

河道生态系统特征及其自净化能力研究现状与发展

杨丽蓉^{1,2}, 陈利顶^{1,*}, 孙然好¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:河道生态系统包括河道水体和河岸带两大部分, 具有净化水体、降低污染物浓度的功能。研究河道生态系统的自净化能力对河道生态系统的健康评价及水环境管理具有重要的意义。目前该领域的研究主要侧重于两个方面: 一方面是运用水质模型的方法模拟评价河道水体的自净化能力, 另一方面则是研究河岸植被缓冲带对净化水体的作用。系统总结了目前研究的特点与不足, 指出了今后应该重视的研究领域, 主要包括: (1) 应加强研究陆地生态系统空间异质性对河道自净化能力的影响研究; (2) 需要系统解剖河道剖面形态结构与空间布局对河道水质自净化能力的影响; (3) 重视面向外部复杂环境的参数获取方法的研究; (4) 综合河岸生态系统与河道水体生态系统, 系统研究非点源污染在陆-水迁移和水体运移中河道生态系统自净化能力的时空变化特征, 从而为开展河道生态系统健康评价, 河道生态系统管理提供科学的依据。

关键词:河道生态系统; 河道水体; 河岸带; 自净化能力

文章编号: 1000-0933(2009)09-5066-10 中图分类号: Q149, X26 文献标识码: A

River ecosystems and their self-purification capability: research status and challenges

YANG Li-Rong^{1,2}, CHEN Li-Ding^{1,*}, SUN Ran-Hao¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5066 ~ 5075.

Abstract: A river ecosystem comprises stream channels and adjacent riparian zones. It provides some significant ecosystem services through diluting pollution concentrations and purifying stream waters. Therefore, studies on the self-purification capability of a river ecosystem are critical for ecosystem health assessment and environmental management. Two major research approaches have been developed to study the river ecosystem structure and services, with one focusing on the use of water quality models to assess the self-purification capability of a river ecosystem and the other studying the roles of riparian vegetation buffers in purifying stream waters. Based on extensive literature reviews, we have identified several areas that need further research. Firstly, more research should be carried out to investigate how terrestrial landscape heterogeneity and river channel morphodynamics could affect the self-purification capability of a river ecosystem. Secondly, more emphases should be paid upon the methodology development that can enhance environmental parameter extraction for implementing water quality predictive models in complex landscapes. Lastly, a significant area for continuing research is the systematic study on non-point pollutants transporting from land to water and within stream waters and the resultant spatio-temporal characteristics of the self-purification capability of a river ecosystem; such a study can provide useful insights for river ecosystem assessment and management.

Key Words: river ecosystem; river channel; riparian zone; self-purification capability

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2008ZX07526-002-02)

收稿日期: 2009-03-20; 修订日期: 2009-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

经济的发展、人口的迅速增长、城市化的加速以及工业和农业集约化发展,使得用水需求越来越大,相应产生了越来越多的污水和废水,日益严重的点源污染及非点源污染造成水体自净化能力逐渐下降。河道生态系统作为人类社会经济的基础资源,不仅创造和维持了人类赖以生存和发展的生态环境条件,而且对社会、经济、环境的协调发展具有至关重要的作用。

河道生态系统的自净化能力对减少水体污染具有重要的作用。本文从河道水体自净化能力和河岸植被净化能力两个方面,总结归纳了河道生态系统自净化能力当前研究的现状和不足之处,并指出了应重点开展的研究方向。通过对人类活动影响下的河道生态系统的自净化能力的研究,一方面为开展河道生态系统健康评价具有重要的作用,另一方面分析其变化的原因对保护河道生态系统具有科学的指导意义。

1 河道生态系统的内涵及水体自净化能力

1.1 河道生态系统的内涵

1.1.1 河道生态系统的概念

河道作为河流的主体,是汇集和接纳地表和地下径流的场所及连通内陆和大海的通道,是河流生态系统横向结构的重要组成部分^[1]。河道生态系统由河道水体和河岸带两部分组成,河道水体生态系统主要是由河床内的水生生物及其生境组成;河岸带生态系统主要由岸边的植物、迁徙的鸟群及其环境组成,是陆地生态系统和河流生态系统进行物质、能量、信息交换的过渡地带^①。河岸带作为河道水体运动的外边界条件,是河道稳定的关键地带^[2]。

1.1.2 河道生态系统的结构

河道生态系统的结构参照河岸带四维结构的特征,可定义为系统内各组成要素在时空上的配置和联系,可概括由河道水体及河岸边高地组成的河道横向结构、由河道上游至下游组成的纵向结构,由河道内地表水至地下水进行物质交换和能量流动的垂直结构及时间尺度上的变化,河道生态系统的结构和功能呈现不同变化的时间结构组成的四维结构^[3]。

1.1.3 河道生态系统的服务功能

河道生态系统服务功能指人类直接或间接的从河道生态系统中获取的利益^[1]。河道生态系统的服务功能主要体现在供应水源、输水泄洪、交通运输、水产养殖、水生生物栖息、纳污、降解污染物、调节气候、补给地下水、景观娱乐等多个方面。本文参照河流生态系统服务功能的不同分类^[4~6],同时依据河道生态系统的组成特点、结构特征、生态过程和效用,并按照功能作用性质的不同,将河道生态系统服务功能可归纳划分为调节支持功能、环境净化功能、提供产品功能及娱乐文化功能。

调节支持功能主要表现为一方面河道及其沿岸的植被具有自动调节水文循环、输水泄洪、调节气候廊道、补给地下水的功能^[4];另一方面河道生态系统为河道及河岸的各种动植物提供了其生存所必须的淡水和栖息环境。

环境净化功能主要是指河道内及两岸的植被及水生生物通过自然稀释、扩散、氧化等一系列的物理和生物化学反应来截留和净化由径流带入河道的污染物,从而使各种物质良好的循环利用,达到净化水体的作用^[3]。

提供产品功能主要是指河道生态系统为人类提供各种动植物产品。

娱乐文化功能主要指河道及河岸为人类提供休闲娱乐的场所及美学、艺术、文化等方面的精神及科学价值。

1.2 河道水体自净化能力

1.2.1 当前河道生态系统存在的问题

随着经济发展和人口增加,人类活动对水资源的服务功能需求越来越高,在河流上大规模的筑坝拦截河

① 高小琴. 南通市城市生态河道构建理论及其应用. 博士学位论文. 南京: 南京林业大学, 2008.

流水量,部分河流由于缺乏有效管理引起河道水量大幅度的减少甚至断流,降低了水体的自净能力,同时降低河道生态系统的恢复力及抵抗力,加剧了水体污染,严重影响了河道生态系统的结构和功能^[7]。

随着人类活动加强,河道的形态结构发生了巨大的变化,主要表现为:①河道纵向的蜿蜒性降低,河道渠道化和裁弯取直工程改变了天然河流的基本形态,出现了直线或折线形态的河流;②河道断面形状多样性降低,呈现几何规则化、单一化的断面形式;③河床材料由透水性能的材料变为硬质化的不透水性材料;④水利工程的建设(如:筑坝、水库、堤岸)造成了河流形态表现出不连续性。河道形态结构的变化,河道生态系统形态多样性的降低,使得河道生态系统生境异质性降低,生物多样性降低,引起了河道生态系统服务功能的降低,水体自净化能力的下降^[8]。

1.2.2 河道水体自净化能力

水体自净是水体受到污染后,由于物理、化学、生物等因素的作用,使污染物的浓度和毒性逐渐降低,经过一段时间,恢复到受污染以前状态的自然过程^[9]。水体自净过程复杂,受到多种因素的影响,根据净化机理,可分为物理自净过程、化学自净过程和生物化学自净过程^[10]。

物理自净过程是指通过污染物在水体中进行混合、稀释、扩散、挥发、沉淀等作用,使水体得到一定程度净化的过程。物理自净能力的强弱取决于污染物自身的物理性质,如密度、形态、粒度等;水体的水文条件,如温度、流速、流量、河道的深度、河床的形式等;和其他因素,如废水排放口的位置、排放的方式等^[10]。

化学自净过程是指水体中的污染物质通过氧化、还原、中和、吸附、凝聚等反应,使其浓度降低的过程。影响这种自净能力的因素有污染物质的形态和化学性质、水体的温度、氧化还原电位、酸碱度等。水中的化学自净能力的强弱,主要反应在3个方面:一是溶解氧(DO)的含量水平上^[11];二是在有机污染物的氧化分解能力上^[12~14],其中化学需氧量(COD)是反映水体有机污染程度的一个重要指标其含量的高低能体现水体质量的好坏;三是在营养盐的形态转化和消减程度上^[15],三态无机氮的含量变化能够反映水体自净能力的强弱。

生物化学自净过程是指进入水体的污染物,经过水生生物吸收、降解作用,使其浓度降低或转变为无害物质的过程。影响生物化学净化过程快慢和程度主要是与污染物的性质和数量、微生物的种类、水体的温度及供氧状况等条件有关。

在水体自净化中,物理自净过程、化学自净过程和生物化学自净过程相互交织相互影响,但任何一个生态系统的自净能力都是有限的,当排入的污染物超过了环境容量,生态系统就会被破坏,污染也会日益加重。水体的自净能力主要体现在水体中有机污染物的降解、N和P等营养元素的转化、颗粒态污染物的沉积以及沉积物中污染物的吸附和释放效应等方面^[16~18],可以使用水体的复氧系数、化学需氧量(COD_{Cr})降解系数、五日生化需氧量(BOD₅)降解系数、氨化系数、硝化系数、反硝化系数、颗粒物的沉降速率、沉积物中磷释放速率和吸附速率等水质参数来定量表征水体的自净过程^[19,20]。

2 河道生态系统自净化能力研究现状及存在的问题

2.1 河道生态系统自净化能力研究现状

河道生态系统自净化能力是河道生态系统的重要功能之一,多年来针对河道生态系统的自净化能力开展了大量研究的工作^[21~24]。归纳起来可以概括为以下两个方面。

2.1.1 河道水体自净化能力

水体自净化是受污染的河流,经过一段时间后,发生了一系列的物理、化学及生物作用,使得污染物的浓度降低,水体恢复到原有的状态,这种水体自净化过程呈现一定的规律性,通过探求污染物在水体中的自净化的规律,从而可以了解污染物在水体中任意点的浓度,为水环境质量评价、预测、治理提供理论上的依据^[3]。当前,河流水质模型就是定量描述污染物在水环境中的迁移转化规律及其影响因素之间的相互关系的数学模型,近十几年来在河道水体生态系统自净化能力的研究方面取得了较大的成功,可以成功地应用于河流、流域的水质规划和管理^[25]。水质模型可用于预测自然过程和人类活动对河流及水库系统中水的物理、化学和生物特性的影响,评价各种点源和非点源污染负荷的影响、水污染治理的效果,同时可优化污染水体的

治理方案。水质模型有助于深入了解污染物在水体中的迁移转化规律,是开展环境影响评价、环境规划、环境管理和水污染综合防治等工作的基本手段。

国外在水质模型方面的研究起步较早,而且取得了许多研究成果,如:Demuren 和 Rodi^[26,27]应用平面二维水质模型及三维水质模型对污染物在连续弯道中的扩散运动进行了数值模拟。Sladkovich^[28]应用有限差分法建立平面二维污染物输运模型对污染物的浓度进行了分析计算。其后 Chau^[29,30]采用有限差分法建立了平面二维双层富营养化模型,对 Tolo 港进行了水动力和水质的数字模拟。Zhu 和 Jia^[31]考虑了多个水质变量的迁移和转化,采用有限元方法建立了深度平均的平面二维水动力及水质模型 CCHE2D。Olsen^[32]建立了三维水动力、浮游植物的数学模型,主要研究了浮游植物生长和随水深光强的变化。Brett 和 Arhonditsis^[33]建立了三维富营养化模型,分析了浮游植物的动态变化,Cao 和 Jia^[34]建立了三维水动力水质模型,模型考虑了 4 个系统,浮游植物系统、氮循环、磷循环、溶解氧平衡系统,并对浅牛轭湖进行了水质模拟。

当前也有很多成熟的水质模型,应用较多的有美国环境保护署开发的 QUAL2, WASP7 及 BASINS,美国陆军工程兵团研制的 CE-QUAL-R1, CE-QUAL-RIV1, CE-QUAL-W2 及 WQRRS,美国地质调查局开发的 GENSCN 和 MMS。商业化的模型系统如丹麦水力研究所开发的 MIKE11, MIKE21, MIKE3, MIKE SHE 等。

国内在水质模型研究方面也开展了大量的研究工作,主要包括以下方面:

(1) 一维水质模型研究 李锦秀^[35]建立三峡水库整体一维水质模型,该模型为模拟预测三峡水库建成以后库区不同江段水质变化趋势提供了技术支持;彭虹^[36]采用有限体积法建立了一维河流综合水质模型,该模型可以用于单一河道的模拟;褚君达^[37],韩喜龙^[38]等人采用类似河网水动力三级联解方法建立了河网水质模型,但对水质变量之间的相互作用、转化机理考虑的过于简单;吴挺峰^[39]应用河网三级联解法建立了总磷的水流和水质模型,并考虑河网概化密度对河网水量水质模型的影响。

(2) 二维水质模型研究 陈凯麟^[40]建立了流场、温度场的模拟及描述藻类、总氮、总磷在水库中的输移、转化过程的总体模式,该模式是一级、单步的简化,对内蒙古岱海电厂的温排水对岱海湖的热影响及富营养化作了预测;杨天行^[41]以水库中总磷的浓度作为水库富营养化的重要指标,根据水库水环境条件,给出污染物总磷输移的二维数学模型,采用 Galerkin method 有限元法进行求解,并绘制了等值线图,得到水库中总磷的时空变化规律。饶群^[42]、徐祖信^[43]、龚春生^[44]等人在二维水质模型上也做了大量的研究;王艳^[45]基于二维水流水动力学模型、具有源汇项的对流扩散方程及水生态系统动力学模型,考虑浅水水体生物群落中影响水体水质及营养物质循环的主要种群的演化规律,建立浅水水体生态修复模型,该模型包括水动力学模型、守恒物质对流扩散模型和富营养化动力学模型。

(3) 三维水质模型研究 沈永明^[46]将污染物扩散输移的湍流模型与污染物的生物、化学转化模型相结合,建立了物理-化学-生物综合作用的近海水域污染物迁移转化水质模型,模型可以模拟 20 多个水质状态变量及相互作用;刘昭伟、陈永灿^①采用有限元模型模拟了三峡水库蓄水前后万州江段的流速场和关键水质指标的浓度场,该方法继承了分层模型的基本思想,将水体沿垂直方向划分为若干层以反映物理量在垂直方向的变化,而忽略了每一层中物理量的垂直变化;李志勤^[47]对可溶于水的污染物及油膜污染在水库中的运移情况,选择直接求解三维污染物输运方程来研究水库中污染物的运动规律,开发了紫坪铺水库三维水质预警系统;陈求稳^[48]建立了三维富营养化模型,并模拟了营养物质及海藻的生物量的年际动态变化。

当前,国内外学者针对河流水质模型已经做了很多研究工作,但是由于污染物在河流水环境行为的不确定性,模拟的结果往往与实际测量的结果有较大的误差^[49],因此在今后的研究中应全面的考虑河流水质变量,深入的了解水体中物质迁移转化的机理,从而使模型模拟的结果更切合实际,更好的为开展环境影响评价、环境规划、环境管理和水污染综合防治等工作提供理论基础和科学指导。

2.1.2 河岸带植被净化能力研究

河岸植被带具有缓冲功能,即过滤、渗透、吸收、滞留等机械、生物、化学等作用使得进入河流的地表和地

① 刘昭伟. 三峡水库岸边水域水环境特性及承载能力研究:(博士学位论文). 北京:清华大学, 2004.

下水的污染物的毒性降低,达到涵养水源,净化水体的作用^[50,51]。在河岸带地区建立植被缓冲带的生态系统管理模式已被美国农业部推荐为控制非点源污染的最佳管理措施之一^[41],广泛应用于美国、日本等发达国家。目前,河岸带植被净化能力研究主要侧重于以下几个方面:

(1) 河岸植被缓冲带对 N、P 及农药的净化机理研究 国外研究河岸植被缓冲带对 N、P 及农药的净化机理,开始于 20 世纪 80 年代^[52,53],Peterjohn^[50]认为河岸带可滞留 89% 的 N 和 80% 的 P,研究发现植被缓冲带主要对沉积物地表径流中的磷酸盐以及浅层地下水中扩散的硝酸盐有很好的截留作用^[54~57]。N 的净化机理主要是通过 N 矿化、硝化作用、反硝化、植物吸收、N 固定、氨挥发等方式来实现;P 的净化机理通过土壤或沉积物吸附、植物吸收、微生物吸收、泥炭吸附来实现。不同河岸带截留转化效率差异较大,主要取决于河岸带的水文过程、河岸带土壤特性与植被群落结构、人类活动性质及季节动态等因素^[58]。

(2) 河岸植被缓冲带的功能效应研究 河岸植被带的宽度决定了它的功能效应。适宜的宽度,可以使得河岸植被缓冲带达到最大的纳污能力,Mander^[59]研究发现植被缓冲带的有效宽度与相应时段内地表径流强度、流域坡长和坡度成正比,与流域地表的粗糙度系数、缓冲带内渗入的水流流速及缓冲带内土壤的吸附能力成反比。河岸植被缓冲带的宽度还与物种保护有密切的关系,Kunley^[60]研究发现在高地和河岸带两种生境下,河岸带的森林物种多样性和平衡性都高于高地森林,所有物种的密度及栖息的 3 种鸟类的密度也高于高地森林,并随河岸带保护区的宽度而增加。

河岸带的宽度与河流的大小、宽度、河岸带树木的高度及河岸带过程与生境的侧向影响范围等因素有关^[61]。关于河岸植被缓冲带的宽度,当前只是给出了定性的范围^[62],并没有精确的确定方法;许多学者根据研究区概况,从不同的角度设计河岸植被缓冲带的适宜宽度,如 Xiang^[63]对比分析试验缓冲区和模拟研究的缓冲区,并结合设定的参数,建立模型,运用地理信息系统的方法计算了河岸带缓冲区的范围。

(3) 河岸植被缓冲带植物群落结构研究 河岸植被缓冲带植物群落结构的研究,为有效评价河岸带的功能,建立有效的缓冲区提供科学的依据。河岸带的植被类型一般包括林地、灌丛和草地。一些研究认为岸边林缓冲带同岸边草地缓冲带相比,在降低硝态氮的浓度上较好,而在截留总磷和可溶态磷上较差,如 Haycock^[64]研究发现以白杨为主的森林河岸带要比多年生黑麦草截留硝态氮的效率要高。另一些研究认为森林河岸带和草地河岸带均能有效的截留来自农田径流中的氮素,如 Osborne^[65]研究发现森林缓冲带和草地缓冲带在降低浅层地下水中硝态氮方面都具有较好的效果;Mander^[59]等在美国和爱沙尼亚地区研究发现,河岸林的不同林龄吸收 N、P 的作用有差异,发现树龄较小的河岸林 N、P 的吸收率较好,这是由于这类河岸缓冲带中的植被和土壤及土壤微生物的活动能力和吸附能力更强;研究还发现植被的数量及郁闭度大小对河岸缓冲带的功能也有较大影响。

(4) 河岸植被缓冲带模型模拟及综合评价 有关河岸带模型研究最典型的是由 Lorwtanc^[66]等人开发的河岸生态系统管理模型(The Riparian Ecosystem Management Model),简称 REMM 模型。该模型能够确定缓冲区在不同宽度、植被、土壤和坡度条件下对水质的影响,可以精确的预测缓冲区的功能;但是该模型的特点是需要大量的实测数据,实际应用起来较为困难。

国内在河岸植被缓冲带方面也开展了大量研究,主要包括以下方面:

(1) 河岸植被缓冲带土壤环境的研究 河岸带的突出特点是水分多、土壤肥力较高、空气湿度也较高^[67]。但当前有关河岸植被缓冲带土壤生态过程的研究相对较少,张兴正^[68]等在长江口北支潮滩,通过对沉积物-水界面无机氮的交换通量及季节变化研究发现,滨岸地区的沉积物对水体中的氮有良好的去除能力,是水体中硝氮、氨氮的汇;同时,河口滨岸生态系统是一个脆弱且处于动态变化的系统,随着外界条件的变化,河口沉积物-水界面的物质交换会受到很大的影响,有可能从营养盐的汇转化为营养盐的源,对水体造成二次污染。崔东海^[69]对帽儿山林场不同河岸带植被类型土壤水分-物理性质的研究分析不同土壤理化性质对河岸带功能的影响,分析了不同类型河岸缓冲带在维持水质方面的差异性。

(2) 水质净化作用的植被特性 由于植物带中位于水面下的茎秆及水中的枯枝败叶上会附着大量微生

物,土壤也会有大量微生物存在,它们可降解水中的营养物质,减轻河流中的非点源污染。李睿华等^[70~72]通过模拟河道水生植物带,研究河道植物在去除水中污染物、改善局部水环境中的重要作用。王超^[73]系统研究了河岸芦苇对氨氮的消减与净化作用,为河流水生生态系统修复和水质预测预报提供了科学依据。

(3)退化河岸带生态系统的恢复与重建 由于人类活动的影响,河岸带生态环境遭到破坏,目前许多学者在恢复和重建退化的河岸带生态系统研究中做了大量的研究工作。在理论方面,如张建春^[74]将河岸带的生态重建概括为河岸带生物重建、河岸缓冲带生境重建和河岸带生态系统结构与功能恢复三个部分。杨海军^[75]也认为,退化河岸生态系统修复的主要内容应包括适于生物生存的生境缀块构建、适于生物生存的生态修复材料以及河岸生态系统恢复过程中自组织机理研究。颜昌宙^[76]认为水位的涨幅变化和水质条件是河岸带最重要的决定性因素。因此,在对河岸带进行生态恢复与重建时,需要考虑土壤、植被、生物、水位和水质条件的恢复。在实践方面也开展了一些研究工作,如黄川^[77]对三峡库区湖滨带的特殊情况,认为最好的选择是以植被工程为主、土石工程为辅的规模化治理,实现库区生态系统的恢复与重建。张建春^[78]安徽潜山县潜水退化河岸带滩地近 6a 的生态恢复与重建试验,研究证明通过施加优化的人为生态工程措施,可明显缩短重建时间,迅速提高土壤肥力,改善河岸带下垫面的微生态环境,增加生物多样性。

2.2 河道生态系统自净化能力研究存在的问题

尽管国内外针对河道生态系统的自净化能力开展了大量的研究工作,并取得了一些成果,但是总括起来仍然存在以下问题。

(1)河道水体生态系统的自净化能力研究多运用水质数学模型的模拟研究,缺乏实用性和可操作性。主要表现在:① 对水质变量考虑不全面,构建模型时水质指标间的相互作用、转化机理往往作简单处理。由于水环境对污染物的行为变化影响很复杂,且模型在构建时对污染物的迁移、转化机理认识不够,造成模型模拟的结果往往与实际测量之间有较大的误差,模拟的结果只能给出相对的变化值和趋势,不能指导生产实践。② 水质模型的参数获取多依赖于室内模拟实验,从而降低了水质模型模拟结果的真实性和准确性。构建后的模型,往往对特定研究地区较适合,当推广该模型时,模型的适宜性大大降低^[49]。

(2)河岸植被缓冲带在污染物截留净化能力方面的研究,已经开展了大量的研究工作,并取得了重要进展,但仍然存在一些不足之处:① 外在因素研究较多,多侧重人类干扰对河岸植被缓冲功能的影响,如土地利用,而对植被缓冲带的内在演变机理重视不够,对植被缓冲带本身的承载力研究较少。② 单因素的研究较多,如植被因子、土壤因子的影响研究,而对河岸植被缓冲带综合型研究较少,在完全的考虑河岸植被缓冲带内整体的自然地理特征前提下,将人类干扰因子与自然地理综合因子结合的研究,相对不多。③ 植被缓冲带的静态功能研究较多,但对植被缓冲带的水质净化功能的时空动态变化关注不够。④ 控制性的实验研究工作较多,从生态系统管理的角度开展的原位监测研究相对较少,使得许多研究结果在指导生产实践时缺乏针对性和科学性^[79,80]。

3 河道生态系统研究的发展方向

目前,国内外开展的河道生态系统自净化的研究,内容相对较多,但由于研究对象本身的复杂性,人类活动带来的干扰的不确定性,使得河道生态系统自净化能力的研究难度增加。未来应在全面考虑研究区域的自然、社会和经济的背景下,综合的运用多学科的理论和方法,从以下几个方面着手研究河道生态系统的自净化能力。

(1)加强河道形态结构及其空间布局对河道水质自净化能力的影响研究 目前在河道横向剖面结构、纵向剖面结构方面,开展了大量研究,但是对于河道空间布局对河道水质净化能力的影响研究相对比较薄弱。研究河道形态结构的组合及其布局与河道生态系统的自净化能力的关系,分析当前人为干扰下河道形态结构对河道生态系统水质自净化能力的综合影响,对于探讨流域尺度的生态系统管理具有重要价值^[8]。

(2)加强河道生态系统水质净化能力参数的原位研究 目前在水质模型的参数获取中,更多的是运用室内控制模拟实验获取相关的模型参数,直接利用野外监测数据确定模型参数的研究相对较少。为此,应重视

开展面向野外复杂环境下各种水质参数获取方法的研究,从而使模型模拟的结果更切合实际情况^[49]。

(3)加强河道水体和河岸带自净化能力的综合研究 河道水体与河岸带是一个有机的整体,两者之间的空间组合对河道生态系统自净化能力的影响将十分重要,通过模型参数的率定,科学评价河岸带和不同河道系统对污染物的截留、迁移转化方面的作用,对于客观全面认识河道生态系统的功能和作用具有重要意义。

(4)加强陆地生态系统空间异质性与水体自净化能力相互关系的研究 通过研究陆地生态系统不同的空间组合与河道生态系统自净化能力之间的响应关系,分析人类干扰下的陆生态系统对河道生态系统自净化能力的影响,为区域生态系统管理提供科学指导。

References:

- [1] Luan J G, Cheng W X. The service and typical characteristics of river ecosystem. *Yellow River*, 2004, 35(9): 11—41.
- [2] Xia J H, Yan Z M. Concept and function of ecological riparian zone. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2006, 5(37): 41—81.
- [3] Zhang J C. Riparian Functions and Its Management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(6): 440—641.
- [4] Ouyang Z Y, Zhao T Q, Wang X K, *et al.* Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2091—2099.
- [5] Cai Q H, Tang T, Deng H B. Discussion on freshwater ecosystem service and its evaluation index system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 135—138.
- [6] Wang H, Han S, Deng H B. A Preliminary assessment on the Xiangxi River ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2971—2978.
- [7] Haslam S M. River pollution: an ecological perspective. London: Belhaven Press, 1990.
- [8] Dong Z R. Protecting and Rehabilitating River Form Diversity. *China Water Resources*, 2003, 11(9): 53—56.
- [9] Tan K, Chen Q W, Mao J Q, *et al.* The self-purification capacity of the outlet of Daqing he: experiment. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4736—4742.
- [10] Fu G W. River water quality model and its simulation. Beijing: China Environmental Science Press, 1987. 59—84.
- [11] Lou W S, Li L H, He T. Advance and prospect in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 11(10): 64—72.
- [12] He B M, We M X. A study on self-purification ability of Beihai Bay. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(1): 16—18.
- [13] He B M, We M X. The environmental feature and analysis on character of water body self-purification in Fangcheng Bay. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(1): 64—67.
- [14] He B M, We M X. A preliminary study of the relationship between the self-purifying ability and the environment factors of Tie Shangang Bay. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006, 3(3): 21—26.
- [15] He B M, We M X. The characteristics of the Bionomical Environment in Qinzhou Bay and the relationship between the characteristics and the self-purifying conditions of the water body. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(4): 50—53.
- [16] Suzuki M. Role of adsorption in water environment processes. *Water Science and Technology*, 1997, 35(7): 1—11.
- [17] James I D. Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review. *Environmental Modelling and Software*, 2002, 17(4): 363—385.
- [18] Jiang J G, Shen Y F. Estimation of the natural purification rate of a eutrophic lake after pollutant removal. *Ecological Engineering*, 2006, 28(2): 166—173.
- [19] Kuhata K, Hiwatari T, Hagiwara T. Natural water-purification system observed in a shallow coastal lagoon: Matsukawa-ura, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47(1): 148—157.
- [20] Vagnetti R, Miana P, *et al.* Self-purification ability of a resurgence stream. *Chemosphere*, 2003, 52(10): 1781—1795.
- [21] Mustafa M A, Zhang Y, Jin S. Application of relaxation scheme to wave-propagation simulation in open-channel networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(11): 1125—1133.
- [22] Linnik P M, Zubenko I B. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2000, 5(1): 11—21.
- [23] Jian Y, McCorquodale J A. Depth-averaged hydrodynamic model in curvilinear collocated grid. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(5): 380—388.
- [24] Kideys A E. Fall and rise of the Black Sea ecosystem. *Science*, 2002, 297(5586): 1482—1484.
- [25] Wang L J, Sun S Q, Tian F. Discussion on simulation of river water quality. *Journal of Hefei University of Technology*, 2005, 25(3): 260—256.

- [26] Demuren A O, Rodi W. Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 172(11):63—92.
- [27] Demuren A O, Rodi W. Calculation of turbulence-driven secondary motion in non-circular ducts. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 140(12):189—222.
- [28] Sladkovich M, Militeev A N, Rubin H. Simulation of transport phenomena in shallow aquatic environment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2):123—136.
- [29] Chau K W, Jin H. Two-layered 2D unsteady eutrophication model in boundary-fitted coordinate system. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45(1—12):300—310.
- [30] Chau K W. An unsteady three-dimensional eutrophication model in Tolo Harbour, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 51(8-12):1078—1084.
- [31] Zhu T T, Jia Y F. Water quality modeling of Deep Hollow Lake using CCHE2D. *World Water & Environmental Resources*, 2004, 4(7):306—315.
- [32] Nils R B, Olsen, R D, *et al.* 3D numerical modeling of microcy system distribution in water reservoir. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, 126(10):948—953.
- [33] Brett M T, Arhonditsis G B. Eutrophication model for Lake Washington(USA) part II model calibration and system dynamics analysis. *Ecological Modelling*, 2005, 187(2-3):179—200.
- [34] Chao X B, Jia Y F, Shields. Development and application of a phosphorus model for a shallow Oxbow lake. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(11):1498—1507.
- [35] Li J X, Liao W G, Huang Z L. Numerical simulation of water quality for the Three Gorges Project Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 12(2):7—10.
- [36] Pen H, Guo S, G L. Numerical modelling of the hydrodynamical and water quality in the low reaches of the Han Jiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(4):363—369.
- [37] Chu J D. Solution and application of convection transport problem for river network. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, 10(1):30—34.
- [38] Han L X, Jin Z Q. Roughness alibration and formular of area pollution Sources basing on Three steps method in River Network. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 7(6):30—34.
- [39] Wu T F, Zhou E, Cui G B, Wang H B. The effect study of river network generalization density to river network water quantity and quality model. *Yellow River*, 2006, 28(3):46—48.
- [40] Chen K L, Li P H, Mi X B. The numerical simulation on impact of thermal discharge on eutrophication in lakes and reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 1(1):22—26.
- [41] Jiao Y L, Yang T X, Wang X J. Water Level Forecast in West Suburban of Anshan City. *World Geology*, 2003, 22(1):73—76.
- [42] Rao Q, Rui X F, Xu Y H, *et al.* Research of two-dimension eutrophication ecological dynamic model. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6):710—713.
- [43] Xu Z X, Yin H L. Development of two-dimensional water quality model for Huangpu River's mainstream. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(3):261—265.
- [44] Gong C S, Yao Q, Zhao L H, *et al.* Plane 2D flow-water quality-sediment pollution couple model in shallow lake. *Advanced in Water Science*, 2006, 17(4):196—501.
- [45] Wang Y, Peng H, Zhang W S, *et al.* Numerical Simulation to shallow water body ecological restoration. *Yangtze River*, 2007, 38(1):98—100.
- [46] Sheng Y M, Zheng Y H, Wu X G. A Three-dimensional Hydrodynamic Model of pollutants migration and transformation in coastal waters. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(6):694—699.
- [47] Li Z Q. 3-D pre-warning system of water-quality for reservoir Zhi Pingpu. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2006, 21(2):69—74.
- [48] Mao J Q, Chen Y C. Three-dimensional eutrophication model and application to Taihu Lake, China. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 126(10):278—284.
- [49] Deng Y X, Fu G, Yu T. Discussion on the Scientificaless of Water Quality Models. *Environmental Science and Management*, 2008, 2(33):29—31.
- [50] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. *Ecology*, 1984, 65(5):1466—1475.
- [51] Clausen J C, Guillard K, Sigmund C M, *et al.* Water quality changes from riparian buffer restoration in Connecticut. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(6):1751—1761.

- [52] Lee P, Smyth C, Boutin S. Quantitative review of riparian buffer width guidelines from Canada and the United States. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(2):165—180.
- [53] Lowrance R, Sharpe J K, Sheridan J M. Long-term sediment deposition in the riparian zone of a coastal plain watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1986, 41(4):266—271.
- [54] Brusch W, Nilsson B. Nitrate transformation and water movement in a wetland area. *Hydrobiological*, 1996, 251(1-3):103—111.
- [55] Daniel R B, Gilliam J W. Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters. *Soil Science Society of America*, 1996, 60(1):246—251.
- [56] Glandon R F, McNabb, P C, Batterson T. A comparison of rain related phosphorous and nitrogen loading from urban, wetland and agricultural sources. *Water Resource*, 1981, 17(6):881—892.
- [57] Muscutt A D, Harris G, *et al.* Buffer zones to improve water-quality: a review of their potential use in UK Agriculture. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1993, 45(1-2):59—77.
- [58] Wan Q C, Yu H L, *et al.* Retaining and transformation of coming soil N from highland to adjacent terrestrial water body in riparian buffer zone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11):2611—2617.
- [59] Mander U, Kusemets, V, Lohmus K, *et al.* Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments. *Ecological Engineering*, 1995, 8(4):299—324.
- [60] Kunley T A, Newhouse N J. Relationship of riparian reserve zone width to hind density and diversity in southeastern. *British Columbia. Northwest Science*, 1997, 71(2):75—86.
- [61] Gregory S V. Riparian management in the 21st century in: Kohm K A, Franklin J F eds. *Creating a Forestry for the 21st Century: The Science of Ecosystem Management* Washington D C: Island Press, 1997.
- [62] Swanson E J, Gregos V, Sedell J R, *et al.* Land-water interactions: their riparian zone in Edmonds R Led. *Analysis of Coniferous Forest Ecosystems in the Western United States*. US/IBP Synthesis Series No. 14. Hutchinson Ross Publishing. Stroudsburg Pennsylvania, USA, 1982.
- [63] Xiang W N. Application of a GIS-based stream buffer generation model to environmental policy evaluation. *Environmental Management*, 1993, 17(6):817—827.
- [64] Haycock N E, Pinay G. Nitrate dynamics in grass and poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(2):273—278.
- [65] Osborne L L, Kovacic D A. Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management. *Freshwater Biology*, 1993, 29(2):243—258.
- [66] Lowrance R, Altier L S, Williants R G, *et al.* REMM: the Riparian Ecosystem Management Model. *Journal Soil Water Conservation*, 2000, 55(1):27—34.
- [67] Deng H B, Wang Q L. On riparian forest buffers and riparian management. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6):951—954.
- [68] Zha X Z, Cheng Z L, Deng H G, *et al.* Inorganic nitrogen fluxes at the sediment-water interface in Tidal Flats of the Yangtze Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 25(9):31—34.
- [69] Cui D H, Han Z X, *et al.* Water-physical properties of soils under different vegetation types in riparian areas in Maoershan experimental forest farm of Shangzhi city, Heilongjiang Province. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(10):42—44.
- [70] Li R H, Guan Y T, He M, *et al.* Pilot-Scale Study on Riparian *Phragmites communis*, *Zizania latifolia* and *Typha angustifolia* L. Zones Treating Polluted River Water. *Environmental Science*, 2006, 27(3):493—493.
- [71] Li R H, Guan Y T, He M, *et al.* Pilot-scale study on riparian scirpus yagara ohw zone improving water quality of river. *Environmental Science*, 2007, 28(6):8911—3021.
- [72] Li R H, Guan Y T, He M, *et al.* Field study on improvement of river water quality by riparian mixed plant zone. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(6):06—46.
- [73] Wang C, Wang P F, *et al.* Ammonia sorption and retention characteris in the riparian reed zone. *Advances in Water Science*, 2003, 14(3):113—713.
- [74] Zhang J C, Peng B Z. A study on riparian area and its ecological rehabilitation. *Geographical Research*, 2002, 2(3):373—383.
- [75] Yang H J, Zhang H Y, *et al.* An engineering method for restoration of the damaged riparian ecosystem using *Phragmites australis*. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2):214—216.
- [76] Yan C Z, Jin X C, *et al.* Ecological restoration and reconstruction of degraded lakeside zone ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2):360—364.
- [77] Huang C, Xie H Y, Long L B. A research on the lake-bank fluctuating belts eco-system reconstruction model in the Three Gorges Zone. *Journal of Chongqing College of Education*, 2003, 16(3):63—66.

- [78] Zhang J C, Peng B Z. Study on riparian zone and the restoration and re building of its degraded ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 56—63.
- [79] Yue J, Wang Y L. Progresses and Perspectives in the Study of Riparian Zone. *Progress in Geography*, 2005, 24(5): 33—40.
- [80] Zhang F F, Li T S, Lu J B. Purification, Ecological and Restoration Functions of Riparian Zone. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 24(S2): 459—464.

参考文献:

- [1] 栾建国, 陈文祥. 河流生态系统的典型特征和服务功能. *人民长江*, 2004, 35(9): 11~41.
- [2] 夏继红, 严忠民. 生态河岸带及其功能. *水利水电技术*, 2006, 5(37): 41~81.
- [3] 张建春. 河岸带功能及其管理. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 440~641.
- [4] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(10): 2091~2099.
- [5] 蔡庆华, 唐涛, 邓红兵. 淡水生态系统服务及其评价指标体系的探讨. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 135~138.
- [6] 王欢, 韩霜, 邓红兵, 等. 香溪河河流生态系统服务功能评价. *生态学报*, 2006, 26(9): 2971~2978.
- [8] 董哲人. 保护和恢复河流形态多样性. *中国水利*, 2003, 11(9): 53~56.
- [9] 谭夔, 陈求稳, 等. 大清河河口水体自净能力实验. *生态学报*, 2007, 27(11): 4736~4742.
- [10] 付国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 59~84.
- [11] 维文生, 李莉红, 贺涛. 水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望. *水利学报*, 2003, 11(10): 64~72.
- [12] 何本茂, 韦蔓新. 北海湾水体自净能力的探讨. *海洋环境科学*, 2004, 23(1): 16~18.
- [13] 何本茂, 韦蔓新. 防城湾的环境特征及其水体自净特点分析. *海洋环境科学*, 2006, 25(1): 64~67.
- [14] 何本茂, 韦蔓新. 铁山港湾水体自净能力及其环境因子的关系初探. *海洋通报*, 2006, 3(3): 21~26.
- [15] 何本茂, 韦蔓新. 钦州湾的生态环境特征及其水体自净条件的关系分析. *海洋通报*, 2004, 23(4): 50~53.
- [25] 王玲杰, 孙世群, 田丰. 河流水质模拟问题的探讨. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(3): 260~265.
- [35] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡水库整体一维水质数学模拟研究. *水利学报*, 2002, 12(2): 7~10.
- [36] 彭虹, 郭生练. 汉江下游河段水质生态模型及数值模拟. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(4): 363~369.
- [37] 褚君达. 河网对流输移问题的求解及应用. *水利学报*, 1994, 10(1): 30~34.
- [38] 韩龙喜, 金忠青. 三角联解法水力水质模型的糙率反演及面污染源计算. *水利学报*, 1998, 7(6): 30~34.
- [39] 吴挺峰, 周愕, 崔广柏等. 河网概化密度对河网水量水质模型的影响研究. *人民黄河*, 2006, 28(3): 46~48.
- [40] 陈凯麟, 李平衡, 密小斌. 温排水对湖泊水库富营养化影响的数值模拟. *水利学报*, 1999, 1(1): 22~26.
- [41] 焦玉玲, 杨天行, 王孝军. 鞍山市西郊区水位预测. *世界地质*, 2003, 22(1): 73~76.
- [42] 饶群, 芮孝芳, 徐炎华等. 水体叶绿素二维生态动力学模型研究. *水科学进展*, 2003, 14(6): 710~713.
- [43] 徐祖信, 尹海龙. 黄浦江二维水质数学模型研究. *同济大学学报*, 2003, 18(3): 261~265.
- [44] 龚春生, 姚琪, 赵捷华等. 浅水湖泊平面二维水流水质底泥污染模型研究. *水科学进展*, 2006, 17(4): 496~501.
- [45] 王艳, 彭虹, 张万顺, 等. 浅水水体生态修复的数值模拟. *人民长江*, 2007, 38(1): 98~100.
- [46] 沈永明, 郑永红, 吴修广. 近岸海域污染物迁移转化的三维水质动力学模型. *自然科学进展*, 2004, 14(6): 694~699.
- [47] 李志勤. 紫坪铺水库三维水质预警系统. *西南科技大学学报*, 2006, 21(2): 69~74.
- [49] 邓仪祥, 富国, 于涛. 水质模型科学性内涵的探讨. *环境科学与管理*, 2008, 33(2): 29~31.
- [67] 邓红兵, 王青春, 王庆礼. 河岸植被缓冲带与河岸带管理. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 951~954.
- [68] 张兴正, 陈振楼, 邓焕广, 等. 长江口北支潮滩沉积物-水界面无机氮的交换通量及季节变化. *重庆环境科学*, 2003, 25(9): 31~34.
- [69] 崔东海, 韩壮行, 姚琴, 等. 帽儿山林草不同河岸带植被类型土壤水分-物理性质. *东北林业大学学报*, 2007, 35(10): 33~37.
- [70] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究. *环境科学*, 2006, 27(3): 493~493.
- [71] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸荆三棱改善河水水质的中试研究. *环境科学*, 2007, 28(6): 8911~3021.
- [72] 李睿化, 管云涛, 何苗, 等. 河岸混合植物带改善河水水质的现场研究. *环境工程学报*, 2007, 1(6): 06~46.
- [73] 王超, 王沛芳, 唐劲松, 等. 河道沿岸芦苇对氨氮的消减特性研究. *水科学进展*, 2003, 14(3): 113~113.
- [74] 张建春, 彭补拙. 河岸带及其生态重建研究. *地理研究*, 2002, 21(3): 373~383.
- [75] 杨海军, 张化永, 赵亚楠, 等. 用芦苇恢复受损河岸生态系统的工程化方法. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 214~216.
- [76] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱, 等. 湖滨带退化生态系统的恢复与重建. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 360~364.
- [77] 黄川, 谢红勇, 龙良碧. 三峡湖库消落带生态系统重建模式的研究. *重庆教育学院学报*, 2003, 16(3): 63~66.
- [78] 张建春, 彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建. *生态学报*, 2003, 23(1): 56~63.
- [79] 岳隽, 王仰麟. 国内外河岸带研究的进展与展望. *地理科学进展*, 2005, 24(5): 33~40.
- [80] 张凤凤, 李土生, 卢剑波. 河岸带净化水质及其生态功能与恢复研究进展. *农业环境科学报*, 2007, 24(S2): 459~464.