

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **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 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 莹,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

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

DOI: 10.5846/stxb201108111177

吴斌, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁. 沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用. 生态学报, 2012, 32(14): 4566-4574.

Wu B, Song J M, Li X G, Yuan H M, Li N. Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4566-4574.

沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用

吴 斌^{1,2}, 宋金明^{1,*}, 李学刚¹, 袁华茂¹, 李 宁¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:沉积物质量评价“三元法(sediment quality triad, SQT)”是一种基于生物效应的综合评价方法, 主要包括化学、毒理、生态 3 个基元。尽管各基元可通过选择适当参数, 单独反映沉积物中致污物的环境风险, 但以证据权重法结合其三基元, 则更能全面描述沉积物中有害化学物质与生物效应之间的因果逻辑关系, 加强化学致污物及其污染水平的生态相关性, 为环境治理及修复等提供重要依据。从基元构成和数据解译两方面回顾了 SQT 方法的研究进展, 介绍了该法在国内外的应用实例, 剖析了提高评价可靠性的相关手段, 并结合我国近海沉积物环境质量评价现状, 展望了 SQT 法的未来研究及应用前景。结果表明, 通过替换、改进现有基元或增加其它基元的方式可提高 SQT 评价结果的可靠性, 而引入新的数据解译方法则可使本方法的评价过程更加透明、评价结果更加直观。适于评估化学胁迫对沉积物等环境介质造成的损害, 已广泛应用于世界各地, 是目前主要的综合评价方法, 具有良好的研究与应用前景。

关键词:沉积物质量三元法; 综合评价; 沉积物质量评价; 沉积物

Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years

WU Bin^{1,2}, SONG Jinming^{1,*}, LI Xuegang¹, YUAN Huamao¹, LI Ning¹

1 Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Sediment quality triad (SQT), one of the important sediment quality assessment approaches, is defined as a conceptual and integrated technique based on biological response. It mainly comprises three complementary levels of evidence including sediment chemistry, laboratory sediment toxicity test and *in situ* benthic community structure. Each of the three traditional levels of evidence alone can independently reflect the environment risk of the contaminant in sediment by selecting suitable parameters. However, by combining these three levels of evidence, this approach can provide a comprehensive assessment in a weight of evidence means, which enhances the causal-effect relationship between the elevated chemical exposure and adverse biological effect, furthers the understanding of the ecology relevance between the hazardous materials and pollution levels. As consequences, it provides a robust basis for costal environmental control and remediation. Our objective is to focus on the newly advancement of SQT approach, draw experience and lessons to promote the coastal sediment quality assessment in China. This paper reviewed the history and development of the method detailed in 2 aspects including evidence composition, data simplification and interpretation method. We further investigated techniques to enhance the reliability of SQT evaluation and prospect for the method and application research in view of our country's current status of coastal sediment quality assessment. Literature analysis shows that diversifying levels of evidence and improving data interpretation method can make evaluation result more reliable and understandable. SQT assessment can be more transparency by formalize and standardize the current interpretive tools, for instance, the tabular decision matrices.

基金项目:国家海洋局环境评价项目(DOMEP(MEA)-01-01); 中国科学院知识创新方向群项目(KZCX2-YW-Q07-02)

收稿日期:2011-08-11; **修订日期:**2012-05-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

The SQT has been intensively used in the North America and frequently adopted as environmental management tools in European countries especially the Spain. It is one of the most applicable comprehensive assessment methods that the SQT intends to evaluate the adverse effect caused by chemical stressor in mediums like sediment. However, it should further develop to resolve and enhance the reliability, transparency of evaluation.

Key Words: sediment quality triad; integrated approach; sediment quality assessment; sediment

近年来,由于不合理开发与利用资源、排放污染物等人为活动,造成赤潮、水母爆发等生态灾害频发,近海生态系统环境质量日益恶化。为更好掌握近海生态系统的环境质量现状,分析变化趋势,探究污染原因,提出治理修复措施,进行环境管理,沉积物等环境介质的质量评价方法研究及实践工作势在必行。

沉积物是近海生态系统的重要组成部分,具有复杂的物理、化学、生物特性。因此,对其进行评价不仅需要结合体系本身的结构、功能和过程,还应适当考虑研究区域的人类活动及影响,以综合处理各种环境信息,方能实现对沉积物环境质量的正确评价^[1]。

依据评价内容及目的的不同,沉积物质量综合评价方法可分为两大类:一是基于生态系统的方法,二是沉积物质量评价“三元法(sediment quality triad, SQT)”。前者侧重生态系统的结构与功能,突出生态完整性,而后者融入了证据权重、生态风险评价等方法的基本原理与手段,更专注污染问题^[2-3]。实际上,两者“综合评价”的差异体现在评估尺度及具体的综合方法上。相比而言, SQT 法主要是用于评估潜在不利因素(主要是污染物)所可能引发的生态风险,尽管没有解决多尺度的生态完整性评价^[2],但被认为是目前近海沉积物质量评价中科学基础最完备、应用最广泛的综合评价方法。

具体来说, SQT 法是一种基于生物效应的综合评价方法。在过去 20 多年的发展历程中,该方法体系、应用范围(包括适应环境介质、评估对象等)等方面都有较大的改进与扩展。在环境问题日益突出的今天, SQT 的研究及应用前景亦备受关注。本文回顾了 SQT 的主要研究进展,并针对我国近海沉积物环境质量评价实践及方法研究现状,提出了相关建议。

1 研究进展

SQT 法最早由 Long 和 Chapman^[4]提出,它由沉积物化学、沉积物毒性测试以及底栖生物群落结构这 3 个互补基元构成。尽管这些基元单独使用时能提供有关环境胁迫的效应信息^[5],但均不能回答沉积物是否受到污染、污染原因及程度等问题。因此,上述三基元的结果必须予以集成,综合考虑各种数据信息所反映的环境质量、污染程度以及数据信息之间的相关性来评价环境胁迫可能产生的潜在风险,这同时也是一种证据权重评价,是生态风险评价的一个分支^[6-8], SQT 以适当的信息简化,数据降维工具将各种沉积物质量信息通过最佳专业评判(best professional judgment, BPJ)转化为确定性的评价结果^[9]。所以, SQT 集成了证据权重与生态风险评价两大要素,是证据权重法在沉积物环境质量评价中的应用雏形。

自 20 世纪 90 年代提出以来, SQT 法经历了诸多改进,取得了一系列研究进展。就方法体系而言,主要体现在基元构成的变化和证据权重工具的多元化;在应用研究方面,则包括适用对象的增加,评估对象的扩展和应用地理范围的扩大等。下文着重回顾了 SQT 在基元构成和证据权重方法的研究进展,并总结分析了该方法近五年的实践情况。

1.1 基元构成的变化

综合评价旨在结合不同种类、不同尺度上的沉积物信息,获取环境质量相对好坏的评价等级,体现不同信息之间的对比与综合。 SQT 包括沉积物化学、毒理、底栖生态 3 个基元,它们可以解决了致污物是否存在以及能否引起生物效应的问题,却不能解决沉积物评价中的其它问题,如致污物的生物有效性及其生态相关性^[10]。基于潜在环境胁迫的作用对象、暴露途径及预期的生物效应类型等方面的考虑,可通过增加、替换或改进上述三基元的方式,加强 SQT 的生态相关性^[11]。

基元构成的变化被认为是一种新的、增强型 SQT 法的再造^[12]。目前,通过引入生物放大、组织残毒、毒性鉴定评估(toxicity identification evaluations, TIEs)等基元,使评价结果可靠性得到进一步提升。通常,沉积物化学、毒理是 SQT 基元构成的必要组成部分,底栖生物群落结构则可替换为其他的基元。此外,也有研究将特定的生物有效性^[13]或毒性参数纳入沉积物化学基元^[14],作为独立的证据权重水平。当然,也可重新定义 SQT 的 3 个基本单元,选择适当的参数,纳入生物富集、慢性毒性试验等新的证据权重水平从而形成一种新型的 SQT^[12]。所有的附加基元均是根据具体的评价目标而纳入考虑,它们与传统的三基元具有同样的独立地位。目前,已经出现超过 14 种附加基元^[15],而纳入生物放大的 SQT 更成为当前标准的组成架构^[16]。

基元构成的变化分 4 种情形:(1)直接替换已有基元,如底栖鱼类组织病理学;(2)改进已有基元,如原位毒性测试;(3)直接增加基元,如细菌群落结构、生物放大、生物标志物等;(4)增加反映因果关系的基元,如组织残毒、定向效应分析、TIEs 等。其中,直接增加基元和增加反映因果关系的基元是两种常见的变化方式,生物放大仅适于生物富集型的有机致污物(如多氯联苯、甲基汞等),因为它们可在食物链中传递,导致其在高营养级的生物中富集,产生严重毒害作用。组织残毒是生物放大分析的另一种形式,它进一步增强生物有效性分析,明确了毒性产生原因。TIEs 则建立了毒性生物效应与特定致污物之间的因果关系的方法,定向效应分析与 TIEs 类似,但仅着眼于有机污染物引起的生物效应,结合生物测试、化学分析等手段,通过移除非毒性组分来降低鉴定的复杂性。

1.2 数据解译

SQT 是一种通过集成多重证据水平,协调其间不一致的综合评价方法^[17]。其评价关键过程是将复杂的沉积物数据转化为相对简单的评价结果和确定性结论,而这有赖于证据权重法,即基于所有可获得的信息及其内部关系得出确定性结论的方法^[18],它包括不同权重水平的数据质量、程度以及一致性评价^[19]。SQT 以及其他的证据权重评价方法包括定性和定量两大类解译工具^[8],前者是以简单方式,结合诸多证据水平,得到非定量结果的评价方法;后者则通过细化不同证据水平的评价结果来衡量致污物沉积物所引起的生态系统损害。Chapman 等^[20]则将解译方法细分为有 BPJ、指数、统计总结、逻辑系统、评分系统等五种方法。基于方法的科学性与适用性,结合至今已报道的其他数据解译方法(柱状图、饼状图、参考比率、基轴图、决策矩阵表、多元统计分析等),本文着力介绍决策矩阵表、单/多变量统计分析、指数、BPJ 等 4 种解译方法。

1.2.1 决策矩阵表

决策矩阵表由 Chapman^[21]提出,是当前易用性最高,应用最广泛的数据解译方法,其优势在于清晰、透明的决策过程,是典型的逻辑系统方法。在将不同的信息综合到决策表之前,先以定量或统计方法将不同的信息予以总结、简化,后采用 Pass/Fail 机制来确定不同基元之间相对于沉积物质量的逻辑关系,以获得最终的环境质量决策。最早的决策矩阵表包括沉积物化学、毒理和底栖生态 3 个基元,8 种可能的评价结果及决策选项。目前,结合生物放大的四重证据水平的 SQT 决策矩阵表已经成型,如 Chapman 和 Anderson^[16],Chapman 和 MacDonald^[6]提出的包括 6 种确定的和 10 种需额外调查的可能情形及决策选项。实际上,由于其不能敏感地反映各基元的变化,该方法也存在明显的不足。因此,决策矩阵表很少单独使用,通常需结合 BPJ 同时使用。

1.2.2 单/多变量统计分析

单/多变量统计分析可提供客观的数据解译与直观的数据分析结果展示,能避免沉积物信息的不当丢失,对于处于环境质量临界区间的大量物理、化学参数尤为实用。常见的统计分析方法有方差分析、主成分分析、元分析、聚类分析、相关性分析等。

在 SQT 法应用中,首先需对各基元分别进行分析。对于化学参数,以方差分析检验各证据水平的空间分布差异,站位或选择的多组站位之间的统计显著性差异,由此辨别由粒度、沉积物稳定性等非污染物因子引起的生物效应。另外,在化学参数较多的情况下,在方差分析之前,可先进行主成分分析适当降低数据的维数,筛选最能反映数据变异的主成分。对于沉积物毒性试验数据,统计分析应针对所有测试指标。对于底栖生物

群落数据,包括计算和比较代表群落结构信息参数的单变量分析(如分类单元数、主要分类单元数的平均丰度、种群总丰度、优势度等),它们可以用来确定不同群落或者同一群落在不同时间的结构差别。

基元之间的关系可通过主成分分析、聚类分析、回归分析、元分析以及概率定量分析等方法予以描述,这些方法的差异在于变量选择、数据信息结合方式等方面。主成分分析适用于分析各基元主成分之间的相关,这种相关性可反映不同基元在描述沉积物环境质量上的一致性。此外,还可以采用结合相似性或排序分析的 Mantel's 测试、非参数多维排序等方法描述不同基元之间的关系。近年来又出现了一些新方法,如 Paedal 等^[22]应用主响应曲线法来找出生物响应数据的生态相关性模式及变化趋势,以获得概要的环境质量信息;其他如概率定量分析^[23-24]、元分析^[25]以及模糊逻辑^[26]以及节点分析^[27]等也有报道。尽管统计分析方法能降低对主观评价的依赖,但是也要求专业的统计技能和对统计分析的结果进行区分能力,否则,将易出现误导性的评价结果。

1.2.3 指数

指数是证据权重评价框架下的数据分析方法,将多维的沉积物质量信息转化为无量纲的单一指数值,可提供综合的环境质量信息^[28]。指数的最大优势在于能让环境质量评价结果直观、量化地向非专业的人士展示,有利于环境管理部门业务化管理,符合公众对环境关注的需求,是一种省时、省力,具有很强的可操作性的常规环境管理的方法构建适当的沉积物环境质量指数具有重要现实意义。

最早的指数形式是由 Chapman^[21]提出的参考比率(ratio-to-reference)。随着数据解译方法的修正与改进,结合多元统计分析和沉积物质量基准,由于所选取的参照沉积物不仅包括清洁的还包括被污染的类型,得到最大和最小的参考比率,强调了证据权重的思想,参考比率仍具有良好的应用前景^[29-30],常用于筛选优先污染物^[31-32]。对于基于参考比率的基轴图法,由于信息过度压缩以及忽略某些基元的信息,特别是对于作为生物负效应直接的度量生物数据而言,没有必要进一步减少、处理数据,基轴图法并未得到广泛应用。因此,综合指数的构建应遵循以下基本原则:对 SQT 简化不应针对某一基元,而应体现在多重证据水平上,而指数阈值则只适用于特定站位、区域,仅作为质量分级之用^[17]。指数法丢失了大量信息,可能得出误导性的结果。因此,使用指数必须在适当的条件之下,且需要结合统计分析等其他手段一起使用。

综合评价指数并不乏应用实例,如 Carr^[33]构建了针对传统的三基元的总等级指数,以比较 Galveston 湾不同站位沉积物环境质量。Wildhaber 和 Schmitt^[34]提出危害排序指数,分别求得沉积物化学、毒理和底栖生态 3 个基元各自相对沉积物质量基准、毒性试验对照组毒性阈值的指数以及底栖生物群落的平均耐污度,进而以相同权重计算三者的算术平均指数。Cherry 等^[35]则结合 Soucek 等^[36]提出的参数筛选方法,分别筛选物理、化学、毒理、生态等基元中的参数,构架了生态毒理等级指数;Schmidt 等^[37]通过线性回归、双变量相关分析以及单因素方差分析等手段选取最能反映底栖生物响应的参数,对上述指数进行了修正,提出了改进的生态毒理等级指数。生态毒理等级指数最初是用于评估采矿点源污染等造成的水体沉积物质量恶化,而 Locke 等^[38]将其引入维吉尼亚州 Clinch 河的非点源污染引起的沉积物质量变化评价。此外,Sezen 等^[28]采用多标准决策分析法,结合生物有效性以及生态、毒理提出了综合效应指数;Usero 等^[31]则提出了一种沉积物质量综合指数,用于概述沉积物环境的主要特征并用于不同沉积物环境质量的比较。

1.2.4 最佳专业评判

一般来讲,SQT 的降维方法体系都多赖于 BPJ。BPJ 是一种基于可获得数据和特定站位情况,以专家意见与评判来确定环境风险的方法^[20]。与统计方法相比,BPJ 具有更好的生态相关性,尤其适用于大量数据且不确定性低或少量数据但不确定性高的情况。该方法对特定站位的评价结果可靠性高,但难以处理区域尺度上大量沉积物站位的评价。

为保证评价过程透明、结果可重复性高,Bay 等^[39]以及 Bay 和 Weisberg^[40]提出了一个标准的 BPJ 评价框架,建立了一个标准决策矩阵表。它首先根据各基元的响应情况与参考沉积物相比,将沉积物质量评价结果相对于对照沉积物的差异划分为四类:(1)没有差别;(2)有微小的响应但不能通过统计方法发现;(3)有显

著响应;(4)大的响应;其次,综合各基元,回答两个关键问题:特定站位的沉积物是否存在生物退化?该站位的化学暴露是否足够的高,使其可能导致生物有害效应的发生?前者以沉积物毒性-底栖生物群落结构判断矩阵来评估生物负效应的程度,而后者则以沉积物毒性-化学矩阵来评估化学因素导致的沉积物环境质量变化。最后,将不同基元的评价结果综合,根据化学致污物的生物效应程度,将沉积物划分为6个沉积物等级:未受影响、很可能未受影响、可能受影响、很可能受影响、明显受影响、不确定,最终得到64种可能评价结果及决策选项。评价结果的可靠性评估显示:一般的专家评价的站位分类结果与专家本身高度相关,且其分类评价一致性低,但是采用标准化的BPJ框架则能获得更好的一致性的评价结果,研究中使用BPJ对25个站位沉积物的评价结果仅有5个样品与专家评价结果平均水平的结果不同,仅有一个样品的在BPJ与专家平均水平之间的评价结果有超过一个组别的差异。因此,标准化的BPJ框架,过程透明,不同的个人或机构使用同样数据均能获得相同的评价结果,具有良好的重现性。另外,BPJ框架的个体偏向性较小,因而适用于区域大尺度的评价。

综上所述,数据解译仅是一种评价途径,而不是SQT评价的终点,评价结果需要根据评价要求以及具体的沉积物情况,选择适当的方法。不管采用何种数据分析方法,最终都是为了从单个基元以及多重基元中找出全面反映沉积物质量的信息,做出评价决策。

1.3 应用案例与实践

对于河口沉积物来说,肇因于其盐度与温度的波动,导致底栖生物种类和分布、致污物环境行为的变化,增加了沉积物环境质量评价难度,不能完全效仿淡水或海水沉积物评价,如沉积物评价常用平衡分配法等生物有效性模型、全浓度梯度的沉积物毒性试验以及需要选取对照沉积物的生物调查均很难应用于河口沉积物^[41],但SQT通过结合专家评判的逻辑体系,很好的解决了这些问题。SQT的适用对象从最初的海洋沉积物,逐步扩展到淡水沉积物,河口沉积物,甚至应用于土壤评价等环境介质。另外,SQT还扩展到了水质评价,如污水、沉积物上层水体等。与此同时,SQT的评估对象则涵盖了所有的化学致污物,同时也包括物理栖息地变化等其他形式环境胁迫^[6]。

从地域来看,SQT的使用最早见于北美地区,也是应用最为密集的地区。如Carr等^[42]开展了Corpus Christi海湾沉积物;本方法在欧洲地区的应用也较常见,如Chapman^[43]对North Sea沉积物进行了研究、Del Valls等^[44]则对西班牙Gulf of Cadiz沉积物进行了评价;SQT在南美洲和南极洲也有应用,如Choueri^[45]对Paranagua河口的研究;Morehead等^[46]则将SQT应用到Winter Quarters海湾;在我国大陆地区,应用实例较少,主要原因是沉积物生物毒性方面的研究与实践的不足。目前,已报道的近海沉积物综合评价采用的是结合化学-生态参数两种基元,但仍可视为初步的综合评价方法,如王化泉等人^[47]在粤东近岸浅海区较早地开展了此类研究。

尽管SQT在近海沉积物中还未得到充分的应用,但目前该方法在我国陆地生态系统已经得到了很好的应用,如刘文新等^[48]、何孟常等^[49],他们的研究分别采用三轴图、决策矩阵表和等级模型对沉积物进行了综合评价。两项研究都获得了实测的沉积物毒性测试结果,属于中德生态研究合作计划的一部分。由于SQT的应用需要较强的劳动强度以及相对较高的费用投入,目前大范围的应用常见于发达国家,鉴于我国沉积物毒性评价的不足,以及从上述两项研究的情况,近海沉积物的评价应加强国际合作,以提高基础水平。本文在分析了上述趋势的情况下,总结分析了最近5a SQT应用情况,如表1所示。

从表1可知,SQT研究有如下特点:从环境介质类型来看,涵盖了海湾、河口、河流以及近岸沿海等典型受人为活动影响较大的水体沉积物,并扩展到了陆生土壤;从数据集成方法来看,则以多元统计分析为主,参考比率、综合指数的应用也较多;在基元构成上,大多采用的都是传统的三基元,结合生物放大的SQT也占据一定的比例,反映了作为标准化的SQT框架应用有扩大的趋势;地域上,SQT主要应用在欧洲、北美等发达地区,近5a的发展更集中于美国与西班牙;从评价内容来看,基本上都是用于评估化学致污物引起的沉积物环境质量下降,对于物理栖息地改变等的其他形式的环境胁迫造成的沉积物环境质量恶化研究则鲜有报道,这

表明,在今后很长一段时间内,SQT 的环境压力研究将主要针对传统的有毒或生物富集性化学物质。

表 1 沉积物质量评价“三元法”研究与应用情况(2007—2011 年)

适用对象 Medium	信息集成方法 Integration method	基元构成 Level of evidence	研究区域 Location	文献来源 Reference
海洋沉积物 Marine sediment	多元统计、饼图	C-T-B+BM	西班牙 Algeciras 湾	[50]
	基轴图、指数	C-T-B+BM	西班牙南部沿海	[31]
	多元统计	C-T-B+BM	波兰 Gdansk 湾	[51]
	多元统计、饼图	C-T-B+Bi	西班牙 Galician 沿海	[52]
	判断矩阵表、指数	C-T-B	美国 Chesapeake 湾	[32]
淡水沉积物 Freshwater sediment	多元统计	C-T-B	美国 Ellison Creek 水库	[53]
	指数	C-T-B	美国 Chipola 河	[54]
	多元统计、指数	C-T-B	美国 Davis Creek 河	[55]
	多元统计、指数	C-T-B+TIEs	美国 Anacostia 河	[56]
	多元统计、指数	C-T-B	德国 Fulda、Lahn 河集水区	[57]
河口沉积物 Estuarine sediment	多元统计、参考比率	C-T-B	美国 Passaic 河口	[29]
	多元统计	C-T+BM+Hi	西班牙 Guadalquivir 河口	[12]
土壤 Soil	多标准决策分析、指数	C-T-B	意大利 Acna di Cengio	[28]

C-T-B 代表传统的 3 个基元,分别是沉积物化学(chemistry)、毒性测试(toxicity)以及底栖生物群落结构(benthos);BM、Bi、Hi、TIEs 则分别代表生物放大(biomagnification)、生物标志物(biomarker)、组织病理学(histopathology)和毒性鉴定评估(toxicity identification evaluations)

2 总结与展望

历经近 30a 的发展,沉积物质量评价“三元法”已经成为目前应用最为广泛的综合评价方法,它已经成功应用于全球不同地区的海水、淡水、河口等生态系统以及土壤等多种环境介质。从基元构成上,该方法已经发展成为包括最少 14 种基元,尤其是 TIEs、组织残毒等附加证据权重的应用,使得本方法在生态相关性以及建立致污物-效应的因果关系方面得到长足的改进;在数据解译方法研究上,目前已经发展并改善了已有的多种方法,包括决策矩阵表、统计分析、指数、BPJ 等 4 种主要方法,特别是随着 BPJ 模型的完善以及结合适当的多元统计分析,使得 SQT 已经能够在区域尺度上对大尺度范围内的沉积物进行准确评价,而以各种综合指数为代表的简化方法进一步促进了该方法的管理业务化、满足了公众对环境问题的关注。总之,SQT 降低了沉积物评价的不确定性,解决了沉积物评价的两个难题:沉积物污染的确定及原因、相对污染水平排序,它为沉积物物理-化学指标与生物效应指标建立联系,提高了评价结果的生态相关性。

尽管 SQT 在信息的综合、解译及最终的环境质量决策上具有优势,但是该方法本身也存在一系列的不足,包括(1)需要大量的、不同种类的沉积物数据以及其他环境参数,并耗费大量的人力、物力等资源;(2)生物测试方法没有规范化、标准化,故生物测试结果的可比性不高;(3)评价过程复杂,大部分数据解译方法过程不透明,需要资深、专业的评估者,且这些方法多为定性、半定量,因而评价结果一定程度上受主观因素影响。

沉积物质量评价“三元法”涉及化学、生态学、毒理学等多个学科,其发展有赖于上述学科及其交叉学科的共同发展,同时鉴于我国近海沉积物综合评价基础资料的欠缺,应首先加强知识储备与基础数据的获得,为了进一步提高和改进 SQT,提高评价结果的准确性、降低评价过程的复杂性,未来,应该从上述的不确定性方面着手,进一步对方法体系进行改进。首先,改善指标的代表性,筛选具有独立生态学功能的参数指标,鉴于积累的大量化学数据,尤其要加强化学指标的生物有效性研究,增加其在评价过程中的作用;其次,建立标准的生物测试方法,包括毒性试验的时间、测试指标、参考阈值标准、受试物种等的确定,以便于提高不同沉积物毒性评价结果的比较;第三,改进现有数据解译体系,简化评价过程,同时要提高评价结果的可读性,确立不同评价等级与实际沉积物质量状况的对应关系;第四,发展易于业务化的评价方法,尤其是简易的综合指数研

究,以增加评价的透明度,以减少对专家评判的依赖,降低评价的主观性。

References:

- [1] Borja A, Bricker S B, Dauer D M, Demetriades N T, Ferreira J G, Forbes A T, Hutchings P, Jia X P, Kenchington R, Marques J C, Zhu C B. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(9): 1519-1537.
- [2] Borja A, Bricker S B, Dauer D M, Demetriades N T, Ferreira J G, Forbes A T, Hutchings P, Jia X P, Kenchington R, Marques J C, Zhu C B. Ecological integrity assessment, ecosystem-based approach, and integrative methodologies: are these concepts equivalent?. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(3): 457-458.
- [3] Chapman P M. Letter to the editor: Borja et al. 's (2008) "Overview of integrative tools and methods... worldwide" omits key elements. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(3): 456-456.
- [4] Long E R, Chapman P M. A sediment quality triad: measures of sediment contamination, toxicity and infaunal community composition in Puget Sound. *Marine Pollution Bulletin*, 1985, 16(10): 405-415.
- [5] Semenzin E, Critto A, Carlon C, Rutgers M, Marcomini A. Development of a site-specific Ecological Risk Assessment for contaminated sites: Part II. A multi-criteria based system for the selection of bioavailability assessment tools. *Science of the Total Environment*, 2007, 379(1): 34-45.
- [6] Chapman P M, McDonald B G. Using the Sediment Quality Triad (SQT) in ecological risk assessment//Blaise C, Férard J F, eds. *Small Scale Freshwater Toxicity Investigations. Vol 2: Hazard Assessment Schemes*, 2005: 305-329.
- [7] Chapman P M. Determining when contamination is pollution-Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environment International*, 2007, 33(4): 492-501.
- [8] Burton G A, Chapman P M, Smith E P. Weight-of-evidence approaches for assessing ecosystem impairment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1657-1673.
- [9] Burton G A, Batley G E, Chapman P M, Forbes V E, Smith E P, Reynoldson T, Schlegel C E, den Besten P J, Bailer A J, Green A S, Dwyer R L. A weight-of-evidence framework for assessing sediment (or other) contamination: improving certainty in the decision-making process. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1675-1696.
- [10] Borgmann U, Norwood W P. What is wrong with the sediment quality triad//Penney K C, Coady K A, Murdoch M H, Parker W R, Niimi A J, eds. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 2331: 53.
- [11] Chapman P M, Hollert H. Should the sediment quality triad become a tetrad, a pentad, or possibly even a hexad? *Journal of Soils and Sediments*, 2006, 6(1): 4-8.
- [12] DelValls T A, Riba I. A weight of evidence approach to assess sediment quality in the Guadalquivir estuary. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2007, 10(1): 101-106.
- [13] Maruya K A, Landrum P F, Burgess R M, Shine J P. Incorporating contaminant bioavailability into sediment quality assessment frameworks. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2010, doi: 10.1002/ieam.135.
- [14] Barnett A M, Bay S M, Ritter K J, Moore S L, Weisberg S B. *Sediment Quality in California Bays and Estuaries*. Costa Mesa (CA), USA: Southern California Coastal Water Research Project, 2007.
- [15] MacDonald D D, Ingersoll C G. Tools for assessing contaminated sediments in freshwater, estuarine, and marine ecosystems//Poletto C, Charlesworth S, eds. *Sedimentology of Aqueous Systems*. New York: Wiley-Blackwell, 2010: 171-199.
- [16] Chapman P M, Anderson J. A decision-making framework for sediment contamination. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2005, 1(3): 163-173.
- [17] Chapman P M, Anderson B, Carr S, Engle V, Green R, Hameedi J, Harmon M, Haverland P, Hyland J, Ingersoll C, Long E, Rodgers J Jr, Salazar M, Sibley P K, Smith P J, Swartz R C, Thompson B, Windom H. General guidelines for using the sediment quality triad. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, 34(6): 368-372.
- [18] Chapman P M. Presentation and interpretation of sediment quality triad data. *Ecotoxicology*, 1996, 5(5): 327-339.
- [19] Menzie C, Henning M H, Cura J, Finkelstein K, Gentile J, Maughan J, Mitchell D, Petron S, Potocki B, Svirsky S, Tyler P. Special report of the Massachusetts weight-of-evidence workgroup: a weight-of-evidence approach for evaluating ecological risks. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1996, 2(2): 277-304.
- [20] Chapman P M, McDonald B G, Lawrence G S. Weight-of-evidence issues and frameworks for sediment quality (and other) assessments. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1489-1515.
- [21] Chapman P M. The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. *Science of the Total Environment*, 1990, 97-98:

815-825.

- [22] Pardal M A, Cardoso P G, Sousa J P, Marques J C, Raffaelli D. Assessing environmental quality: a novel approach. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 267: 1-8.
- [23] Smith E P, Lipkovich I, Ye K Y. Weight-of-evidence (WOE): quantitative estimation of probability of impairment for individual and multiple lines of evidence. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1585-1596.
- [24] Reynoldson T B, Smith E P, Bailer A J. A comparison of three weight-of-evidence approaches for integrating sediment contamination data within and across lines of evidence. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1613-1624.
- [25] Bailer A J, Hughes M R, See K, Noble R, Schaefer R. A pooled response strategy for combining multiple lines of evidence to quantitatively estimate impact. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2002, 8(7): 1597-1611.
- [26] Hollert H, Heise S, Pudenz S, Brüggemann R, Ahlf W, Braunbeck T. Application of a sediment quality triad and different statistical approaches (Hasse diagrams and fuzzy logic) for the comparative evaluation of small streams. *Ecotoxicology*, 2002, 11(5): 311-321.
- [27] Hartwell S I, Clafflin L W. Cluster analysis of contaminated sediment data: nodal analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24(7): 1816-1834.
- [28] Semenzin E, Critto A, Rutgers M, Marcomini A. Integration of bioavailability, ecology and ecotoxicology by three lines of evidence into ecological risk indexes for contaminated soil assessment. *Science of the Total Environment*, 2008, 389(1): 71-86.
- [29] Iannuzzi T J, Armstrong T N, Long E R, Iannuzzi J, Ludwig D F. Sediment quality triad assessment of an industrialized estuary of the northeastern USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 139(1/3): 257-275.
- [30] Chapman P M. The Sediment Quality Triad: then, now and tomorrow. *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, 13(1/6): 351-356.
- [31] Usero J, Morillo J, Bakouri H E. A general integrated ecotoxicological method for marine sediment quality assessment: application to sediments from littoral ecosystems on Southern Spain's Atlantic coast. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(12): 2027-2036.
- [32] Hartwell S I, Hameedi M J, Pait A S. Empirical assessment of incorporating sediment quality triad data into a single index to distinguish dominant stressors between sites. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 174(1/4): 605-623.
- [33] Carr R S, Chapman D C, Howard C L, Biedenbach J M. Sediment quality triad assessment survey of the Galveston Bay, Texas system. *Ecotoxicology*, 1996, 5(6): 341-64.
- [34] Wildhaber M L, Schmitt C J. Hazard ranking of contaminated sediments based on chemical analysis, laboratory toxicity tests, and benthic community composition: prioritizing sites for remedial action. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, 22(3): 639-652.
- [35] Cherry D S, Currie R J, Soucek D J, Latimer H A, Trent G C. An integrative assessment of a watershed impacted by abandoned mined land discharges. *Environmental Pollution*, 2001, 111(3): 377-388.
- [36] Soucek D J, Cherry D S, Currie R J, Latimer H A, Trent G C. Laboratory to field validation in an integrative assessment of an acid mine drainage-impacted watershed. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(4): 1036-1043.
- [37] Schmidt T S, Soucek D J, Cherry D S. Modification of an ecotoxicological rating to bioassess small acid mine drainage-impacted watersheds exclusive of benthic macroinvertebrate analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(5): 1091-1097.
- [38] Locke B A, Cherry D S, Zipper C E, Currie R J. Land use influences and ecotoxicological ratings for upper Clinch River tributaries in Virginia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 51(2): 197-205.
- [39] Bay S, Berry W, Chapman P M, Fairey R, Gries T, Long E, MacDonald D, Weisberg S B. Evaluating consistency of best professional judgment in the application of a multiple lines of evidence sediment quality triad. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2007, 3(4): 491-497.
- [40] Bay S M, Weisberg S B. Framework for interpreting sediment quality triad data. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2011. doi: 10.1002/ieam.118.
- [41] Chapman P M, Wang F Y. Assessing sediment contamination in estuaries. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, 20(1): 3-22.
- [42] Carr R S, Montagna P A, Biedenbach J M, Kalke R, Kennicutt M C, Hooten R, Cripe G. Impact of storm-water outfalls on sediment quality in Corpus Christi Bay, Texas, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(3): 561-574.
- [43] Chapman P M. Pollution status of North Sea sediments-an international integrative study. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 91(1): 313-322.
- [44] DelValls T Á, Forja J M, Gómez-Parra A. Integrative assessment of sediment quality in two littoral ecosystems from the Gulf of Cádiz, Spain. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, 17(6): 1073-1084.
- [45] Choueri R B, Cesar A, Torres R J, Abessa D M S, Morais R D, Pereira C D S, Nascimento M R L, Mozeto A A, Riba I, DelValls T A. Integrated sediment quality assessment in *Paranaguá* Estuarine System, Southern Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(7): 1824-1831.

- [46] Morehead S, Montagna P, Kennicutt M C. Comparing fixed-point and probabilistic sampling designs for monitoring the marine ecosystem near McMurdo Station, Ross Sea, Antarctica. *Antarctic Science*, 2008, 20(5): 471-484.
- [47] Wang H Q, Zhao L Y. Preliminary study of integrated marine environmental quality assessment by combining chemical and ecological factors in the near shore of east Guangdong, China. *Marine Environmental Science*, 1985, 4(4): 10-16.
- [48] Liu W X, Tang H X. Sediment quality criteria for heavy metal pollution in the Lean River I. Sediment quality triad approach. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(2): 120-126.
- [49] He M C, Wang Z J. Assessing heavy metals pollution in the Le'an river by multi-index and an integrative model. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 80-86.
- [50] Morales-Caselles C, Riba I, Sarasquete C, DelValls T Á. The application of a weight of evidence approach to compare the quality of coastal sediments affected by acute (*Prestige 2002*) and chronic (Bay of Algeciras) oil spills. *Environmental Pollution*, 2008, 156(2): 394-402.
- [51] Bettinetti R, Galassi S, Falandysz J, Camusso M, Vignati D A L. Sediment quality assessment in the gulf of Gdańsk (Baltic Sea) using complementary lines of evidence. *Environmental Management*, 2009, 43(6): 1313-1320.
- [52] Morales-Caselles C, Riba I, DelValls T Á. A weight of evidence approach for quality assessment of sediments impacted by an oil spill: the role of a set of biomarkers as a line of evidence. *Marine Environmental Research*, 2009, 67(1): 31-37.
- [53] McPherson C, Chapman P M, deBruyn A M H, Cooper L. The importance of benthos in weight of evidence sediment assessments-A case study. *Science of the Total Environment*, 2008, 394(2/3): 252-264.
- [54] Hemming J M, Winger P V, Rauschenberger H, Herrington K, Durkee P, Scollan D. Water and sediment quality survey of threatened and endangered freshwater mussel habitat in the Chipola River Basin, Florida. *Endangered Species Research*, 2008, 6(1): 95-107.
- [55] Huddleston G M III, Dorn P B, Gillespie W B Jr, Wong D C L, Slocumb J P. Assessment of the ecological effects of arsenic on a southern ohio, USA stream. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2009, 5(2): 302-319.
- [56] McGee B L, Pinkney A E, Velinsky D J, Ashley J T F, Fisher D J, Ferrington L C, Norberg-King T J. Using the Sediment Quality Triad to characterize baseline conditions in the Anacostia River, Washington, DC, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 156(1/4): 51-67.
- [57] Bartzke M, Delov V, Stahlschmidt-Allner P, Allner B, Oehlmann J. Integrating the fish embryo toxicity test as triad element for sediment toxicity assessment based on the Water Framework Directive approach. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(3): 389-399.

参考文献:

- [47] 王化泉, 赵丽云. 海洋环境质量化学、生态学因素综合评价的初步研究-粤东近岸浅海区评价. *海洋环境科学*, 1985, 4(4): 10-16.
- [48] 刘文新, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 I. C-B-T 质量三合一方法 (Triad). *环境科学学报*, 1999, 19(2): 120-126.
- [49] 何孟常, 王子健. 利用综合评价方法和等级模型评价乐安江水体重金属污染. *生态学报*, 2002, 22(1): 80-86.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《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 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 14 (July, 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:1000717	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