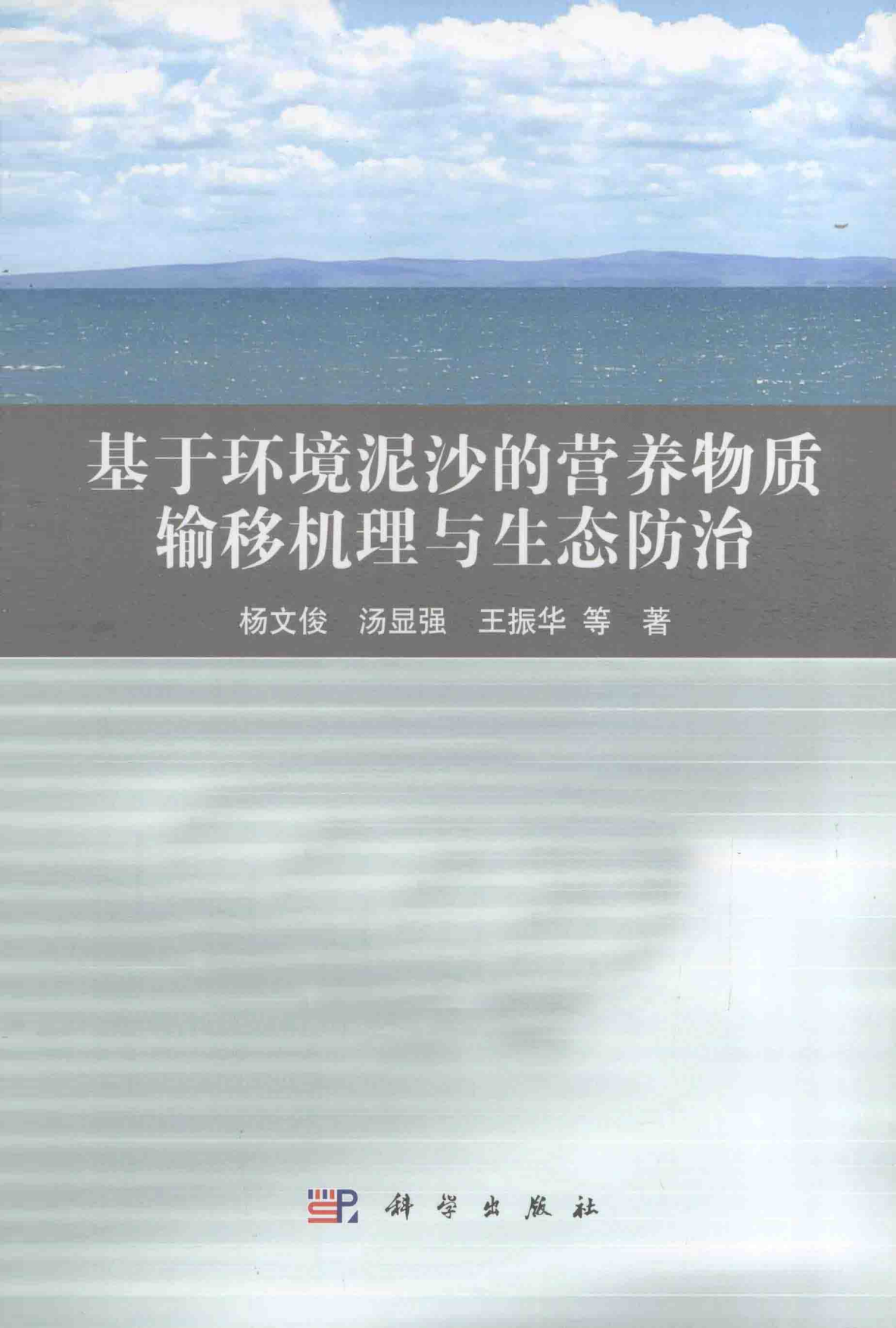




基于环境泥沙的营养物质 输移机理与生态防治

杨文俊 汤显强 王振华 等 著



科学出版社

基于环境泥沙的营养物质 输移机理与生态防治

杨文俊 汤显强 王振华 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

水生态文明是生态文明建设的基础,维护水生态系统健康是我国水生态文明建设的重要目标之一。随着对点源污染的逐步有效控制,面源已成为我国水体营养物质的主要来源。环境泥沙是面源营养物质输移的主要载体,在营养物质迁移转化过程中起着重要作用,开展基于环境泥沙的营养物质输移机理与生态防治研究意义重大。

本书针对水沙环境条件下农业源头区、库湾养殖水体及富营养化水体的营养物质输移特点与生态防治需求,以营养物质迁移转化为主线,采用理论分析、原型观测、室内(外)试验及数值模拟等技术手段,试点研究与工程示范相结合,系统研究了营养物质的迁移转化过程及机理,在此基础上分别提出了陆域污染水营养物质的人工湿地强化去除技术、库湾养殖水体生态控藻技术和库湾水华生态调度防控措施。该成果已得到应用并取得较大的社会经济效益。

本书可供水利、环境、农业、水土保持、林业及市政等有关专业的工程技术人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于环境泥沙的营养物质输移机理与生态防治/杨文俊等著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-043721-1

I. ①基… II. ①杨… III. ①富营养化-污染防治-研究 IV. ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 049855 号

责任编辑:刘宝莉 张海娜 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:380 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近 30 年来,营养物质过量排放导致我国水体富营养化问题日益突出。水体富营养化及其诱发藻类水华是我国水生态文明建设面临的重大挑战之一。维护水生态系统健康,控制水体富营养化,已成为我国民生水利和生态水利建设的重点和难点。随着对点源污染的逐步有效控制,面源已成为我国水体营养物质的主要来源。环境泥沙是面源营养物质输移的主要载体,在营养物质迁移转化过程中起着重要作用。为了有效管理面源营养物质和控制水体富营养化,有必要结合营养物质来源特点,开展基于环境泥沙的营养物质输移过程与规律研究,并在此基础上提出营养物质生态防治技术。

本书主要基于国家科技支撑计划项目(2008BAD98B05)专题、国家自然科学基金项目(51279012、51209009、51209011、51379017、51309021)、水利部公益性行业科研专项项目(200801135、200901008)专题、中央公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2012038/CJ、CKSF2013014/SH)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07-02)及地方科技服务等项目的开展,针对水沙环境条件下农业源头区、库湾养殖水体及富营养化水体的营养物质输移特点与生态防治需求,以营养物质迁移转化为主线,通过多学科交叉,采用理论分析、原型观测、室内(外)实验以及数值模拟等技术手段,试点研究与工程示范相结合,系统研究了农业源头区、库湾养殖水体及富营养化水体的营养物质迁移、转化、沉积、赋存特征及机理,研发了陆域污染水体营养物质的人工湿地强化去除技术,提出了库湾养殖水域生态控藻技术以及库湾水华生态调度防控措施,为湖库水体富营养化控制及水生态环境改善提供了技术支撑。

本书主要成果内容包括四部分:①通过野外站点观测和室内模拟实验,查明了农业源头区沟渠泥沙对磷的吸附-解吸特征,探明了沟渠泥沙干湿交替过程中磷形态转化规律,确定了泥沙磷的易释放形态及其释放阈值,为量化评价农业源头区不同来源(土地利用方式)泥沙磷的释放潜力提供了科学依据;②通过室内模型实验和室外盆栽实验,确定了陆域污染水体营养物质高效去除的人工垂直潜流湿地填料和植物选择标准与依据,提出了新型间歇曝气人工垂直潜流湿地和生物填料人工垂直潜流湿地,显著改善了植物地上组织氮磷富集能力,提高了生物脱氮除磷效率,为陆域污染水体营养物质的生态强化去除提供了技术途径;③基于室内模拟实验和库湾养殖区围隔实验,揭示了饵料及沉积物中营养物质释放规律,以及水体中浮游植物数量和群落结构变化规律,提出了基于营养盐削减和藻类控制的生态养

殖模式,即采用放养一定比例的花鲢和鲤鱼以达到削减水体营养盐和控藻双重目标;④建立了可精确表述水体富营养化时空演变过程的非结构网格三维生态动力学模型,量化了库湾自然河流水动力条件和悬移质泥沙对藻类水华的影响,提出了增大下泄流量和增大水体含沙量的生态调度抑藻方案,为水华防治提供了新思路。

本书为三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心“三峡库区磷污染生态防治”创新团队取得的研究成果,共6章。第1章为绪论,介绍了水沙环境条件下营养物质输移及生态防治研究需求、国内内外研究现状以及本书主要内容和成果结构,由杨文俊撰写。第2章为农业源头区泥沙营养物质转化规律及释放风险评价,由王振华撰写。第3章为陆域污染水体营养物质的人工湿地强化去除,由汤显强撰写。第4章为库湾养殖水体营养物质输移规律及生态调控,由吴敏撰写。第5章为库湾藻类水华水动力学特征及生态调度,由李健撰写。第6章为主要成果及创新点,概况总结了本书成果,并与国内同类研究进行了比较,由杨文俊撰写。全书由杨文俊、汤显强和王振华统稿。有关章节的技术内容得到了南开大学环境科学与工程学院黄岁樑教授、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所朱波研究员以及清华大学水利系王兴奎教授的悉心指导,在此表示衷心感谢。

由于研究涉及水利、环境、农业、生态、水土保持等多学科,对一些领域的研究认识水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2015年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 主要内容及成果结构	15
第 2 章 农业源头区泥沙营养物质转化规律及释放风险评价	19
2.1 研究背景	19
2.2 泥沙对营养物质的吸附-解吸特征	29
2.3 泥沙对营养物质吸附-解吸的主要影响因素	44
2.4 泥沙营养物质的形态分配特征及其转化规律	59
2.5 不同土地利用方式下泥沙营养物质释放风险评价	67
2.6 小结	76
第 3 章 陆域污染水体营养物质的人工湿地强化去除	78
3.1 研究背景	78
3.2 人工湿地填料选择及综合评价	91
3.3 人工湿地填料除磷效果及影响因素分析	98
3.4 人工湿地植物营养物质去除性能及综合评价	104
3.5 间歇曝气人工湿地的营养物质去除性能	115
3.6 生物填料人工湿地营养物质去除性能	124
3.7 小结	131
第 4 章 库湾养殖水体营养物质输移规律及生态调控	133
4.1 研究背景	133
4.2 沉积物营养物质释放行为及影响因素	139
4.3 鱼饵及投饵养鱼的营养物质释放规律	145
4.4 鱼饵对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长的影响	150
4.5 不同养殖模式下藻类群落及组成动力学变化	157
4.6 不同养殖模式下营养物质动态分析	163
4.7 小结	172

第 5 章 库湾藻类水华水动力学特征及生态调度	174
5.1 研究背景	174
5.2 库湾藻类水华爆发的水动力阈值研究	185
5.3 库湾藻类水华影响因子分析及数学描述	202
5.4 库湾藻类水华过程中藻类细胞粒子的输移及生长模拟	211
5.5 库湾藻类水华限制性营养物质判别	224
5.6 库湾水华防治的生态调度技术	247
5.7 小结	260
第 6 章 主要成果及创新点	263
6.1 主要成果	263
6.2 国内外同类研究的比较	269
6.3 主要创新点	271
参考文献	272

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

2011 年中央一号文件指出“水是生命之源、生产之要和生态之基”。党的十八大进一步明确了科学发展观的指导地位,强调要统筹人与自然的和谐发展,并把生态文明摆在更加突出的位置,作为“五位一体”总体布局的重要组成部分。水生态文明是生态文明的基础,开展水生态文明建设既是现实的紧迫要求,也是长远的战略任务。党中央、国务院历来高度重视解决水生态环境问题,先后采取一系列重大举措,推动水生态文明建设并取得明显成效。但我国正处于工业化、城镇化加速发展阶段,在经济社会快速发展的同时,水资源短缺、水环境污染、水生态环境恶化等问题日益凸显。这种状况如不尽快扭转,水资源难以承载,水环境难以承受,人与自然难以和谐,大力推进生态文明建设也就成了一句空话。

过量营养物质进入湖库等缓流水体将引起藻类及其他浮游植物快速繁殖,造成水体溶解氧下降,水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡的水体富营养化现象。我国湖库水体富营养化的程度和范围呈快速发展趋势,形势十分严峻。湖泊富营养化比例在 20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代分别为 41%、61%和 77%(马经安等, 2002)。2007~2010 年的湖泊水质调查结果显示,我国 85.4%的大型浅水湖泊超过了富营养化标准,其中 40.1%为重度富营养化(杨桂山等,2010)。湖库水体富营养化恶化水质,诱发“水质性”缺水危机,降低水资源综合利用效率和安全供水保障能力,极大地削弱了水资源对国民经济发展的战略支撑作用;湖库水体富营养化过程中的藻类水华还造成水生态系统结构失衡和功能失调,降低水生生物多样性,严重破坏水生态系统健康。由此可见,湖库水体富营养化是水生态文明建设面临的最大挑战之一,已发展成为我国民生水利和生态水利建设的重点和难点,关乎每个国民的生存基础和生活幸福。

水和泥沙(沉积物)是营养物质如氮磷等输移的核心要素和关键载体。水沙径流作用调控着营养物质从陆域迁移、输送、沉积和进入水体的系列过程。目前,湖库水体营养物质的输移研究侧重探讨水—沉积物—营养物质间的迁移转化以及评价因水土流失和地表径流导致的陆域营养物质负荷测算及输出规律等。这种单一的陆域或水域范围内的研究很难反映湖库水体营养物质空间传输的过程连续性和影响关联性。以水沙径流为纽带,系统研究农业源头区、城郊区域及库(湖)湾水体营养物质的迁移转化,有助于将已有分散的营养物质传输过程机理形成整体认识,

填补营养物质从陆域输移进入湖库水域的机理研究缺失,为营养物质管理和水体富营养化综合防控提供理论依据。

水沙径流作用下,营养物质输移呈现出多源特征。除大气沉降外,随着人口数量增加,土地集约化利用和开发程度加剧,难以有效管理的农业源头区泥沙营养物质释放、城郊地区水沙径流形成的面源营养物质排放、库湾养殖水体产生的营养物质输出以及库湾富营养化水体水沙动力作用下营养物质演替过程等逐渐构成了湖库水系富营养化的新型污染源。

目前,农业源头区营养物质研究着重测算农药和化肥流失、畜禽养殖废物及农村生活污水排放,对营养物质赋存和输出的关键载体泥沙缺乏足够关注,忽略了富含营养物质的农业源头区泥沙“源”释放风险及科学防控对策研究。

与农业源头区泥沙类似,城郊水沙径流而产生的面源污染是普遍存在却缺乏足够研究的另一新型营养物质释放源。复杂的土地利用格局导致城郊区域内农业面源和城市面源交错分布,既无法简单界定区域面源特征,也不易划分农业面源和城市面源的边界。研究大量存在的城郊区域水沙径流营养物质负荷输移的时空分布,对湖库水体营养物质输入管理具有重要现实指导意义。

另外,受水产品生产和经济效益刺激,库(湖)湾精细化投饵养殖过程中,残余饵料及养殖废物排放向水体输出大量营养物质,但现有室内机理实验难以揭示天然水体中投饵养殖的营养物质输出及藻类生长影响特征,开展围隔实验将有效填补野外实验研究的空白,揭示库湾养殖水体中饵料溶失规律,以及藻类生长行为与营养物质输出的响应关系。

湖泊富营养化的研究较多,调查显示水库库湾也受富营养化威胁,某些具有浮力和运动能力的藻类及浮游植物,利用自身的优势,过度生长繁殖,形成水华;库湾水华过程中,水动力学因子对水藻的生长起到一定的抑制作用,维持藻类正常生长繁殖的营养元素碳、氮、磷、硫等来自上游及两岸径流水体污染物,影响因子众多且复杂;库湾水体水流状态介于湖泊和河道之间,在很多方面与湖泊有显著差异,其中水库的地形较复杂,水流滞留时间比湖泊要短,水体含沙量相对较高,水库的水位波动较大,这些因素对河流及水库的富营养化研究影响很大,有必要通过原型观测资料分析及数值模拟手段探讨库湾水华爆发的水动力学临界值,以及发展过程中限制性营养物质的动态变化情况。

为缓解湖库水体富营养化危害,有必要在深入认识营养物质的多源输移规律的基础上进行综合防治。农业源头区和城郊区域营养物随水沙径流输出,污染程度低、排污无规律、难以应用成熟的污水处理技术予以收集和集中处理。近年来,以阳光、土壤和微生物组成的生态处理技术在营养物质去除方面极具竞争力,但也存在占地面积大,营养物质去除率不理想等缺点。研究结合农业源头区和城郊区域营养物质输出特征对传统生态处理技术进行改良,研发出的农业源头区污水生

态净化技术和人工湿地强化减污技术,能够从源头上将多源营养物质排放统筹管理,获得具有推广价值的湖库水体营养物质生态去除技术体系。

对于库湾养殖水体及富营养化水体,在研究其营养物质运移机理的基础上,通过复杂的环境生态影响因素制约机制研究,基于生态养殖及生态调度,提出系统自相关生态调控技术方案。生态措施是根治大型天然水产养殖水体富营养化的最有效途径,通过系统研究饵料溶失规律和围隔内养殖水体藻类群落组成演替特征,以营养物质释放和藻类总量控制为目的提出的生态养殖技术将成为富营养化水体修复与管理的重要科技支撑。然而,湖库水体富营养化的上述长效防治技术见效慢,针对库湾富营养化水体,在二维和三维水动力场模拟基础上,耦合拉格朗日粒子轨迹跟踪模型和非守恒三维粒子轨迹跟踪模型,在泥沙环境下,针对藻类生长特征,模拟藻类的生态增殖和粒子运动特征,充分运用泥沙的营养物质吸附特性,形成适宜的藻类水华应急调控技术,提出水动力学生态调控方案。

综上所述,以营养物质为主线,以环境泥沙和水动力为环境动力条件,系统研究营养物质在水沙径流作用下的多源(农业源头区、城郊区域、库湾养殖水体和库湾富营养化水体)营养物质迁移转化过程;在此基础上,以营养物质过剩导致的藻类水华防控为目标,分别研究提出基于营养物质多源输入特征考虑的农业源头区污水生态净化技术、人工湿地强化去除技术和库湾生态养殖及生态调控技术。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 陆域典型区营养物质输移及生态防治

1. 农业源头区泥沙营养物质赋存及释放

农业源头区非点源氮、磷等营养物质流失是导致湖库水体富营养化加剧的主要因素之一。农业生产中过量施用的化肥、未经处理直接排放的村镇生活和生产废水等污染源含有大量的氮、磷等营养物质,它随降雨径流或土壤侵蚀由陆地坡面进入沟渠,并最终汇入河流、湖泊、水库等水体。农业源头区的沟道、坑塘以及村落排水沟等形成的沟渠系统,构成了农业非点源氮、磷等营养物质迁移的重要廊道。随着水环境问题的日益突出,农业源头区沟渠系统在水环境保护方面的作用开始引起关注。近年来,许多研究者逐渐认识到利用沟渠系统截留高负荷氮、磷等营养物质(Palmer-Felgate et al., 2009; Zhu et al., 2012)。农业源头区沟渠系统作为农业非点源污染源与受纳水体之间的缓冲过渡带,表现出明显的湿地功效。沟渠截留营养物质的重要机理之一,就是沟渠泥沙能够吸附径流水体中大量的营养物质,降低营养物质的浓度,从而减少进入湖库水体的营养物质含量,保护下游受纳水体。然而,沟渠的这种湿地功效并不完全体现为吸附水体中的营养物质(Palmer-Felgate et al., 2009; Luo et al., 2009)。例如,当沟渠泥沙中营养物质的平衡浓度

大于水体营养物质浓度时,泥沙则成为水体营养物质的源。因此,农业源头区沟渠泥沙既可能是水体中营养物质的汇,也可能是源(Jarvie et al., 2005; Zhu et al., 2012)。

国内外已有研究表明,泥沙理化性质对磷的吸持-释放特性有显著影响(Wang et al., 2012; Jalali et al., 2013)。不同类型的泥沙因其理化组分差异而各具特殊性,石灰性土壤对磷的吸附主要取决于 Fe、Al 氧化物,而与 CaCO_3 含量无关(Harrel et al., 2006);在 Fe、Al 氧化物含量高的土壤中,磷解吸模式为幂函数曲线,而在 Fe、Al 氧化物含量低的土壤中,磷解吸模式为一直线(Li et al., 2007)。此外,各种形态磷在泥沙中并不是固定不变的。当泥沙自身理化性质或环境条件发生变化时,磷就会发生一系列吸附、解吸及重新结合等反应过程,从而实现不同形态磷之间的转化(Zhu et al., 2012)。目前国外已有学者利用泥沙对磷的吸附饱和度(degree of phosphorus saturation, DPS)与水体中磷的关系,获取泥沙吸持磷的阈值或临界值(critical value)来评价磷的释放风险(Nair et al., 2004; Little et al., 2007),并建议采用清淤等方法减少泥沙累积的磷(Nguyen et al., 2002)或向泥沙中添加铁或铝的化合物(如硫酸铁盐和硫酸铝盐)提高泥沙对磷的吸附容量(Smith et al., 2005)等方法对沟渠或河流进行管理,但国内这方面的研究报道还极少。

深入了解农业源头区沟渠泥沙对营养物质的吸持-释放作用和正确认识不同沟渠(即不同土地利用方式下的沟渠)泥沙对营养物质的源、汇关系,有助于人们对农业源头区非点源氮、磷等营养物质流失的控制和管理(Zhu et al., 2012; Jalali et al., 2013)。但是,目前农业源头区沟渠泥沙对营养物质的吸附-解吸规律方面的研究不多,尤其缺乏对泥沙吸附-释放过程中或干湿交替条件下营养物质形态转化规律及不同土地利用方式下泥沙营养物质释放风险评价的研究。由于研究结果与所在地区的土地利用方式、土壤类型密切相关,不同地区间研究结果差异较大。因此,针对我国湖库水体富营养化控制需求,结合当地土地利用方式和土壤类型,开展农业源头区泥沙对营养物质的吸持-释放特征研究,探明泥沙中营养物质在吸持-释放、干湿交替等过程中的转化规律,确定泥沙中营养物质的释放阈值,明确不同土地利用方式下泥沙对营养物质的源、汇关系,对科学评价农业源头区泥沙营养物质释放风险和优化管理沟渠泥沙十分必要。

2. 农业源头区营养物质的生态拦截和去除

农业源头区污水已成为严重影响水体环境状况的重要污染源。目前,我国绝大部分的天然和人工水体都出现了富营养化情况,由于农业源头区污水处理不当所造成的危害还在日益加重。

与能纳入污水处理厂的城市生活点源污染和工业点源污染不同,农村面源污

染并非单一污染源所造成,它往往由多种易扩散的污染源所引起,在农村地区,降雨、积雪融化等形成的地表径流使污染物从污染源头传播,并最终汇入河流、湖泊、天然湿地、地下水等水体中,从而引起水体富营养化或其他形式的污染,对水资源造成很大的危害。

农村地区的主要污染源主要有:未能纳入市区污水干道的农户生活和畜禽养殖活动所产生的污水;农田残留氮磷肥和农药的渗透、淋溶;未收集、随意堆放的各种垃圾;大气中的污染物的尘降、机动车辆排出气体中的油类物质和颗粒等。农田排水中的营养物质一部分在排水渠内被滞留去除,一部分继续通过排水进一步迁移,这部分营养物质可通过城郊人工湿地强化去除(Dordio et al., 2013)。除农田排水外,农户污水随意排放是造成农村营养物质污染的主要原因。在农村地区,农户房舍分布较为分散,农户污水不易集中,农户污水往往不能被纳入污水处理厂等集中式的污水处理系统,另外,农村经济水平相对落后,居民环保意识相对较差,农户污水往往不经处理或只经简单处理直接(如传统的化粪池处理等)排放,给周边环境带来了很重的污染负荷(李无双等, 2008)。

在全球范围内,人们对农村污水处理的忽视,是造成地表水体富营养化的主要原因之一。农业活动中所产生的污水往往不经处理直接排入地表水体中,造成了严重的污染。其中,农户的养殖活动是污染产生的重要源头之一,未经处理的养殖污水中含有大量的污染物,且污染负荷很高。如果对农户污水处理不当,任其随意排放,不仅会影响农户周围的居住环境、孳生蚊蝇、便于细菌繁殖,散播传染病病源,影响当地村民的身体健康,甚至会污染地下水、影响居民饮水安全。因此在农业源头区泥沙营养物质转化规律及释放风险等机理研究的基础上,针对源头区泥沙营养物质释放风险较大的村镇污水开展生态防治具有重要意义。

随着农村地区的经济发展,人们在农村修建了高人口密度的居民区、度假村、乡村旅馆、农家乐、野营区等社区,这些都会加重农村地区的污染负荷,引起了污染物大范围的扩散和蔓延(Lens et al., 2001; 陈俊敏等, 2006)。基于此,分散式污水处理系统应运而生并被应用于工程实践,相对于集中式的污水处理系统而言,它强调利用低成本、低能耗、可持续的处理系统对污水进行就地处理(Watanabe et al., 1997; Lens et al., 2001)。

在世界各地,人们建成了各种各样的分散式污水处理系统。在中东地区,建立了一种间歇式运行的沙石渗滤系统,该系统被用来处理当地农村地区的污水,运行效果较好,对污染物的去除率可达到 90% 以上(Sabbah et al., 2003)。Ham 等(2007)研究了一种由人工湿地和稳定塘所串联而成的分散式污水处理系统,该系统被用于生活污水的处理,处理后的水用于农田回灌,他的研究结果证明这个系统是很适合于农村地区的分散式污水处理的系统。Taylor 等(2003)利用一种小型的多填料滤床来对生活污水进行就地处理,这种系统能大大降低污水中的 COD、

BOD 和氮浓度。另外,还有学者把土地渗滤系统和传统的化粪池联用,化粪池作为预处理系统,而土地渗滤系统则对化粪池的出水作进一步处理(Cheung et al., 2000; Heistad et al., 2006)。季俊杰等(2006)提出了一种分散式生活污水处理工艺:降流式厌氧紊动床(DASB)+波流潜流人工湿地(W-SFCW)联合工艺,他们通过实验研究证明:该联合工艺对生活污水具有较强的处理能力,COD、氨氮、TP 的平均去除率分别达到 80.7%、52.1%、89.7%,系统的出水水质优于传统的二级生物处理工艺。

3. 城郊区域面源营养物质输移特征

农业面源已成为美国、日本和欧洲等许多国家和地区水环境的第一污染源。相关调查结果表明,美国农业活动对面源污染负荷的贡献率达 57%~75%(汪达汉,1993);在日本,1975 年琵琶湖入湖总污染负荷中 22.1%的氮负荷来源于农业活动(吕耀,2000);瑞典的拉霍尔姆湾和谢夫灵厄流域水体中来自农业活动的氮输入量分别高达 60%和 80%(Vought et al., 1994);在荷兰,来自农业面源污染的 TN 和 TP 分别占总污染负荷的 60%和 40%~50%(Boers, 1996)。在中国,云南滇池流域农业面源氮负荷占流域总污染负荷的 53%(陶思明,1996);京津地区排入渤海的氮负荷使受纳海水浓度接近污水,其中 91.74%来源于化肥流失(张夫道,1985)。

随着城市化发展,非透水性下垫面比例日益增大,城市面源成为继农业面源污染之后的又一主要污染来源(Corwin et al., 1997)。1990 年,美国环保署(USEPA)公布了农业、工业和城市等不同污染源对河流污染的贡献率,其中城市径流占 9%;1993 年,USEPA 将城市径流列为第三大水体污染源(王和意等,2003)。随着城市化水平不断提高,城市面源对水体污染的贡献率将继续增加。研究表明,暴雨能普遍导致城市地表污染(伍发元等,2003),径流中 SS 和重金属等污染物浓度与未处理的城市污水基本相同。

中国正处于快速城市化进程中(杨柳等,2004),城市面源污染形势严峻,其面源污染对水环境的危害尤为突出(鲍全盛等,1997)。城市化发展往往导致土地利用方式在短期内发生剧烈改变,从而导致面源污染物在时间和空间维度上均呈现复杂的动态变化。这对面源污染研究提出了新的要求:一方面,要准确界定研究区域的面源污染特征;另一方面,要正确理解土地利用格局变化与面源污染之间的关系,实现面源污染模型与城市化模型的耦合,以便准确模拟快速城市化背景下面源污染负荷时空变化的动态过程。

在城市化过程中,存在大量由农村向城市过渡的地带,或正处在城市化进程中的区域,较为典型的是城乡交错带。城乡交错带是在城市与乡村地域之间形成的新型过渡性区域,是一个具有独特结构和功能的地域单元(陈佑启等,1998)。城乡

交错带既保留了原有农村土地利用格局,又包含城市要素的扩散,土地利用类型多样、结构复杂,成为环境、城市、地理与经济等多学科的研究热点(陈佑启,1996)。

复杂的土地利用格局导致城乡交错带内农业面源和城市面源交错分布。农村土地利用覆盖主要表现为透水地面,氮、磷等污染物主要来自于化肥农药的使用、畜禽养殖及土壤侵蚀等,受坡度、土壤类型等自然条件的影响较大;城市是人类居住和活动最密集的地方,主要为非透水性地面,污染来源包括生活、交通、工业和大气沉降等各方面,污染负荷产生量大(Snodgrass et al., 2008)。显然,两种面源在污染物来源、种类、浓度和迁移转化规律等方面均存在本质差异。在城乡交错带内既无法简单界定区域面源特征,也不易划分农业面源和城市面源的边界。目前,常用的解决方法是根据区域内的主要面源形式近似将区域面源简化成单一面源(农业或城市面源),或者基于行政边界和现有地物特征人为地划分农业面源和城市面源的边界(章北平, 1996)。传统处理方法往往导致面源污染负荷模拟结果存在较大误差。对于大量存在的、类似城乡交错带的区域,准确模拟区域内面源污染负荷的时空分布具有重要的现实意义。

城郊面源是湖库水体营养物质输入的另一重要源头。面源营养物质输入对大部分湖泊入湖总负荷的贡献率已高于 50%(Tang et al., 2012)。随着城市化发展,非透水性下垫面比例日益增大,城市面源成为继农业面源之后的又一主要营养物质来源(Allert, 2012)。我国正处于快速城市化进程中(Bao et al., 2013; Song et al., 2013),存在大量由农村向城市过渡的地带,或正处在城市化进程中的区域,较为典型的是城郊区域(城乡交错带)。城郊区域是在城市与乡村地域之间形成的新型过渡性区域,土地利用类型多样、结构复杂,目前成为环境、城市、地理与经济等多学科的研究热点(Zhang et al., 2013)。

复杂的土地利用格局导致城郊区域农业面源和城市面源交错分布。农村土地利用覆盖主要表现为透水地面,氮、磷等营养物质主要来自于化肥农药的使用、畜禽养殖及土壤侵蚀等,受坡度、土壤类型等自然条件的影响较大;城市是人类居住和活动最密集的地方,主要为非透水性地面,营养物质来源包括生活、交通、工业和大气沉降等各方面,负荷产生量大(Snodgrass et al., 2008)。显然,两种面源在营养物质来源、种类、浓度和迁移转化规律等方面均存在本质差异。在城郊区域内既无法简单界定区域面源特征,也不易划分农业面源和城市面源的边界。对于大量存在的、类似城乡交错带的城郊区域,准确模拟区域内面源营养物质负荷输移的时空分布具有重要现实意义。

国外面源营养物质负荷模型经历了从定性到定量,从经验模型、机理模型到功能模型,从集总式模型到分布式模型,从小尺度到大中尺度,从与 GIS 松散集成到紧密耦合的发展阶段,目前发展已经较为完善。面源营养物质输移模型与 3S 技术的紧密耦合成为研究主流,主要模型包括 SWAT(Moriasi et al., 2013)、GWLF

(Haith et al., 1992)、CNPS(Dikshit et al., 1

垂直潜流湿地通风条件较好,通过污水在床体内自重力流动带动大气

1.2.2 库湾典型污染水体营养物质输移及生态调控

1. 库湾养殖水体营养物质输移及生态调控

沉积物是水生生态系统的重要组成部分,既是营养物质的“汇”,又是“源”。当地表水体污染较重的时候,水体部分污染物通过沉淀或者颗粒物吸附而蓄积于沉积物中,成为水体营养物质重要蓄积库。随着养殖年限增加,沉积物中营养物质逐渐富集,极有可能成为营养物质的“源”。云南滇池中80%的氮和90%的磷都分布在沉积物中(陈永川等,2005)。在一定条件下,如微生物分解作用、扰动等,沉积物中污染物会再次释放出来,影响上覆水体。影响沉积物与上覆水体间氮、磷的“源”和“汇”转化的因素可归结为沉积物物理化学特征和外界环境条件如溶解氧、微生物、pH、温度、扰动等(Steinman et al., 2012)。

氮素在沉积物和上覆水之间迁移转化过程非常复杂,包括物理、化学和生物等作用。沉积物氮释放一方面取决于有机氮分解;另一方面与环境因子密切相关。溶解氧控制着水体氧化还原电位,决定有机污染物的矿化过程和速率(Mulling et al., 2013)。好氧条件下,硝化细菌将水体中氨态氮转化成硝态氮,同时改善沉积物透气性,增强沉积物硝态氮吸附,共同降低上覆水氨氮浓度;厌氧条件下,硝化作用受到抑制,反硝化作用强烈,促进沉积物氨氮释放,使上覆水氨氮浓度升高(Antileo et al., 2013)。

温度决定微生物酶反应活性,温度升高后,底栖生物的扰动可促进沉积物氮释放,同时也可增强沉积物—水界面的氨化,当水温从10℃增加到30℃时,沉积物中氨氮释放速率增加了两倍。静态作用下,沉积物氮释放由浓度梯度扩散。随着沉积物深度增加,孔隙率下降,氮的释放速度放缓。扰动破坏了泥水界面,可能造成沉积物氮、磷爆发性释放,释放量远大于静态释放。

偏酸和偏碱条件都利于沉积物氮释放(熊汉锋等,2005)。pH越低, H^+ 浓度越大,沉积物上所吸附的 NH_4^+ 与 H^+ 竞争吸附点位而被释放(Jing et al., 2013)。碱性条件下,水中 OH^- 能与 NH_4^+ 结合,以 NH_3 的形式逸出,降低水体氮浓度。此外,pH还影响沉积物微生物活动,从而间接促进沉积物氮释放。一方面,有机质影响沉积物氮释放,有机氮是有机质重要组成部分,有机质微生物降解释放大氮;另一方面,有机质降解过程消耗大量溶解氧,造成缺氧及厌氧环境,从而促进沉积物反硝化过程,增大氨氮释放量(Antileo et al., 2013)。沉积物磷来源于土壤颗粒物、悬浮污染物的絮凝沉淀、水生生物残骸堆积及颗粒物吸附。根据磷与沉积物中矿物质的结合形态不同,将其分为钙磷(Ca-P)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷(OL-P)、可还原态磷(Res-P)、有机磷(Org-P)。沉积物释磷机制包括生物释放、物理释放和化学释放,影响因素包括沉积物磷形态和环境因子