)的太子河流域水生态健康标准

Table 6 Assessment criteria for biological integrity of periphyton in Taizi river basin

健康 Excellent biological integrity	较好 Good biological integrity	一般 Moderate impairment	较差 Severe impairment
≥ 6.7	6.6 — 5.6	5.5 — 4.7	≤ 4.6

2.3 太子河流域水生态系统健康评价结果

太子河流域栖息地环境质量评价(QHEI)、硅藻生物评价(DBI)和着生藻类生物完整性评价(P-IBI)结果见图 6 所示。

QHEI 结果显示,太子河流域生境质量较高的区域集中在上游的各条直流,包括太子河南支、太子河北支和小汤河西支,而太子河干流的沿途区域,生境质量都相对较差。太子河中下游各条支流中,细河、兰河、二道河和下达河的生境质量处于中等水平,而北沙河全河段生境质量相对较差(图 6)。DBI 的结果显示太子河流域水生态系统健康程度较高的区域为太子河北支和太子河干流观音阁水库坝下至蓼窝水库河段,此外,太子河南支中上游河段、北沙河以及海城河上游河段的健康程度较好,而太子河干流下游河段(辽阳市至三岔河口)以及该区域内的各条支流(南沙河、杨柳河、海城五道河和海城河)健康状况均较差(图 6)。P-IBI 的评价结果表明(图 6),太子河中上游地区的干流(太子河干流观音阁水库坝下至蓼窝水库河段)和各条直流(太子河南支、太子河北支和小汤河西支)的 P-IBI 结果与 DBI 结果相一致,而中下游地区的干流(太子河干流蓼窝水库坝下至三岔河口河段)和各条直流(汤河及其支流、北沙河、南沙河、杨柳河、海城五道河和海城河)P-IBI 结果与 QHEI 结果相一致。

太子河流域各调查点位的 QHEI、DBI 和 P-IBI 得分与主要水环境因子(电导率、总溶解固体和总氮)的相关性分析结果表明(表 7),太子河全流域范围内,QHEI、DBI 和 P-IBI 得分与各水环境理化因子呈显著的负相关关系,而 QHEI、DBI 和 P-IBI 得分之间则呈现显著的正相关关系。

3 讨论

3.1 环境因子与着生藻类群落结构

本研究显示,太子河流域着生藻类的群落结构具有明显的空间异质性(图 2),而驱动着生藻类群落结构空间格局的环境因子为总氮、电导率和总溶解固体(图 4)。在不同的流域内,影响着生藻类群落结构的环境因子不尽相同,对长江流域的冈曲河研究发现,影响着生藻类群落结构的环境因子是总氮、总磷和总溶解固体^[15],这与本研究的结果相类似;而对长江流域的香溪河研究则表明 pH 值、硅酸盐、总磷、氯离子等是主要影响因子^[13];此外,还有研究发现影响河流着生藻类群落结构的环境因子是电导率^[6]。驱动河流着生藻类群落

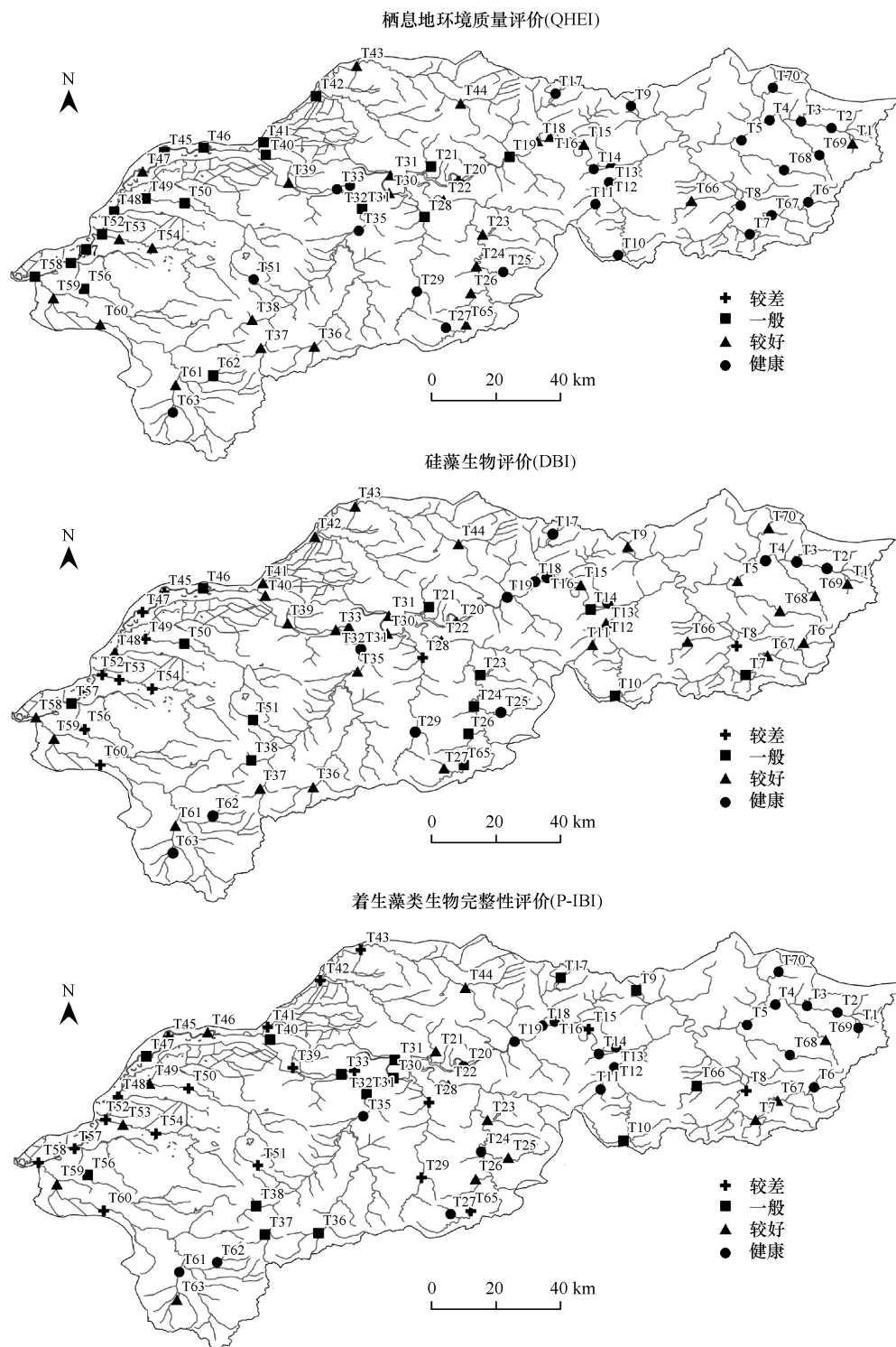


图6 太子河流域水生态系统健康评价结果

Fig. 6 Environmental condition assessment of Taizi River Basin

结构形成空间格局的环境因子会因流域的外源性营养盐类型^[15]、土地利用模式^[12-23]、人类活动强度^[24]和采样季节与时间^[13,25]的不同而异,这些因素主要是通过改变河流生态系统的生物地球化学循环和生境质量,进而影响藻类群落的物种组成和相对多度^[6]。

表 7 太子河流域各点位栖息地环境质量评价得分 (QHEI)、硅藻生物评价得分 (DBI) 和着生藻类生物完整性评价得分 (P-IBI) 与主要水环境理化因子间相关性分析

Table 7 Person correlation tests between scores of QHEI, DBI, P-IBI and values of significant environmental factors of sample sites in Taizi River Basin

	QHEI	DBI	P-IBI
电导率 (Con)	-0.644 **	-0.430 **	-0.446 **
总溶解固体 (TDS)	-0.686 **	-0.559 **	-0.549 **
总氮 (TN)	-0.530 **	-0.456 **	-0.389 **
QHEI	1		
DBI	0.309 *	1	
P-IBI	0.342 **	0.494 **	1

* 代表 $P < 0.05$; ** 代表 $P < 0.01$

有研究指出,电导率是影响河流着生藻类群落的重要环境因子^[6,12]。电导率是度量水环境总溶解离子量的参数,它和土地利用类型有着极高的相关性,可以反应随着地表径流而带入水体中的离子总量,尤其是在城镇化发展过程中导致的土地利用类型显著改变的地区更为明显^[6,26]。本研究表明,电导率和碱度 ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) 以及硬度 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 有着极高的正相关性 (表 3),从而支持了这一假说。然而其他研究指出,电导率和土地利用类型改变后而引发的可溶性营养盐含量有着明显的相关性^[6,12],然而这一假说在本研究中没有证据支持,太子河流域的电导率与氨氮、硝酸氮、亚硝酸氮和活性磷都没有明显的相关性 (Partial correlation tests, $P > 0.05$)。

着生藻类是河流的初级生产者,光合作用时需要氮、磷作为主要的营养元素^[8]。研究发现,河流中总氮和总磷的含量对着生藻类的群落结构有着影响显著的^[15,23],而这种影响又与氮、磷的供应量以及洪水频率有关^[27]。与洪水频发时期相比,水文特征稳定期的着生藻类群落对氮、磷的供应量更为敏感^[23,27]。本次调查的时间为 8 月末至 9 月初,处于太子河流域雨季的后期,全流域范围内雨量相对较少,河水的流量和流速较为稳定,从而为本研究中检验出总氮是驱动太子河流域着生藻类群落结构空间异质性的环境因子提供了条件 (图 4)。

本研究中,CCA 结果还显示出总溶解固体 (TDS) 是影响太子河流域着生藻类群落结构的环境因子,这与其他一些研究结果相一致^[15,28]。TDS 反映了水体中无机盐类 (钙盐、镁盐、碳酸盐、硫化物等) 和一小部分可溶性有机质的含量,它们可以降低水体的透光率^[15];此外,本研究还发现 TDS 和悬浮物 (SS) 有着显著的正相关性 (表 3)。可以推测,河流中 TDS 和 SS 的协同作用决定了不同区域水体的透明度,通过改变光照强度的方式对着生藻类的群落结构产生影响。

3.2 河流水生态系统健康评价

本研究基于着生藻类的群落结构,应用了两种评价体系 (DBI 和 P-IBI) 对太子河流域水生态系统进行健康评价研究,并在此基础上,与 QHEI 进行对比分析。尽管 DBI、P-IBI 和 QHEI 在太子河流域某些河段上的评价结果有较大出入 (如北沙河,图 6),但从全流域尺度上看,DBI、P-IBI 和 QHEI 的评价结果基本一致,表现为太子河上游地区健康状况较好,中游地区健康状况一般,而下游地区健康状况较差;相关分析也表明,太子河全流域范围内 DBI、P-IBI 和 QHEI 得分之间具有显著的正相关性 (表 7)。

DBI、P-IBI 和 QHEI 的评价结果基本反映了太子河流域水环境理化特征和流域生境质量特征。上游山地区域人类开发较少,河流两岸以森林为主,点源污染和面源污染较少,流域自然生境保存较为完整,无挖沙、采矿等破坏着生藻类生境质量的情况;而同位于山地丘陵区域太子河中游的干流和各支流,出现大规模采矿和挖沙等人为活动,尽管无明显的化学污染,但是着生藻类 DBI 和 P-IBI 仍然较低,从而反映出生境的丧失对于着生藻类群落的显著影响。城镇化程度较高的太子河下游各支流和干流区域,河流健康等级普遍较低,该区域分布有辽阳、鞍山、海城等大中城市,人类活动造成的水环境污染严重,河底大量淤积泥沙,着生藻类生境基本丧失,因而 DBI、P-IBI 和 QHEI 得分较低。这种由于城镇化和土地利用以及人类活动造成的着生藻类群落

结构显著改变,进而反映河流不同健康等级的例证在国内外的相关研究中普遍存在^[6,14,23]。本研究中,太子河全流域范围内的 DBI、P-IBI、QHEI 得分与反映人类活动强度的水环境因子(总氮、电导率和总溶解固体)具有显著的负相关性(表 7),从而进一步支持了以上论断。

QHEI 是一种快速、有效而又简便的河流健康评价方法,栖息地质量与理化因子、水生生物指标具有显著相关性^[19],表明栖息地质量是影响水质与生物状况的重要因素。然而,QHEI 评价受主观因素影响较大,不同调查者间评判标准的差异可能会导致对同一河流产生不同的评价结果^[1]。

与 QHEI 和 P-IBI 相比,DBI 评价不仅可以反应流域内的健康区域,还能告知健康的标准。DBI 的健康标准是基于美国河流研究制定出的^[4],尽管 DBI 在本研究中的应用较为成功,但仍就存在一些问题,如健康标准过高(图 6),且容易出现误判现象(如北沙河)。有学者建议,基于水生生物群落的健康评价体系和标准应根据河流的类型和所属生态分区而因地制宜^[3-4],因此制定出一套符合我国国情的河流健康标准是今后研究的重点。

本研究中构建 P-IBI 体系的 10 个核心参数,均能很好的反映出参照点位和受损点位的状况(表 5,图 5);此外,通过相关分析,以显著性作为剔除冗余参数的标准,灵敏度要高于“相关系数法”^[21-22]。然而,与鱼类和底栖动物相比,着生藻类在生物完整性评价中的应用并不广泛^[29],原因是该类群的物种数量较大,且对分类的专业背景要求较高^[7]。与着生藻类物种的分类相比,属一级的分类更为简便和快速,且属一级的特征同样能反映出河流的生物完整性和人类的干扰强度^[5,11]。本研究中的 P-IBI 核心参数体系中有 60% 反映的是着生藻类群落属一级(或更高分类单元)的信息(绿藻属的总数、菱形藻百分比、颤藻百分比、可运动硅藻百分比、具柄硅藻百分比、着生藻类叶绿素 a 含量和着生藻类密度),这也为今后我国河流健康研究中大规模应用着生藻类提供了条件。

生物完整性评价被认为是一种高效、灵敏和简便的河流健康评价方法^[1,3],然而,河流的生物完整性并不等同于河流的生态系统健康^[30],健康的生态系统不仅包含生物完整性,还应包括生境栖息地的化学完整性和物理完整性^[4]。因此,IBI 体系在评价时会出现误判现象。例如本研究中,南沙河源头的 T51 点位(位于鞍山市千山风景区),河流生境状况极佳,且水质达到 I 类标准,根据 IBI 的原则,应被确定为健康点位(参照点位,图 6)。然而,由于山溪性河流缺少必要的营养物质供给,导致着生藻类数量极低,且种类较少,按照 P-IBI 的评价结果,最终被归入不健康的点位(图 6)。由此可见,IBI 的评价体系只能反映河流生物类群的状况,而无法准确指示水生态环境质量的优劣。因此,构建一个综合水生生物群落特征、水环境化学特征、水环境物理特征和人类活动强度特征的“综合性评价体系”显得尤为重要,相关内容将在其他研究中进行深入讨论。

致谢:大连海洋大学王伟、徐锋、宋志刚,中国环境科学研究院陈立斌、郑文浩、万峻、张楠等同志参加采样,特此致谢。

References:

- [1] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. 2nd ed. EPA 841-OB-99-002. Washington DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [2] Zhao Y W, Yang Z F. River health: concept, assessment method and direction. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 119-124.
- [3] Hughes D L, Brossett M P, Gore J A, Olson J R. Rapid Bioassessment of Stream Health. New York: CRC Press, 2009.
- [4] Stevenson R J, Pan Y D, van Dam H. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms//Stoermer E F, Smol J P, eds. *The Diatom: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [5] Hill B H, Stevenson R J, Pan Y D, Herlihy A T, Kaufmann P R, Johnson C B. Comparison of correlations between environmental characteristics and stream diatom assemblages characterized at genus and species levels. *Journal of the North American Benthological Society*, 2001, 20(2): 299-310.
- [6] Walker C E, Pan Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions. *Hydrobiologia*, 2006, 561(1): 179-189.
- [7] Kelly M G, Penny C J, Whitton B A. Comparative performance of benthic diatom indices used to assess river water quality. *Hydrobiologia*, 1995, 302(3): 179-188.

- [8] Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. San Diego: Academic Press, 1996.
- [9] Round F E. Diatoms in river water-monitoring studies. *Journal of Applied Phycology*, 1991, 3(2): 129-145.
- [10] van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Aquatic Ecology*, 1994, 28(1): 117-133.
- [11] Chessman B, Grown I, Currey J, Plunkett-Cole N. Predicting diatom communities at the genus level for the rapid biological assessment of rivers. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 317-331.
- [12] Leland H V. Distribution of phytobenthos in the Yakima River basin, Washington, in relation to geology, land use and other environmental factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, 52(5): 1108-1129.
- [13] Tang T, Cai Q H, Liu R Q, Li D F, Xie Z C. Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(3): 345-352.
- [14] Yin X W, Zhang Y, Qu X D, Liu Y, Li Q N, Meng W. Community structure and biological integrity of periphyton in Hunhe river water system of Liaoning Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2732-2740.
- [15] Wu N C, Tang T, Qu X D, Cai Q H. Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China. *Aquatic Ecology*, 2009, 43(1): 37-49.
- [16] State Environmental Protection Administration of China. *Monitoring and Determination Methods for Water and Wastewater*. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] Zhu H Z, Chen J Y. *Bacillariophyta of the Xizang Plateau*. Beijing: Science Press, 2000.
- [18] Hu H J, Wei Y X. *The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology*. Beijing: Science Press, 2006.
- [19] Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 928-936.
- [20] Muscio C. *The diatom pollution tolerance index: assigning tolerance values*. Austin: Watershed Protection, Development Review Department, 2002.
- [21] Wang B X, Yang L F, Hu B J, Shan L N. A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [22] Pei X J, Niu C J, Gao X, Xu C. The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5736-5746.
- [23] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology*, 2000, 44(2): 279-301.
- [24] Wu N C, Tang T, Zhou S C, Jia X H, Li D F, Liu R Q, Cai Q H. Changes in benthic algal communities following construction of a run-of-river dam. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(1): 69-79.
- [25] Tang T, Qu X D, Li D F, Liu R Q, Xie Z C, Cai Q H. Benthic algae of the Xiangxi River, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 597-604.
- [26] Welch E B, Jacoby J M, May C W. *Stream quality*//Naiman R J, Bilby R E, eds. *River Ecology and Management*. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [27] Biggs B J F. The contribution of flood disturbance, catchment geology and land use to the habitat template of periphyton in stream ecosystem. *Freshwater Biology*, 1995, 33(3): 419-438.
- [28] Bate G, Smailes P, Adams J. A water quality index for use with diatoms in the assessment of rivers. *Water SA*, 2004, 30(4): 493-498.
- [29] Hill B H, Herlihy A T, Kaufmann P R, DeCelles S J, Vander Borgh M A. Assessment of streams of the eastern United States using a periphyton index of biotic integrity. *Ecological Indicators*, 2003, 2(4): 325-338.
- [30] Karr J R. Ecological integrity and ecological health are not the same//Schulze P, ed. *Engineering Within Ecological Constraints*. Washington DC: National Academic Press, 1995.

参考文献:

- [2] 赵彦伟, 杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向. *地理科学*, 2005, 25(1): 119-124.
- [14] 殷旭旺, 张远, 渠晓东, 刘颖, 李庆南, 孟伟. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2732-2740.
- [16] 国家环境保护总局. *水和废水监测分析方法 (第四版)*. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 朱惠忠, 陈嘉佑. *中国西藏硅藻*. 北京: 科学出版社, 2000.
- [18] 胡红军, 魏心印. *中国淡水藻类——系统、分类及生态*. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 928-936.
- [21] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. *生态学报*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [22] 裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 徐琛. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康. *生态学报*, 2010, 30(21): 5736-5746.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China	ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China	YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao	YANG Jinpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau	QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China	JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir	REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of <i>Amphidinium carterae</i>	JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in <i>Strongylocentrotus intermedius</i>	QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China	ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system	YANG Li, LI Weide (1773)
Effects of insect-resistant transgenic <i>Bt</i> rice with a fused <i>Cry1Ab+Cry1Ac</i> gene on population dynamics of the stem borers, <i>Chilo suppressalis</i> and <i>Sesamia inferens</i> , occurring in paddyfield	LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of <i>Frankliniella Occidentalis</i> (Pergande)	FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV)	WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China	LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil	QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau	DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
N ₂ O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions	YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China	WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
Numerical soil classification using fuzzy K-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale	LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition	YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO ₃ -N migration in wheat	WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province	WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China	GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak	FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of <i>Chrysanthemum grandiflorum</i> and its closely related genera	SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
Effect of the parasitic <i>Cuscuta australis</i> on the community diversity and the growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i>	WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning	CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
Fine root longevity and controlling factors in subtropical <i>Alingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images	DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics	LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
Review and Monograph	
Review of the ecological compensation efficiency	ZHAO Xueyan (1960)
Scientific Note	
The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying	CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元