

# 湿地退化及其生态恢复

水环境所 程东升、王亮、王世岩、吴佳鹏

## 1 调研背景概述

湿地与森林、海洋并称全球三大生态系统，也是价值最高的生态系统。根据《湿地公约》的定义，湿地包括沼泽、泥炭地、湿草甸、湖泊、河流、滞蓄洪区、河口三角洲、滩涂、水库、池塘、水稻田以及低潮时水深浅于 6 米的海域地带等。湿地具有涵养水源、净化水质、调蓄洪水、控制土壤侵蚀、补充地下水、美化环境、调节气候、维持碳循环和保护海岸等极为重要的生态功能，是生物多样性的主要发源地之一，因此也被誉为“地球之肾”、“天然水库”和“天然物种库”。据联合国环境署 2002 年的权威研究数据显示，1 公顷湿地生态系统每年创造的价值高达 1.4 万美元，是热带雨林的 7 倍，是农田生态系统的 160 倍。湿地还是许多珍稀野生动植物赖以生存的基础，对维护生态平衡、保护生物多样性具有特殊的意义。

相比较而言，湿地是最濒危的生态系统 (Tockner et al., 2010)。由于自然原因及人类不合理开发利用，导致湿地面积减少 (Brinson and Malvarez, 2002)、蓄水量减少，水质恶化，整个湿地生态系统功能降低，生物多样性减少 (刘红玉和李兆富, 2006)。从世界范围来看，众多国家已经历或正在经历湿地面积迅速减少、退化的过程。在 17 世纪，美国有超过  $88 \times 10^4 \text{ km}^2$  的湿地，从殖民时期到 20 世纪 80 年代，损失了 53% 的湿地 (Bacon, 1992)。在过去的 1000 年时间内，欧洲大陆上 80% 的原生湿地损失殆尽 (Verhoeven, 2013)。大部分国家，如荷兰、德国、西班牙、希腊、意大利、法国等，其湿地面积损失均在 50% 以上 (Jones and Hughes, 1992)。亚洲的新加坡、菲律宾、泰国的红树林湿地已分别损失了 97%、78%、22% (Scott, 1992)。中国湿地退化现象也非常突出 (刘影和彭薇, 2003; 吴向培等, 2003; 田昆等, 2004; 侯伟等, 2005; 张昆等, 2008; 李景刚等, 2010)，71% 的湿地受到人类活动的严重威胁，天然湖泊已经从 20 世纪 50 年代的 2800 个下降到 80 年代的 2350 个，面积减少了 11% (傅国斌和李克让, 2001)。第二次全国湿地资源调查 (2009-2013 年) 显示，近十年来湿地面积共减少了 2.9%，湿地功能持续下降。

湿地的生态环境退化和可持续发展问题已成为当前湿地研究的焦点问题。美国于 1977 年颁布了第一部专门的湿地保护法规，美国国家委员会、环保局、农业部和水域生态系统恢复委员会于 1990 年和 1991 年提出了在 2010 年前恢复受损河流  $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，湖泊  $67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，湿地

400×10<sup>4</sup>hm<sup>2</sup> 的庞大生态恢复计划(US National Research Council, 1992)。中国在 1994 年制定的“中国 21 世纪议程”中, 把水污染控制和湿地生态系统的保护和修复作为中国长期的奋斗目标(周进等, 2001)。

本次调研针对湿地退化及其生态恢复中的热点问题, 通过搜集、整理国内外学术期刊、国际会议论文和相关研究报告, 从湿地退化特征及退化原因分析、湿地保护、退化湿地恢复重建与管理、湿地与全球变化关系研究、湿地生态系统健康评估、湿地评价等方面进行归纳、总结和提炼, 以期国内专家了解湿地退化及其生态恢复的发展动态, 为后续研究工作提供参考。

## 2 调研的原因、必要性和意义

20 世纪 70 年代以前有关湿地退化研究仅将湿地作为水禽和其他动物栖息地 (Shaw and Fredine, 1956; Keith, 1966) 或作为水源地 (Pojasek, 1977) 或作为生态环境的一部分 (Lang, 1970) 而对其退化特征作定性描述。伴随着 20 世纪 80 年代以来湿地科学研究的蓬勃发展, 湿地退化日益加剧, 湿地退化研究开始兴起 (Bedford, 1978), 但是该领域研究进展一直缓慢。21 世纪以来, 受经济发展、城市化过程、气候变化影响, 湿地退化已成为一种全球现象, 使之成为国际湿地学术会议的主要议题之一。研究领域包括湿地退化过程与机理、退化评价、退化分级、退化指标与指标体系、退化湿地管理、退化湿地遥感监测、退化湿地恢复和重建等, 其热点研究区域集中在美国佛罗里达州大沼泽地 Everglades、欧洲莱茵河流域 Rhine River, 东非维多利亚湖 Lake Victoria、北美五大湖(苏必利尔湖 Lake Superior、密歇根湖 Lake Michigan、休伦湖 Lake Huron、伊利湖 Lake Erie 和安大略湖 Lake Ontario)、巴西潘塔纳尔沼泽地 Pantanal 等世界重要湿地, 其中尤以美国佛罗里达州大沼泽地的湿地退化过程与机理研究最为深入 (Richardson, 2007)。

我国湿地退化研究起步较晚, 但发展比较迅速, 目前在湿地退化各个研究领域均有涉猎。热点研究区域主要包括东北三江平原沼泽湿地、四川若尔盖高原湿地、黄河三角洲湿地、青海三江源湿地、辽河三角洲湿地、云南纳帕海湿地、内蒙古乌梁素海湿地、东南沿海滨海红树林湿地以及太湖、洞庭湖、白洋淀等湖泊湿地。研究方法由过去仅局限于湿地特征描述的定性评价, 发展到湿地定量、定位研究, 3S 技术和数学模型模拟等 (李益敏和李卓卿, 2013)。迄今我国已有较多有关湿地退化的综合研究 (杨永兴, 1999; 杨永兴和王世岩, 2001; 宋长春, 2003; 尚士友等, 2003; 吕宪国和刘晓辉, 2008; 吴涛等, 2010; 王珺等, 2010), 而且也有学者就湿地退化的标准 (张晓龙和李培英, 2004)、湿地退化评价 (崔丽娟和张明祥, 2002; 高士武等, 2008)、退化湿地监测体系 (梁素娟等, 2009) 等方面的研究进行过评述。秦峰等 (2013) 对我国 2001~2010

年湿地恢复研究的文献计量学分析表明,国内湿地恢复研究专题文献基本上呈上升趋势,在各级科学基金的有力支持下,国内该领域的研究规模得到扩大和推进。

通过湿地生境恢复技术、湿地水文状况恢复和湿地土壤恢复等生物、生态技术或生态工程对退化或消失的湿地进行修复和重建是国际湿地研究的热点。最为成功的是美国和澳大利亚人工湿地构建和佛罗里达沼泽地退化湿地恢复与重建研究(杨永兴, 2002)。我国对湿地生态系统恢复与重建研究开展较晚(徐艳艳和徐艳东, 2008),研究对象也主要集中在湖泊和沿海滩涂(崔保山和杨志峰, 2001)。目前湿地保护的基础研究和科技支撑还非常薄弱,特别是对退化湿地的监测、恢复、功能、演替规律等方面缺乏系统、深入的研究,不能很好地为湿地保护和管理决策服务,制约了湿地保护与管理工作的开展。因此,还需要从生态系统整体角度出发,加强湿地生态系统演替与退化机制研究。通过湿地系统的演化研究,明确湿地退化的原因、机理,为退化湿地生态修复和可持续利用提供技术保障。

### 3 近年来该专题发展新动向和值得关注点

#### 3.1 湿地退化特征及其监测

##### 3.1.1 湿地退化特征

###### (1) 湿地退化水文特征

湿地是发育于水陆环境过渡地带的开放系统,它以水循环为主要载体,与周边环境系统之间不断进行物质、能量与信息交换,从而驱动其景观格局演变、物质元素循环、生物生长及其他生态功能的实现。水文过程与生态系统的关联因而催生了湿地生态水文学(Eco-hydrology),它以植物-水分的相互作用为核心,侧重于大气水、地表水与土壤水的研究(Baird and Wilby, 1999)。湿地退化水文特征通常表现为水文周期和水位的变化。当前在气候变化和人类活动的影响下,大部分退化湿地都存在地表水与地下水位下降的问题(Brooks, 2009)。湿地退化水文特征还表现为湿地补给水源、水文物理性质(含水量、持水能力、水分和毛细管运动、热力状况与蒸发作用)与水分运动(毛管运动与渗透过程)、径流和地表水平衡等方面的变化,这也是当前该领域重点研究内容(Chow-Fraser et al., 1998; Davis and Froend, 1999; Schwerdtfeger et al., 2009)。

湿地与地下水之间的关系则由于涉及地质学、水文地质学与水文地球化学等多个学科,在传统的湿地研究中相对少见。近年来对依赖地下水的生态系统的研究正在形成一门新的交叉学科-生态水文地质学(Eco-hydrogeology),从水文地质学视角探索河流、湖泊与湿地等生态系统的演

化过程与机制（万力等，2005）。在此背景下，地下水对于维持湿地生态系统健康、结构与功能稳定的重要性日益得到重视，近几届国际水文地质大会（IAH）及国际湿地会议（IWC）分别专门设置了“湿地与地下水流”、“地下水与湿地的相互影响”及“生态系统中地下水的作用”等专题，在全世界引起了关于湿地—地下水相互作用的多学科交叉探讨，“地下水文过程对湿地生态系统的影响机制”与“如何调控湿地-地下水系统水量与水质转化关系，维持湿地生态系统的健康和稳定”成为当前国际湿地研究的热点与前沿课题（范伟等，2012）。

### （2）湿地退化土壤特征

土壤退化首先表现为有机质、腐殖酸、容重、孔隙度、营养元素等理化特征的改变。美国佛罗里达州 Everglades 湿地在 20 世纪 40 年代被开垦为放牧场，土壤退化严重，与开垦之前相比，退化湿地全磷、全氮和碳含量均大幅减少（Sigua et al., 2004）。其次土壤碳固存和吸附污染物等功能特征的研究也日益受到重视（Le Mer and Roger, 2001; Lal, 2004），研究指标也趋多样化，如土壤酶和土壤微生物等生化指标的应用（Inglett et al., 2009; Rokosch et al., 2009），为湿地退化土壤特征研究开辟了新领域。张剑锋等（2009）讨论了植被群落和土壤酶活性与湿地退化的关系。王笛等（2012）对黄河三角洲退化湿地不同演替阶段的土壤酶活性、土壤养分和土壤微生物特性及土壤酶与养分和微生物的关系进行分析，揭示了黄河三角洲湿地退化与土壤的关系。

### （3）湿地退化植物特征

大型水生维管植物是湿地生态系统结构和功能维持的关键组成部分。植物群落退化与湿地退化关系的综合研究成为重点。在湿地退化过程中，植物生理过程（Dinka et al., 2008）以及群落高度（Owino and Ryan, 2007）、生产力（Hart and Lovvorn, 2000）、种群繁殖方式（Klimkowska et al., 2010）和种间关系（Mitchell et al., 2002）等生物生态特征均会发生退化，并且植物退化特征与湿地类型密切相关。对于沼泽湿地，由于过度放牧和排水疏干等人为活动干扰，原生湿地植物群落退化为杂类草群落，无论是种类的数量还是个体的数量均极大降低，使植物群落趋向同质化（Khaznadar et al., 2009）。对于浅水湖泊湿地（水深<4m），由于湖泊富营养化而造成植物退化特征突出表现为浮游植物或大型水生植物的过量生长，使湖泊向“藻型湖”（Hilt et al., 2006）或“草型湖”（尚士友等，2003）退化。

### （4）湿地退化动物特征

湿地退化动物特征研究主要集中在动物种类和丰度的变化，其变化特点依退化原因有别。排水疏干导致湿地退化突出的特点是湿地动物种类减少，数量下降，陆生动物种类增加，数量增多（Armitage et al., 2003; 马瑞俊等，2006）。污染胁迫下，湿地耐污染的种类保存下来，对污染敏

感的种类消失 (Schipper et al., 2008)。湿地退化动物特征研究的另一个特点就是其研究对象由传统的水禽、鱼类等大型湿地动物向昆虫、浮游生物等小型生物转变, 这些小型生物类群是湿地生态系统生产力主要构成部分, 处于食物链底端, 决定着大型动物的种群数量, 即“上行控制效应”(King and Brazner, 1999)。

#### (5) 湿地退化功能特征

湿地退化最严重后果是湿地生态功能削弱、甚至消失, 危及人类生存环境, 影响人类生态安全。伴随湿地生态系统退化, 首先大型维管植物的生产力和养分吸收能力下降, 从而削弱湿地的水质净化功能。其次湿地蓄洪能力降低, 水文调节功能削弱, 导致洪灾频繁发生。最后土壤侵蚀和植被丧失将会进一步降低湿地社会经济功能 (Hongo and Masikini, 2003)。此外, 气候变化将对湿地固碳功能产生重大影响, 有证据表明, 在未来全球气温上升的背景下, 温带北方泥炭地非生长季碳排放通量将会增加, 影响泥炭地 CO<sub>2</sub> 年度收支平衡 (Lund et al., 2004)。在全球环境变化和人类活动不断加剧情况下, 恢复湿地生态系统结构和功能是一项艰巨的任务。

### 3.1.2 湿地变化动态监测

湿地调查、评价和监测是湿地有效管理的重要组成部分。以遥感技术、全球定位系统、地理信息系统 (3S) 技术为主并综合水文、生态、地理等手段的大范围宏观监测和典型湿地定位连续监测相结合的方法是当前湿地变化监测的常用方法 (White and Fennessy, 2005; Shanmugam et al., 2006; Zomer et al., 2009; 许辉熙等, 2007; 牛振国等, 2009; Adam et al., 2010)。采用点面结合、遥感与地面野外调查结合、固定监测点连续观测的方法, 对湿地自然状况、生物多样性、周边社会经济状况及影响、保护与开发利用现状、湿地类型、面积与分布、土地利用状况、湿地管理现状、影响湿地的主要环境因子等内容进行监测, 监测内容包括湿地水、湿地土壤、湿地气象、湿地生物等要素监测、湿地类型及面积的监测、外来物种监测等。目前国际上湿地遥感监测研究表现出监测范围扩大、监测手段更新、监测时间增长的特点 (White and Fennessy, 2005; Shanmugam et al., 2006), 最新发展趋势是将高光谱和多光谱遥感技术用于湿地监测 (Adam et al., 2010), 合成孔径雷达 (SAR) 技术成为遥感监测研究新的生长点 (Zomer et al., 2009)。湿地蒸散发既是湿地水文平衡的关键环节, 也是指示湿地生态系统健康与否的指标之一。由于自然条件变化和农业开发利用等引起的湿地缺水是湿地退化的主要原因之一 (邓伟等, 2005; 王芳, 2006; Wei et al., 2010)。依据湿地生态系统的特征和湿地蒸散发的能量与水分平衡原理, 余其芬等 (2012) 构建了湿地水分亏缺指数 (WWDI: Wetland Water Deficit Index) 对湿地退化进行遥感动态监测, 并

以扎龙湿地为例，探讨了该方法的可行性。具体步骤是：首先，在地表能量平衡系统模型的基础上，利用 MODIS 遥感数据产品获得湿地蒸散模型的各项参数，并结合气象数据对湿地的实际蒸散进行估算；采用 Penman-Monteith 公式估算湿地的潜在蒸散量；在此基础上，利用湿地实际蒸散量和潜在蒸散量之间的比值关系，来反映湿地因缺水而退化的程度和空间分布状况。

虽然遥感信息被应用于湿地资源的调查中，由于湿地类型太多，因此，湿地类型的确定成为遥感信息提取湿地信息的主要问题，中国还缺少全国尺度上湿地资源的数据库建设，这严重地制约着中国对湿地资源的合理保护和科学管理。

## 3.2 湿地退化过程与机理

### 3.2.1 湿地退化过程

#### (1) 水文过程

湿地水文条件是决定湿地生态过程的关键因子，气候变化引起的地表积水水位变化直接影响湿地植物优势种群结构的演替及氧化-还原环境的变化，导致湿地生态过程发生变化（宋长春，2003）；反过来，湿地生态过程也影响着湿地水文系统，湿地植被通过拦蓄沉积物、对地表水荫蔽以及蒸腾的调节作用影响着湿地水文过程。水文退化过程主要影响湿地径流、蒸散和降水截流，改变湿地的水补给方式和水循环动态，这也是湿地-大气界面水文过程研究的热点和重点（Woo and Young, 2003）。研究气候变化影响下湿地水文-生态相互作用过程与机理，对湿地水资源供需与管理、湿地生态系统保护以及全球气候变化等具有极其重要的意义。

此外，国际上还注重应用各种水文物理模型描述水文过程的变化（董李勤和章光新，2011）。20 世纪 90 年代中后期是湿地生态水文模型研究的理论探索阶段（严登华等，2001）。最具代表性的是 1998 年 5 月在波兰 Lodz 召开的 UNESCO/IHP-V2.3、2.4 关于生态水文学的专项研究会议，主要成果表现在对模型尺度的探索、水文过程的生态环境效应、水文格局的生态效应以及模型与制图研究（王育礼等，2008）。由于湿地生态水文模型具有高度抽象性、灵活应用性以及良好经济性等优点，近年来相关研究已受到普遍关注。其中，强调植被结构与水文机制间的关系，并结合 RS、GIS 等技术手段，构建模型进行湿地水文机制与生态格局特征和响应机理的模拟是当前国际湿地生态水文学研究中的重要方向，国外学者在该领域开展了许多有益的研究探索（Porporato et al., 2002; Clément and Aidoud, 2007; Wolski and Murray-Hudson, 2008），开发了诸如 MODFLOW 模型（Bradley, 2002），FEUWAnet 模型（Dall'O' et al., 2001）、水文变异函数（Litaor et al., 2008）等水文物理模型。虽然近些年来国外湿地生态水文模型发展较快，但由于

湿地生态-水文系统特有的复杂性，开发研制的众多生态水文模型中，数理模型还占据主导地位，如何从特定地点的定位研究扩大到流域尺度，仍是当前研究的挑战所在（Sophocleous, 2002）。

### （2）生理生化过程

生理生化过程是揭示湿地植被和土壤退化微观过程的突破口之一，也是对湿地退化进行定量分级的基础。目前主要研究湿地退化过程中植物生理生化过程和土壤生化过程的变化，包括湿地优势植物营养元素吸收（Kansiime et al., 2007; Ciurli et al., 2009）、光合作用（Paerl et al., 2003）等植物生理生化过程，以及土壤酶活性（Liu et al., 2003; Inglett et al., 2009）、有机碳组成和氧代谢（Opsahl, 2005）等土壤生化过程。目前学者们对湿地生态恢复下土壤微生物的作用，有了一定的研究（郑春雨和王光华, 2012），但在相关研究中仍存在着一些问题。在有关土壤微生物指示湿地土壤质量关键指标筛选、湿地生态恢复过程中土壤微生物对微生物生境的响应、湿地土壤微生物功能活性和群落结构之间的联系、分子生物学技术应用等方面还需加强研究（孟向东等, 2011）。

### （3）生物过程

在湿地生态系统中，生物过程主要表现为生物群落的初级、次级生产和土壤污染物的生物降解过程。当湿地水文条件发生变化时，生物过程也将随之改变。有研究表明地下-地表水相互作用将对底栖无脊椎生物的丰度、物种数和生产力产生显著的影响，地下水位高的湿地具有更高的物种数和丰度（Hunt et al., 2006）。滨海盐沼湿地受原油污染、农药残留影响严重，对这些化学污染物的生物降解过程也较为重视，已在东南亚地区退化红树林湿地开展相当多研究（Tam et al., 2002; Zhou et al., 2008; 伍卡兰等, 2009）。

土壤微生物是湿地生态系统的分解者和转化者（Sims et al., 2013）。湿地土壤微生物直接参与土壤-植物之间的氮素化学循环过程（白红军等, 2008），也控制着湿地土壤硫、铁等元素的地球化学循环（Wright et al., 2009; Van Dijk et al., 2009; Gutknecht et al., 2009; Fortin et al., 2010）。而且湿地土壤微生物在土壤有机物降解、污染物代谢、养分循环过程中占有重要的地位（黄靖宇等, 2008）。然而，当前评价湿地恢复的指标大多是植被与两栖动物，对可评价退化生态系统恢复进程的土壤微生物的研究报道甚少。研究土壤微生物在恢复措施下的变化及响应机制，有利于认识湿地生态系统恢复过程（Van Dijk et al., 2009），为退化湿地生态系统合理恢复和湿地环境科学管理提供科学依据。

### （4）生物地球化学过程

生物地球化学过程是湿地退化研究的重点，主要包括湿地生态系统营养元素的吸收、积累、

分配及归还、凋落物分解、沉积物、温室气体排放和碳负荷量、生产力、重金属污染、微量元素的生产和消费以及定量化模型等 (Fediuc and Erdei, 2002; Opsahl, 2005; 刘景双, 2005; 王升忠, 2005; Megonigal and Neubauer, 2009)。其中, 泥炭沼泽凋落物分解过程是生物地球化学过程研究的一个重点领域, 包括凋落物分解率随时间变化的定量模型、凋落物分解的主要控制因素等 (Moore and Basiliko, 2006)。磷作为淡水湿地的限制性营养元素, 其循环及沉积过程也是当前研究的重点 (Reddy et al., 1999; Noe et al., 2003)。湿地退化过程与机理研究以美国佛罗里达州大沼泽地最为典型, 探明了来源于农业施肥的磷污染是大沼泽地退化的关键胁迫因子并确定了其强度阈值 (Richardson et al., 2007)。此外, 气候变化对生物地球化学过程的影响也颇受重视, 在暖干气候影响下, 一些元素的“源”“库”角色将发生转换 (Warren, et al., 2001), 从而深刻影响湿地生物地球化学循环过程。

### 3.2.2 人类活动与湿地退化

国内外多数学者普遍认为人为因素直接影响着湿地生态系统的退化 (Davis and Froend, 1999)。根据 2005 年联合国千年生态系统评估 (MA) 的结论: 湿地退化和丧失的速度超过了其他类型的生态系统退化和丧失的速度, 同样, 栖息在淡水和滨海湿地内的物种生存状况, 也比栖息在其他生态系统内的物种生存状况更加恶化。引起湿地退化和丧失的主要直接原因是基础设施建设、土地开垦、引水、富营养化、污染、过度捕捞、过度利用以及外来物种的引入, 主要间接原因是人口增长和经济发展加快。Mikołaj 等 (2012) 建立了基于 GIS 的分析工具, 对波兰坎皮诺斯国家公园湿地生态系统退化因果关系进行了分析, 对潜在危险进行了预测。Gong 等 (2010) 认为中国湿地损失的主要原因是人类活动, 气候变暖导致了我国西部地区湿地面积增加, 人工湿地面积增加是由经济发展带动的。王昌海等 (2012) 在参考相关文献以及咨询专家的基础上, 整合 13 个社会经济发展中人为影响湿地退化的影响因子, 应用因子分析法把 13 个主要影响因子分成了三大主成分, 即城市发展概况、农村生产以及全国基础设施建设以及资源禀赋。中国由于地域辽阔, 经济发展水平不一样, 地区间差异明显, 这样必然会对湿地退化产生不同程度的影响, 但归根到底都是湿地周边区域发展带来的影响。

### 3.2.3 气候变化与湿地退化

气候变化影响下湿地系统的气候效应、环境效应和生态效应已成为国际气候系统及全球变化研究中最活跃的领域之一 (邓伟等, 2003; 章光新等, 2008; Burkett and Kusler, 2000; Lahmer et al., 2001)。IPCC 第四次评估报告指出, 近百年来全球气候呈现以变暖为主要特征的显著变化,



并且在过去 30 年里，气候变暖在全球尺度上已对人类社会和自然生态系统产生了诸多负面影响（IPCC，2007）。据中国《气候变化国家评估报告》，20 世纪中国气候变化与全球变暖的总趋势基本一致（《气候变化国家评估报告》编委会，2007）。气候变化通过改变全球水文循环的现状而引起水资源在时空上的重新分布，导致大气降水的形式和量发生变化，对湿地生态系统的水文过程产生重要影响；同时，气候变化对气温、辐射、风速以及干旱洪涝极端水文事件发生频率和强度造成直接影响（张建云，2008），从而改变湿地蒸散发、径流、水位、水文周期等关键水文过程，对湿地生态系统的结构和功能产生深远的影响。因此，在全球气候变化导致的湿地干旱缺水、面积萎缩和功能退化等现实背景下，关于气候变化对湿地生态水文影响的研究已引起国内外科学家的高度关注和重视，成为当前气候变化和可持续发展研究领域关注的热点，也是学术界关注的重点领域（张建云等，2008；王浩等，2010）。全球与区域气候的变化只是为湿地退化提供了一个基本背景，而关键气象要素在中小尺度上时空分配状态的变化和局地气候特征的改变则可能是湿地退化的更直接的原因和动力。未来需要加强不同时间尺度上湿地对气候变化的响应研究，以进一步揭示湿地对全球气候变化的响应机理。

### 3.3 退化湿地生态恢复与重建

#### 3.3.1 退化湿地生态恢复理论

湿地恢复是当今恢复生态学研究的主要内容之一。生态恢复的目标一般包括 4 个方面：景观的恢复、生态环境的恢复、生态系统结构与功能的恢复以及生物种群的恢复（Keever，1950；Bradshaw，1983）。湿地的恢复总体上是逐步恢复退化湿地生态系统的结构和功能，最终达到湿地生态系统的自我持续状态。其基本理论包括生态限制因子理论、生态位理论、中度干扰假说、生态系统演替理论、自我设计与设计理论、系统整体性和最优化理论等（崔丽娟等，2011）。湿地的生态恢复主要侧重于适宜的水文学恢复、特殊生境与景观的再造、沼泽植物的再引入与植被恢复、物种多样性的丰富、入侵物种的控制等（Horn，1974；U.S. National Research Council，1992）。具体而言，湿地生态恢复有如下几大基本目标：（1）实现生态系统地表基底的稳定性。地表基底是生态系统发育和存在的载体，良好的基底条件能保证生态系统的健康发展。（2）恢复湿地良好的水状况，在恢复湿地的水文条件同时也要是通过污染控制，改善湿地的水环境质量。（3）恢复植被和土壤，保证一定的植被覆盖率和土壤肥力。（4）提高生物多样性。实现生物群落的恢复，提高生态系统的生产力和自我维持能力。（5）恢复湿地景观，增加视和美学享受。

### 3.3.2 退化湿地生态恢复与重建技术

#### (1) 退化湿地水文恢复技术

水文过程决定了植物、动物区系和土壤特征 (Alho, 2008), 是湿地恢复的关键。在水文恢复过程中, 通常需要根据湿地退化程度及原因, 通过筑坝 (抬高水位)、修建引水渠等水利工程措施, 具体包括湿地水文联通技术、蓄水防渗技术和生态补水技术等适当的恢复湿地水位, 合理控制水文周期, 并进一步运用生物和工程技术净化水质, 去除或固定污染物, 使之适合植物生长, 以保持湿地水质。现在有些湿地科学家更提倡在流域尺度上进行退化湿地的恢复, 在遵循原湿地水文特征的基础上, 人工加以适当的辅助措施, 从而达到恢复水文、净化水质的目的。Mitsch 等人 (2006, 2007, 2008) 在美国密西西比-俄亥俄-密苏里河盆地进行了较多的湿地水文恢复研究, 其中的“牛轭”设计研究是一个较为成功的例子, 有效降低了水中硝态氮、总氮、可溶性活性磷和总磷的含量。

#### (2) 退化湿地水环境恢复技术

随着水环境恢复理论地不断完善和深入, 近年来水环境恢复研究发展较快。美国有关受损水环境的修复研究, 自 1970 年起由 Clean Lake Program (CLP) 组织实施, 投入经费逐年增加 (张维昊等, 2003)。欧洲一些国家也从 20 世纪 70 年代开始水环境治理和修复工作。如荷兰在 1990 年对 Alde Feane 地区水环境进行修复, 成效显著 (Claassen et al, 1995)。20 世纪 80 年代, 我国开始了对水环境恢复的研究工作, 并在巢湖、太湖等不同地区开展了水环境恢复的研究与实践 (Hu et al., 2008; Yang et al., 2010; Zhai et al., 2010), 取得了许多成功的经验。目前国际上采用的技术可以概括为三类: ①化学方法: 通过氧化-还原作用及化学凝聚、吸附作用除去磷、重金属及难溶物质。但是该方法易造成二次污染 (马蕊等, 2003)。②物理方法: 通过物理沉淀、过滤、吸附除去可沉淀的固体、胶体、BOD<sub>5</sub>、氮、磷、重金属、细菌、病毒及难以溶解的有机物质 (Kassenga, 1997)。③生物方法: 通过微生物代谢、氧化作用、植物的吸收及细菌的消化与反消化作用除去 BOD<sub>5</sub>、氮、磷、胶体和难溶有机物质及重金属。由于生物的自然生命周期的限制, 这个方法通常耗时较长, 但没有以上两种方法的副作用, 效果较好。

退化湿地水环境恢复主要有生态拦截技术、湿地植物净化技术、水生动物净化技术、基于水环境处理的人工浮岛技术和人工湿地净化技术等, 达到净化水体、恢复湿地水环境结构和功能、美化环境等目的。在这些技术的研究与应用中, 湿地植物对污染物的耐受性和多种生态恢复模式的整合将成为今后湿地恢复研究的焦点 (李胜男等, 2011)。

1) 生态拦截技术。外界环境输入到水体中的营养物质过量, 在水体中累积超过了水体自身

的容纳能力，而导致水环境结构破坏或功能丧失，是水环境受损的主要原因。控制外来污染物主要采取生态拦截系统，包括设置生态沉降池、生态坝、生态隔离带和投放生物制剂等方法，在入水口处安置生物膜，或种植茭白、慈菇、菖蒲、芦苇和睡莲等部分吸收污染物较强的水生植物，建立滨水植物隔离带，通过植物的截留和纳污等功能，建立生态屏障，割断或减少污染源输入。太湖流域利用生态拦截草带控制面源污染取得了明显的效果(李国栋等, 2006; 张红举等, 2010)。

2) 湿地植物净化技术。湿地植物修复技术作为污水生态处理系统中的重要组成部分，成为受损生态系统修复重构技术的前沿与热点。在受污染水体中，人工种植污染物吸收能力强、耐受性好的植物，利用植物的生物吸收作用(杨文斌等, 2007; 沈佳等, 2009)、植物与微生物的协同作用(Hargeby et al., 1994; 金相灿等, 2007; 白秀玲等, 2009)，从污染水环境中去除污染物；或者基于水生植物与藻类对光照和营养盐的竞争原理以及植物之间的相生相克作用，抑制藻类的繁茂生长(Hammouda et al., 1995; 韩仕群和张振华, 2000; 李小霞等, 2006; 何少林等, 2006; 马沛明等, 2007)，可以达到净化水体和恢复受损水环境的目的。

3) 水生动物净化技术。通过调整水生动物结构，利用滤食性动物对藻类的摄食作用，提高浮游动物对浮游植物的摄食效率；或者优选在水体中吸收、富集重金属的鱼类以及其他水生动物品种，在水体中重建菌→藻类→浮游生物→鱼类的食物链，并对鱼类进行定期捕捞，利用食物链关系对水体中过量的营养物质或重金属回收和利用，可以有效地控制藻类和其他浮游植物的繁殖(Marklund et al., 2002; 金相灿等, 2007)，净化水质并引导该区域湿地生态系统尽快进入良性循环。

4) 基于水环境处理的生态浮岛技术。生态浮岛在水环境处理中具有净化水质、提供生物生活空间、美化景观、消浪和保护湖岸等功能。生态浮岛的水质净化主要针对富营养化的水体，利用生态工学原理，将植物种植于浮体上，通过植物根系形成的微生物膜及微生态系统，降解、吸附和吸收水中的 COD、氮和磷等物质，贮存在植物细胞中，并通过木质化作用使其成为植物体的组成成分，达到净化水质、提高水体透明度的目的，同时还可以通过遮荫效应、营养竞争等抑制浮游植物的生长。

5) 人工湿地净化技术。近年来，由于湿地处理污水技术廉价高效、系统运行比较稳定、运转费用较低，且与景观建设相结合具有美化环境的效果而受到人们广泛地关注。目前，作为经济有效的生态修复技术，人工湿地也被用于微污染水体和地下水的修复(Lin et al., 2008; Braeckevelt et al., 2008; Wu et al., 2011)。正常运行的人工湿地系统，对污水中的多种污染物都有较好的去除效果，去除污染物效率的大致范围：悬浮物(SS) 70%~90%，生化需氧量(BOD) 85%~95%，

化学需氧量 (COD) 50%~80%，总氮 (TN) 30%~80%，总磷 (TP) 50%~90%。在美国佛罗里达州，人们发现废水在进入地下水之前流经一片柏树沼泽地 (cypress swamps) 后，几乎 98% 的氮和 97% 的磷被净化排除了 (Maltby, 1986)。目前，在美国有 600 多处人工湿地工程用于处理市政、工业和农业废水 (EPA, 2000)。越来越多的证据表明，微生物是人工湿地控制过程中的重要指标 (杜刚等, 2013)。净化污水和废水的过程中，微生物是去除有机物和含氮化合物的主要承担者 (Faulwetter et al., 2009)，对湿地除磷也起到一定促进作用 (Oehl et al., 2004)。Zhi 和 Ji (2012) 利用 SCI 1991-2011 年数据库对人工湿地研究进行了评估，认为 1991-2011 年期间，国际人工湿地研究热点集中在水、营养、植物和水流流态 4 个方面，未来这一领域的研究热点将集中在植物修复和水平流流态两方面。

### (3) 退化湿地生境恢复技术

针对河道的整治最根本的措施是河流地貌学以及水动力学特征的改善，目的是改善河流生态系统的结构与功能，标志是水质的净化和生物群落多样性的提高，主要措施有：①在上游流域实行流量控制，以提高水位。②恢复河道自然走势，使它按原来的流路曲折前进 (朱晓丽, 2005)。③在人工大堤上打出沟槽，或者去除河道上的堤坝，允许河水漫滩，恢复河滨沼泽。④从水文动力学角度来看，要增加支流数目 (姚勤农, 2003; 姜跃良等, 2003)。通过这些方式，河水为漫滩湿地提供了营养物质、沉积物、植物种子和小型有机体，漫滩为生物提供了栖息地，又净化了水质。

### (4) 退化湿地植被恢复技术

植被是湿地生态系统的“工程师” (Tanner, 2001)，也是湿地恢复的重要组成部分。受损湿地的生物群落往往是缺乏植被覆盖或者种群结构单一，从而导致生态系统不稳定。湿地生物修复一般在以下几个方面展开：①先锋物种的选择。在退化严重的湿地生态系统，先锋植物能够有效保持和改良人工固定的土壤，一般应选择根系发达，生长迅速的一年生草本物种，以更快改善土壤结构和养分自给能力。②恢复本地物种与引入外源种。在植被恢复时，尽量使用当地物种。当地物种长期与环境协同进化，据有较高的适应性。有时为了增加系统生物多样性，也采取适当引入外源种。在引入外源植物时应注意考虑自然条件是否有利于该种植物的生长。避免引进与本地种生态位相同的物种，避免生物入侵 (熊红, 刘永碧, 2003)。

目前植被恢复技术手段多样，日益成熟，其中通过湿地土壤种子库进行天然恢复研究较受重视 (Klimkowska et al., 2010; Robertson and James, 2007; Williams et al., 2008; Eldridge and Lunt, 2010)。此外，Kowalski 等 (2009) 采用便携式围堰技术恢复伊利湖 (Lake Erie) 湖滨湿地挺水

植被。Mälson (2007) 通过温室和田间试验方法, 采用苔藓配子体片段进行沼泽湿地恢复。但不论采用哪种方式进行植被恢复, 重要的是要了解物种的生活史及其生境类型, 恢复生物避难所, 这对于灾难性干扰后原生种群的存活与恢复至为重要 (Lake et al., 2007)。我国近年在退化湿地植被恢复方面也进行了大量有益探索, 尤其在黄河三角洲滨海湿地开展的植被恢复研究, 已取得一些进展, 出版了专著。

#### (5) 退化湿地土壤恢复技术

退化湿地土壤恢复技术主要是通过生物、生态手段达到控制湿地土壤污染、恢复土壤功能的目的。其中利用生物手段修复土壤污染较受重视, 尤其在人口密度极大的滨海湿地生态系统应用更为广泛, 如利用细菌降解红树林土壤中的多环芳烃污染物 (Tam, 2002)、利用超积累植物修复重金属污染土壤 (Fediuc and Erdei, 2002)。生态恢复主要在了解湿地水文过程、生物地球化学过程的基础上, 通过宏观调控手段达到恢复土壤功能的目的, 如通过调控水文周期或改变土地利用方式等以恢复湿地土壤水分状况, 促进湿地土壤正常发育, 加速泥炭积累过程 (Erwin, 2009)。但土壤生态恢复影响因素较多, 恢复过程不易控制, Niedermeier (2007) 在研究泥炭沼泽湿地土壤恢复过程时发现, 通过洪水冲积以恢复土壤肥力的传统做法将会因为氧化还原作用反而引起土壤养分的流失, 增加水污染的风险。因此在恢复过程中需要对土壤的各种生物、物理、化学过程进行深入研究以制定合理方案。

### 3.3.3 湿地退化及生态恢复评价

在湿地的生态恢复过程中, 人们较为关心的问题之一是以什么指标衡量湿地恢复和达到何种程度可算湿地恢复成功。目前湿地恢复的研究虽多, 有关湿地恢复的评价标准却不统一。湿地退化及生态恢复的合理评价方法是实践上亟待解决的问题。

#### (1) 湿地生态系统健康的评估

生态系统健康评估作为分析生态系统结构、功能特征的新方法已逐渐成为全球湿地管理的新目标而被学术界所广泛重视 (Xu et al., 2001; 崔保山等, 2002; 钦佩, 2006)。生态系统健康这个概念虽然出现较早 (章家恩和徐琪, 1997; Schaeffer, 1988; Rapport, 1989, 1998; Leopold et al., 2001), 但是目前国内外还未对其进行深入研究, 更没有形成一套比较完整的体系。在过去的几十年里, 湿地生态系统健康的度量指标主要集中在化学和生物指标上, 包括水、沉积物和有机物的化学组成, 物种的丰度、繁殖和生长, 种群规模的变化, 物种组成和多样性 (Sharma and Rawat, 2009), 生态系统生物量和生产率。这些指标之所以被广泛应用, 主要是因为它们比较容易测度,

花费也较低,能够提供生态系统受损的早期预警,同时对生态变化具有极高的敏感性,也能为决策者提供有利依据。湿地生态系统健康评价指标的选取不仅要生态、经济、社会三要素相整合,而且还需要考虑整个区域或流域内不同管理条件下所导致的湿地生态过程、经济结构、社会组成的动态变化,以利于维持湿地系统的可持续性(Xu et al., 2004)。比较起来,徐福留等建立的湖泊生态系统健康评价指标体系(Xu et al., 2001)不仅对淡水湿地,而且对海滨湿地生态系统健康评估都具有较好的参考价值和可操作性(Xu et al., 2004)。其健康指标体系涵盖结构、功能和系统3个方面,具体考察湿地生态系统结构、功能和系统层面对外界压力(尤其是化学压力,如酸度、富营养化、重金属、油污和农药污染等)的反应。

在河口湿地生态系统健康研究方面,美国环保局提出了一系列生态系统的健康指标,主要有:①响应指标:包括底栖生物构成及生物量、鱼类明显的病理、鱼群结构、大甲壳动物的相对丰度、表现氧化还原电位的连续性等;②暴露指标:包括沉积物中污染物浓度、沉积物毒性和水体毒性等;③栖息环境指标:包括盐度、沉积物特性和水深等;④干扰因子:包括淡水排入量、气候波动、污染物负荷量、河流状况、人口地理分布状况等,以此来管理和规划河口湿地(美国环境保护局近海监测处,1997)。2000年,美国环保局和加拿大环境机构在“湖泊生态系统现状研讨会”上提出了湖泊湿地生态系统健康评价指标体系(United States Environmental Protection Agency & Environment Canada, 2000),主要包括:①近岸水体指标;②湖滨湿地指标;③近岸陆地指标;④土地利用指标;⑤人类健康指标;⑥社会经济指标;⑦特别宏观指标(如气候因子)等类型。在具体的健康评价过程中将调查地区的生物成分、环境因子和人文社会经济状况等类指标进行整合,显示了湿地生态系统健康评价方法发展的区域性、社会性和特别宏观性。宫少军等(2012)从天津市滨海湿地健康条件的4项功能出发,即生物完整性、湿地的水文功能、湿地可收获的生产力、生物地球化学过程及其过滤功能等,概化出度量指标的学科归属为水文地质、海洋地质、地球化学、生物与微生物4个方面,确定出滨海湿地条件评价指标系统。Zhu等(2014)以功能群及其适宜性生境(水、土等因子)为诊断指标,尝试建立了海滨湿地生态系统健康评价指标体系,该方法根据参照湿地的健康特征设置一系列“镜像化”指标,有利于简化复杂的指标体系,使生态系统健康评估更加简便,结果更趋科学性。

## (2) 湿地退化评价指标体系

目前湿地退化评价指标与指标体系正在逐步建立过程之中,虽然还没有建立完善的指标体系,但是已经取得很多新进展。在现有的评价指标中,大体可分为生物指标、土壤指标、水体指标、景观指标和社会经济指标(Barbier, 1993)等,几乎涵盖了湿地生态系统的各个方面。在

当前研究中, 较为系统、完整的定量评价指标有 Chow-Fraser 等人在加拿大劳伦森大湖 (Laurentian Great Lakes) 湿地所做的工作, 提出了一系列的定量化湿地退化评价指标, 包括水质指数 (WQI)、水生植物指数 (WMI)、湿地鱼类指数 (WFI) 和湿地浮游动物指数 (WZI) 等, 这些指标既有水体指标又有生物指标 (Seilheimer et al., 2009; Richardson et al., 2007; Loughheed and Chow-Fraser, 2002; Seilheimer and Chow, 2007; Croft and Chow-Fraser, 2007)。此外, 国际上常用的还有基于生物完整性指数 (IBI) 的评价指标, 该指标从湿地的植物和动物的角度来确定湿地退化的程度及阈值, 其最初源于鱼类群落生物完整性指数, 此后被应用于各种生物类群, 包括植物 (Hargiss et al., 2008)、两栖类 (Micacchion, 2002) 和鸟类 (Noson and Hutto, 2005; Getachew et al., 2012) 等。此外 Johnston (2007) 利用 10 个环境连续变量指标 (水深、草丛高度、纬度、经度、草本枯落物、木本植物枯落物、浮木、裸地、褐苔和开阔水域) 评价了 90 个美国滨海湿地植被退化状况; Spencer (1998) 则利用植被、土壤、水体的 13 个指标建立了退化湿地生态系统的快速评价指标体系。

我国近年在这方面研究也取得了重要进展。对黄河三角洲滨海湿地、三江平原湿地、云南纳帕海湿地等均开展了湿地退化评价研究 (崔保山和杨志峰, 2002a, 2002b; 李宁云, 2006; 张晓龙等, 2010)。陈颖和张明祥 (2012) 在滨海湿地和内陆湿地分类框架下, 依据湿地类型主要特征和主要退化表现因子确定主要评价指标, 每种评价指标又按不同的评价标准和不同的计算方法分别赋分, 并按分值不同划分为未退化、轻度退化、重度退化、极度退化 4 个等级。并依据 2005-2009 年的监测数据, 对我国现有的 10 处滨海国际重要湿地和 22 处内陆国际重要湿地进行了退化状况评价。尹连庆等 (2009) 在充分考虑衡水湖湿地实际情况的基础上, 从湿地生态特征、功能整合性和社会经济环境三个方面的评价指标中筛选出 24 项指标, 同时参考湿地生态系统健康评价体系, 得出了适合衡水湖湿地的评价体系。

### (3) 湿地退化及生态恢复评价方法

美国在 20 世纪初为了建立野生动物保护区, 开展了湿地评价工作 (Larson, 1994)。50 年代进行了以湿地物种为主要对象的湿地编目和湿地评价研究 (Bacon, 1992)。70 年代, Larson 和 Mazzarse 提出了第一个帮助政府颁发湿地开发补偿许可证的湿地快速评价模型。Brinson (1994) 在湿地水文地貌分类体系的基础上提出了“五步”湿地功能评价的方法。近年, 湿地评价指标体系和模型成为研究的热点问题, 美国在湿地水文地貌分类体系的基础上提出湿地功能评价方法和快速湿地功能评价方法, 如 IBI (the Index of Biotic Integrity) 和 HGM (the hydrogeomorphic Method) (Brinson et al., 1996; Whigham, 1999) 以及由美国环境保护局建立的湿地研究计划 (Wetland

Research Program, 简称 WRP 方法) 等, 这些评价方法已被越来越多的国家和学者所采用。目前发展的趋势是通过实验获得数据和指标, 美国已经设立了以地景级别的标志来评价全国生态健康状况的长期趋势实验场, 为湿地提供定量评价方法 (Brinson, 1993)。欧洲通过建立湿地系统共有的关键过程以及它们与功能的联系, 测定湿地系统对外界干扰的恢复能力以及对这些干扰的反应, 利用动力模型和定期的观测确定湿地功能分析阈值。相比之下, 我国湿地退化的评价研究开展较晚。但随着近年来, 各种自然和人为因素导致我国大范围湿地退化现象严重, 湿地退化评价的研究范畴及方法也得到不断的丰富。如彭少麟 (2001) 通过将恢复后的生态系统与类似的、未受干扰的生态系统进行对比, 以评价恢复的效果。崔丽娟等 (2011) 全面考虑工程技术及经济、社会、生态等多种效益, 根据恢复区具体情况建立一套多指标、多层次的综合评价体系。评价的内容包括湿地生物及群落、湿地水土理化性质、湿地生态功能与价值、湿地景观格局等。

### 3.4 湿地保护与可持续管理

尽管面临着如何界定什么是“好”的湿地管理这些难题, 一些国际组织和机构还是制定了他们自己的湿地管理标准。例如, 湿地公约组织坚持湿地的合理利用的概念, 倡导通过生态系统方法来保护湿地生态系统及其功能、维持湿地文化、实现社会经济可持续发展 (Ramsar Handbook, 2007)。从 1992 年的都柏林国际水与环境大会开始, 水资源综合管理 (Integrated Water Resources Management, IWRM) 开始成为水资源管理的核心, 全球水伙伴 (Global Water Partnership) 认为水资源综合管理是促进协调发展和管理水资源、土地及相关资源, 以最大限度地以公平的方式经济和社会得到的福利不损害重要生态系统的可持续性的有效手段。但实际上, 实现水资源综合管理难度很大。Biswas (2004) 认为很少有实现水资源综合管理的实例, Molle (2008) 甚至把 IWRM 描述成印度教义中的极乐世界 (Nirvana)。西方发达国家的实践经验表明, 即使有很好的信息和技术支撑, 实现好的管理前途依然不会乐观 (Holling and Meffe, 1996; Lebel et al., 2006)。实现湿地有效管理的障碍主要体现在以下三个方面: 湿地边界往往不是很清楚, 导致个别和集体的利益之间的冲突; 流域发展对湿地的影响; 湿地信息缺失, 导致用户/利益相关者对湿地可持续利用缺乏相应的了解 (Turner et al., 2007)。Ostrovskaya 等 (2012) 制定了一套分析框架来评估匈牙利 Gemenc floodplain、南非 Ga-Mampa wetland、乌干达 Nabajjuzi and Namatala wetlands 管理能力, 研究发现, 湿地管理能力需要进一步加强, 特别是在公众参与、知识发展、运营管理等方面。

国际间的交流与合作是实现湿地可持续管理的重要途径。《湿地公约》也称作拉姆萨尔公约



(Ramsar Convention), 是为了保护湿地而签署的全球性政府间保护公约, 全称为《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》(Convention on Wetlands of International Importance Especially as Waterfowl Habitat, 简称《湿地公约》), 对促进各成员国之间的合作, 加强对世界湿地资源的保护及合理利用, 以实现生态系统的持续发展方面发挥了重要作用。1992 年, 我国成为《湿地公约》的签约国, 世界环境与发展大会之后, 我国制定了《中国 21 世纪议程》, 将湿地的保护与合理利用列为优先项目计划, 并在国家林业局的主持下, 于 2000 年组织了《中国湿地保护行动计划》, 开展了全国湿地资源调查。2007 年, 国家林业局湿地管理中心正式组建。目前, 我国与许多周边国家和地区签定了一系列有关湿地保护的协议或协定。通过国际间合作增加了湿地保护的资金投入, 国外许多先进技术和方法在中国湿地保护工作中得到了应用, 促进了中国湿地保护事业的发展。

## 4 展望

在分析国内外湿地退化及其生态恢复相关研究的基础上, 结合我国生态文明建设的要求, 湿地退化及其生态恢复需要重视以下几方面的工作。

### 4.1 人类活动影响下湿地环境的变化规律及对策研究

由于人们长期以来对湿地的破坏性开发利用, 导致很多湿地系统丧失了其生态环境调节功能, 对湿地所在的区域环境造成了一定的危害。因此, 有必要研究人类活动对中国湿地的影响, 有利于采取有力措施恢复已被破坏的湿地生态系统, 为人类提供良好的生存环境和丰富的资源。

### 4.2 湿地退化机制

湿地退化过程和机制、湿地退化的指标及指标体系建立是当前国际湿地科学研究前沿领域的热点问题。利用野外实测和现代分析手段, 研究不同干扰条件下湿地水文与水质、土壤性状、植被状况以及生态环境功能的退化过程; 从生物学、生态学、生物地球化学、物理化学等方向入手, 深入探究湿地退化的机理、驱动机制。要考虑通过实验手段, 区分人为干扰的直接作用和全球气候变化对湿地生态系统产生的影响。

### 4.3 湿地生态系统对气候变化的响应

气候变化影响下湿地系统的气候效应、环境效应和生态效应已成为国际气候系统及全球变化研究中最活跃的领域之一。由于湿地分布广, 类型多, 需要进一步研究湿地生态系统对气候变化

响应的模式和机制，分析气候变化对湿地生态系统的敏感性、突变阈值及早期信号等。定量分析气候变化对湿地生态系统演化影响的贡献，模拟不同气候影响下的湿地生态系统演化特征，对未来气候条件下湿地生态系统的演化趋势进行模拟预测，提出应对气候变化的湿地生态恢复保护措施。

湿地为地球上三大重要生态系统之一。湿地温室气体在全球循环中起重要作用。应该加强对主要类型湿地温室气体排放研究。侧重从机理上揭示湿地温室气体源、汇过程与通量变化的机制，特别是建立更加精确的模型。侧重研究中国湿地温室气体排放与中国乃至世界环境变化的关系、不同水平温室气体排放与气候变化的关系。

#### 4.4 退化 and 被破坏湿地的生态恢复技术研究

退化湿地恢复与重建已成为国际湿地学前沿领域的热点问题之一。随着湿地退化问题的不断严重，以逐步恢复和重建退化湿地生态系统、促进受威胁的湿地物种的生态恢复并进而重建健康的湿地生态系统为出发点，采用科学研究与湿地生态治理、修复技术相结合的方式，推进退化湿地保护的科学实践研究已引起大量学者的广泛关注，但目前国内的研究水平与国际上一些发达国家相比还存在着较大的差距，退化湿地恢复与重建研究的硬件及软件条件还相对比较落后。应通过进一步的理论研究与恢复实践，获得不同地区和类型湿地退化的成因与机制、成功的退化湿地恢复与重建的模式，建立我国的湿地退化和湿地恢复生态学理论体系。应在湿地生物生境重建、土壤恢复、生态系统功能恢复植被重新定植及其调控和恢复区管理技术方面加强研究。

#### 4.5 湿地景观格局变化研究

20 世纪以来，土地利用变化及其产生的环境效应已引起了国际社会的普遍关注，成为国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 与全球环境变化中的人文因素计划 (IHDP) 共同关注的重要内容之一。湿地景观格局取决于湿地资源的地理分布和组分，与湿地生态系统抗干扰能力、恢复能力、稳定性、生物多样性等有着密切联系。湿地景观格局变化分析包括土地利用变化分析、景观格局分析和变化驱动力分析 3 个层次，其中，土地利用变化分析是基础，景观格局分析是手段，变化驱动力分析是核心。还需要开展以下几方面的研究：(1) 针对特定的湿地景观格局动态变化研究，应抓住湿地关键生态过程，结合湿地景观格局多样性、空间差异性和多功能特征，深刻认识和揭示湿地景观格局与生态过程之间的关系；(2) 土地利用变化和人类活动直接导致湿地景观变化，栖息地缩减、生物多样性减少，以及区域水文环境、气候环境等累积环境效应的产生，加强对湿地景观格局及其累积环境效应的研究，为湿地保护和恢复研究提供科学依据；(3) 利用 RS 影像，

在 GIS 环境下, 提取湿地景观格局空间数据, 以相关的湿地景观格局指数为评价指标研究生态安全, 从整体上认识自然与人为干扰对湿地景观格局的影响, 进而了解湿地生态安全状况和生态环境的变化趋势, 为湿地资源开发、社会经济活动提供预警信息, 避免由决策失误带来的重大生态、经济损失。

#### 4.6 湿地可持续管理

湿地调查、评价和监测是湿地有效管理的重要组成部分。美国每年启用卫星进行全国湿地普查, 严格监控湿地变化, 一年出一张全国湿地普查图, 发现哪里湿地面积减少立刻追查原因, 对破坏湿地的行为进行处罚。中国开展的第二次湿地普查(2009~2013年)与第一次普查时间(1995~2003年)(刘平等, 2011), 不仅二次普查时间间隔10年, 而且每次普查时间较长, 缺乏对湿地资源的动态变化、湿地资源受破坏和威胁状况的深入了解, 不利于湿地的保护。因此, 中国的湿地研究中, 需要提升湿地的监测手段与技术, 开展湿地动态监测研究, 建立湿地动态变化预警系统, 为湿地的保护、管理提供准确有效的信息和技术手段。

湿地的保护与合理利用是保障区域生态安全和社会经济可持续发展的重要组成部分。湿地保护与合理利用应该首先对湿地生态系统功能与价值及湿地健康状况进行定量评价, 以制定湿地保护与管理的策略。在湿地保护上, 亟待进一步建立健全湿地保护的政策法规, 加大资金投入, 探索湿地生态效益补偿机制和长效补水机制。在湿地的合理利用上, 应加强湿地资源利用有效模式的研究与试验示范, 提高可持续发展能力。

### 参考文献

- [1] Adam E., Mutanga O., Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecological Management*, 2010, 18: 281-296.
- [2] Aldo Leopold, J. Baird Callicott, Eric T. Freyfogle, Scott R. Sanders, *For the Health of the Land: Previously Unpublished Essays and Other Writings*. Island Press. 2001.
- [3] Alho C J R. Biodiversity of the Pantanal: response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. *Brazilian Journal of Biology*, 2008, 68(4): 957-966.
- [4] Armitage P D., Szoszkiewicz K., Blackburn J H., Nesbitt I. Ditch communities: a major contributor to floodplain biodiversity. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*,

- 2003, 13(2): 165-185.
- [5] Bacon P. R. Wetland Restoration and Rehabilitation in the Insular Caribbean. In M Moser, RC. Prentice. J Van Vessem (eds). *Waterfowl and Wetland Conservation in the 1990's: A global Perspective*, Proceedings of the IWRB Symposium Florida. 1992.
- [6] Baird A. J, Wilby R L. 1999. *Eco-hydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. London: Routledge.
- [7] Barbier E. B. Sustainable use of wetlands valuing tropical wetland benefits: economic methodologies and applications. *The Geographical Journal*, 1993, 159(1): 22-32.
- [8] Bedford B. Wetlands protection efforts, needs and priorities in Wisconsin. Reston: Proceedings of the National Wetlands Protection Symposium, 1978: 63-68.
- [9] Biswas A.K. Integrated water resources management: a reassessment. *Water International*, 2004, 29 (2), 248–256.
- [10] Bradley C. Simulation of the annual water table dynamics of a floodplain wetland, Norborough Bog, UK. *Journal of Hydrology*, 2002, 261(1/4):150-172.
- [11] Bradshaw A D. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1983, 20: 1-17.
- [12] Braeckevelt M., Mirschel G., Wiessner A., et al. Treatment of chlorobenzene-contaminated groundwater in a pilot-scale constructed wetland. *Ecol. Eng.*, 2008, 33(1): 45-53.
- [13] Brinson M M. A hydrogeomorphic classification for wetlands. Wetlands research program technical report WRP-DE-R, U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1993. 1-24.
- [14] Brinson M. M. Assessing wetland functions using HGM. *Nat Wetlands News*, 1996, 18:10-16.
- [15] Brinson M. M. Developing an approach for assessing the functions of wetlands. //In: Mitsch WJ eds. *Global Wet. Land: Old World and New*. Amsterdam: Elsevier. 1994. 615-62.
- [16] Brinson M. M., Malvarez A. I. Temperate Freshwater Wetlands: Types, Status, and Threats. *Environ Conserv*, 2002, 29(2): 115-133.
- [17] Brooks R. T. Potential impacts of global climate change on the hydrology and ecology of ephemeral freshwater systems of the forests of the northeastern United States. *Climatic Change*, 2009, 95( 3 /4 ) : 469-483.
- [18] Bruce D., Cook P., Bolstad V., et al. Using LiDAR and quickbird data to model plant production

- and quantity uncertainties associated with wetland detection and land cover generalizations. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 113(2009):2366-2379.
- [19] Burkett V., Kusler J. Climate change: Potential impacts and interactions in wetlands of the United States, Virginia. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 313-320.
- [20] Chow-Fraser P., Loughheed V., Le Thiec V., Crosbie B., Simser L., Lord J. Long-term response of the biotic community to fluctuating water levels and changes in water quality in Cootes Paradise Marsh, a degraded coastal wetland of Lake Ontario. *Wetlands Ecology and Management*, 1998, 6(1) : 19-42.
- [21] Ciurli A., Zuccarini P., Alpi A. Growth and nutrient absorption of two submerged aquatic macrophytes in mesocosms, for reinsertion in a eutrophicated shallow lake. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, 17( 2) : 107-115.
- [22] Clément B., Aidoud A. Report of the integrated project to evaluate the impacts of global change on European freshwater ecosystems: Hypotheses of changes in palustrian plant communities under climate change. European Commission Sixth framework Programme, 2007.
- [23] Croft M. V., Chow Fraser P. Use and Development of the Wetland macrophyte Index to Detect Water Quality Impairment in Fish Habitat of Great Lakes Coastal Marshes. *Journal of Great Lakes Restoration*, 2007, 33 (S3): 172 -197.
- [24] Dall'O' M., Kluge W., Bartels F. FEUWAnet: a multi-box water level and lateral exchange model for riparian wetlands. *Journal of Hydrology*, 2001, 250(1/4) : 40-62.
- [25] Davis J A., Froend R. Loss and degradation of wetlands in southwestern Australia: Underlying causes, consequences and solutions. *Wetlands Ecology and Management*, 1999, 7(1/2): 13-23.
- [26] Dinka M., Ágoston-Szabó E., Urbanc-Berčič O., Germ M., Šraj-Kržič N., Gabersčik A. Reed stand conditions at selected wetlands in Slovenia and Hungary // Vymazal J, eds. *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*. Berlin: Springer, 2008: 1-12.
- [27] Eldridge D. J., Lunt I. D. Resilience of soil seed banks to site degradation in intermittently flooded riverine woodlands. *Journal of Vegetation Science*, 2010, 21(1) : 157-166.
- [28] Erwin K. L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, 17(1): 71-84.

- [29] EU, 2007. LIFE and Europe's Wetlands. Restoring a Vital Ecosystem. European Commission, Environment Directorate-General, Brussels, 1-65.
- [30] Faulwetter J. L, Gagnon V, Sundberg C, et al. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review Review Article. *Ecol. Eng.*, 2009, 35(6): 987-1004.
- [31] Fediuc E., Erdei L. Physiological and biochemical aspects of cadmium toxicity and protective mechanisms induced in *Phragmites australis* and *Typha latifolia*. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159( 3) : 265-271.
- [32] Fink D. F., Mitsch W J. Hydrology and nutrient biogeochemistry in a created river diversion oxbow wetland. *Ecological Engineering*, 2007, 30(2) : 93-102.
- [33] Fortin D., Goulet R., Roy M. Seasonal Cycling of Fe and S in a Constructed Wetland: The Role of Sulfate-Reducing Bacteria. *Geomicrobiology Journal*, 2010, 17: 221-235.
- [34] Getachew M., A. Ambelu, S. Tikku, W. Legesse, A. Adugna, H. Kloos. Ecological assessment of Cheffa Wetland in the Borkena Valley, northeast Ethiopia: Macroinvertebrate and bird communities. *Ecological Indicators*, 2012, 15: 63-71.
- [35] Gong P, Niu Z G, Cheng X, et al. China's wetland change (1990–2000) determined by remote sensing. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 1036-1042.
- [36] Gutknecht J. L. M., Goodman R. M., Balser T. C. Linking Soil Process and Microbial Ecology in Freshwater Wetland Ecosystems. *Plan Soil*, 2009, 289: 17-34.
- [37] Hammouda O., Gaber A., Abdel-Raouf N. Microalgae and wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1995, 31: 205-210.
- [38] Hargeby A., Andersson G., Blindow I., et al. 1994. Trophic web structure in a shallow eutrophic lake during a dominance shift from phytoplankton to submerged macrophytes. *Hydrobiologia*, 280: 83-90.
- [39] Hargiss C. L. M., DeKeyser E. S., Kirby D. R., Ell M. J. Regional assessment of wetland plant communities using the index of plant community integrity. *Ecological Indicators*, 2008, 8(3): 303-307.
- [40] Hart E A., Lovvorn J. R. Vegetation dynamics and primary production in saline, lacustrine wetlands of a Rocky Mountain basin. *Aquatic Botany*, 2000, 66(1):21-39.
- [41] Hilt S., Gross E. M., Hupfer M., Morscheid H., M hlmann J., Melzer A., Poltz J., Sandrock S.,

- Scharf E M, Schneider S., van de Weyer K. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes a guideline and state of the art in Germany. *Limnologica*, 2006, 36 (3): 155-171.
- [42] Holling C.S., Meffe G.K. Command and control and the pathology of natural resource management. *Conservation Biology*, 1996, 10, 328–337.
- [43] Hongo H., Masikini M. Impact of immigrant pastoral herds to fringing wetlands of lake Victoria in Magu district Mwanza region, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28( 20 /27): 1001-1007.
- [44] Horn H. S. The ecology of secondary successions. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1974, 5: 25-37.
- [45] Hunt R. J., Strand M., Walker J F. Measuring groundwater-surface water interaction and its effect on wetland stream benthic productivity, Trout Lake watershed, northern Wisconsin, USA. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(3/4): 370-384.
- [46] Inglett P. W., D' Angelo E. M., Reddy K. R., McCormick P.V., Hagerthey S. E. Periphyton nitrogenase activity as an indicator of wetland eutrophication: spatial patterns and response to phosphorus dosing in a northern Everglades ecosystem. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, 17(2) : 131-144.
- [47] IPCC. *Climate change 2007: Physical science basis contribution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [48] Johnston C. A., Bedford B. L., Bourdaghs M., Brown T., Frieswyk C., Tulbure M., Vaccaro L., Zedler J B. Plant species indicators of physical environment in Great Lakes coastal wetlands. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, 33( S3) : 106-124.
- [49] Jones T. A., Hughes J. M. R. *Wetland Inventories and Wetland Loss Studies: A European Perspective*. In M Moser, RC Prentice. J Van Vesseem (eds). *Waterfowl and Wetland Conservation in the 1990's: A Global Perspective*, Proceedings of the IWRB Symposium Florida. 1992.
- [50] Kashaigili J. J. Impacts of land-use and land-cover changes on flow regimes of the Usangu wetland and the Great Rua-ha river, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2008, 33(2008): 640-647.
- [51] Kassenga G. R. A descriptive assessment of the wetlands of the Lake Victoria basin in Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling*, 1997, 20(2):127-141.
- [52] Keever C. Causes of succession on old fields of Piedmont, North Carolina. *Ecol. Monogr*, 1950,

20: 229-250.

- [53] Keith J. O. Insecticide contaminations in wetland habitats and their effects on fish-eating birds. *Journal of Applied Ecology*, 1966, 3:71-85.
- [54] Khaznadar M., Vogiatzakis I. N., Griffiths G. H. Land degradation and vegetation distribution in Chott El Beida wetland, Algeria. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73( 3) : 369-377.
- [55] King R. S., Brazner J. C. Coastal wetland insect communities along a trophic gradient in Green bay, Lake Michigan. *Wetlands*, 1999, 19( 2) :426-437.
- [56] Klimkowska A., Bekker R. M., van Diggelen R., Kotowski W. Species trait shifts in vegetation and soil seed bank during fen degradation. *Plant Ecology*, 2010, 206( 1) : 59-82.
- [57] Kowalski K. P., Wilcox D. A., Wiley M. J. Stimulating a Great Lakes coastal wetland seed bank using portable cofferdams: implications for habitat rehabilitation. *Journal of Great Lakes Research*, 2009, 35( 2) : 206-214.
- [58] Lahmer W., Pftzner B., Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth: Part B: Hydrology Oceans and Atmosphere*, 2001, 26(7/8) : 565-575.
- [59] Lake P S., Bond N., Reich P. Linking ecological theory with stream restoration. *Freshwater Biology*, 2007, 52(4) : 597-615.
- [60] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123( 1/2) : 1-22.
- [61] Lang J. T. Conservation of the environment in Ireland. *Studies: An Irish Quarterly Review*, 1970, 59( 235) :279-300.
- [62] Le Mer J., Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37 (1): 25-50.
- [63] Lebel, L., Anderies, J.M., Cambell, B., Folke, C., Hatfield-Dodds, S., Hughes, T.P., Wilson, J. Governance and the capacity to manage resilience in regional social–ecological systems. *Ecology and Society*, 2006, 11 (1), 19.
- [64] Lin Y. F., Jing S. R., Lee D. Y., et al. Nitrate removal from groundwater using constructed wetlands under various hydraulic loading rates. *Bioresource Technol.*, 2008, 99(16): 7504-7513.
- [65] Litaor M I, Eshel G, Sade R, Rimmer A, Shenker M. Hydrogeological characterization of an altered wetland. *Journal of Hydrology*, 2008, 349( 3/4) : 333-349.



- [66] Liu H J., Tian Y., Zheng T L., Yan C L., Hong H S. Studies of glucosidase activities from surface sediments in mangrove swamp. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 367( 2) : 111-117.
- [67] Loughheed V. L., Chow Fraser P. Development and Use of a Zooplankton Index of Wetland Quality in the Laurentian Great Lakes Basin. *Ecological Applications*, 2002, 12 (2): 474-486.
- [68] Lund M., Lindroth A., Christensen T R., Ström L. Annual CO<sub>2</sub> balance of a temperate bog. *Tellus B*, 2007, 59( 5) : 804-811.
- [69] Mälson K., Rydin H. The regeneration capabilities of bryophytes for rich fen restoration. *Biological Conservation*, 2007, 135(3) : 435-442.
- [70] Maltby E. 1986. *Waterlogged Wealth: Why Waste the World's Wet Places?* London: International Institute for Environment and Development.
- [71] Marklund O., Sandsten H., Hansson L., et al. Effects of waterfowl and fish on submerged vegetation and macroinvertebrates. *Freshwater Biology*, 2002, 47, 2049-2059.
- [72] Mcgarigal K., Tagil S., Cushman A., et al. Surface metrics: An alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecology*, 2009, 24: 433- 450.
- [73] Megonigal J. P., Neubauer S. C. Biogeochemistry of tidal freshwater wetlands // Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D. R., Brinson M. M., eds. *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 535-562.
- [74] Micacchion M. Amphibian Index of Biotic Integrity (AmphIBI) for Wetlands. Final Report to US EPA Grant No. CD985875-01. Columbus: Wetland Ecology Group, Division of Surface Water, 2002.
- [75] Mikołaj Piniewski, Lars Gottschalk, Irina Krasovskaia, Jarosław Chormański. A GIS-based model for testing effects of restoration measures in wetlands: A case study in the Kampinos National Park, Poland. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 25–35.
- [76] Mitchell E A D., Buttler A., Grosvernier P., Rydin H., Siegenthaler A., Gobat J M. Contrasted effects of increased N and CO<sub>2</sub> supply on two keystone species in peatland restoration and implications for global change. *Journal of Ecology*, 2002, 90( 3) : 529-533.
- [77] Mitsch W J., Zhang L., Fink D F., Hernandez M E., Altor A E., Tuttle C L., Nahlik A M. Ecological engineering of floodplains. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2008, 8(2/4) : 139-147.

- [78] Mitsch W. J., Day J W Jr. Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri (MOM) River Basin: experience and needed research. *Ecological Engineering*, 2006, 26(1) : 55-69.
- [79] Molle F. Nirvana concepts, narratives and policy models: insights from the water sector. *Water Alternatives*, 2008, 1 (1):131-156.
- [80] Moore T., Basiliko N. Decomposition in boreal peatlands// Wieder R. K.Vitt D H, eds. *Boreal Peatland Ecosystems*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 125-143.
- [81] Niedermeier A., Robinson J S. Hydrological controls on soil redox dynamics in a peat-based, restored wetland. *Geoderma*, 2007,137( 3/4) : 318-326.
- [82] Niu Z. G., Gong P., Cheng X., et al. Geographical characteristics of China's wetlands derived from remotely sensed data. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52: 723-738.
- [83] Noe G. B., Scinto L. J., Taylor J., Childers D. L., Jones R. D. Phosphorus cycling and partitioning in an oligotrophic Everglades wetland ecosystem: a radioisotope tracing study. *Freshwater Biology*, 2003, 48( 11) : 1993-2008.
- [84] Noson A C., Hutto R L. Using Bird Indices of Biotic Integrity to Assess the Condition of Wetlands in Montana. Final Report. Prepared for: DEQ Contract No 203100. Montana Department of Environmental Quality, US Environmental Protection Agency, 2005.
- [85] Oehl F, Frossard E, Fliessbach A, et al. Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, 36(4): 667-675.
- [86] Opsahl S P. Organic carbon composition and oxygen metabolism across a gradient of seasonally inundated limesink and riparian wetlands in the southeast Coastal Plain, USA. *Biogeochemistry*, 2005, 76( 1) : 47-68.
- [87] Ostrovskaya, E. et al., Capacity for sustainable management of wetlands: Lessons from the WETwin project, *Environ. Sci. Policy*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2012.08.006>.
- [88] Owino A O., Ryan P G. Recent papyrus swamp habitat loss and conservation implications in western Kenya. *Wetlands Ecology and Management*, 2007, 15(1):1-12.
- [89] Paerl H W., Valdes L M., Pinckney J L., Piehler M F., Dyble J., Moisander P H. Phytoplankton photopigments as indicators of estuarine and coastal eutrophication. *BioScience*, 2003, 53(10): 953-964.
- [90] Piccka T., Hana C., Duseka J. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-Plants as

- important sources of carbon. *Ecological engineering*, 2007, 31: 98-106.
- [91] Pojasek R. How to protect drinking water sources. *Environmental Science and Technology*, 1977, 11( 4) : 342-347.
- [92] Porporato A., Odorico P. D., Laio F., et al. Eco-hydrology of water controlled ecosystems. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 1335-1348.
- [93] Ramsar Handbook 1, 2007. Wise Use of Wetland. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.
- [94] Rapport D. J. *Ecosystem Health*. Oxford: Blackwell Science, 1989, 1-356.
- [95] Rapport D. J. What constitutes ecosystem health? *Perspect Bio. Med.*, 1989, 33(2): 120-132.
- [96] Reddy K R., Kadlec R H., Flaig E., Gale P M. Phosphorus retention in streams and wetlands: a review. *Environmental Science and Technology*, 1999, 29(1): 83-146.
- [97] Richardson C J., King R S., Qian S S., Vaithyanathan P., Qualls R G., Stow C A. Estimating ecological thresholds for phosphorus in the Everglades. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(23): 8084-8091.
- [98] Robertson H A., James K R. Plant establishment from the seed bank of a degraded floodplain wetland: a comparison of two alternative management scenarios. *Plant Ecology*, 2007, 188(2): 145-164.
- [99] Rokosch A. E., Bouchard V., Fennessy S., Dick R. The use of soil parameters as indicators of quality in forested depressional wetlands. *Wetlands*, 2009, 29(2): 666-677.
- [100] Schaeffer D. J., Herricks E. E., Kerster H. W. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, 12(4): 445-455.
- [101] Schipper A. M., Wijnhoven S., Leuven R S E W., Ragas A M J., Hendriks A J. Spatial distribution and internal metal concentrations of terrestrial arthropods in a moderately contaminated lowland floodplain along the Rhine River. *Environmental Pollution*, 2008, 151(1): 17-26.
- [102] Schwerdtfeger J., Johnson M S., Weiler M., Couto E G. Isotopic estimation of water balance and groundwater-surface water interactions of tropical wetland lakes in the Pantanal, Brazil. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2009.
- [103] Scott D. A. Wetland Inventories and the Assessment of Wetland Loss: A Global Overview. In M

- Moser, R C Prentice, J Van Vesseem (eds). Waterfowl and Wetland Conservation in the 1990' s: A Global Perspective, proceedings of the IWRB Symposium Florida. 1992.
- [104] Seilheimer T S., Mahoney T P., Chow-Fraser P. Comparative study (of ecological indices for assessing human-induced disturbance in coastal wetlands of the Laurentian Great Lakes. *Ecological Indicators*, 2009, 9(1): 81-91.
- [105] Seilheimer T. S., Chow Fraser P. Application of the Wetland Fish Index to Northern Great Lakes Marshes with Emphasis on Georgian Bay Coastal Wetlands. *Journal of Great Lakes Restoration*, 2007, 33 (S3) :154 -171.
- [106] Shanmugam P., Ahn Y. H., Sanjeevi S. A comparison of the classification of wetland characteristics by linear spectral mixture modelling and traditional hard classifiers on multispectral remotely sensed imagery in southern India. *Ecological Modelling*, 2006, 194 (4): 379 -394.
- [107] Sharma R. C., Rawat J. S. Monitoring of aquatic macroinvertebrates as bioindicator for assessing the health of wetlands: A case study in the Central Himalayas, India. *Ecological Indicators*, 2009, 9: 118-128.
- [108] Shaw S. P., Fredine C. G. Wetlands of the United States: their extent and their value to waterfowl and other wildlife. Springfield: National Technical Information Service, 1956.
- [109] Sigua G. C., Griffin J., Kang W. J., Coleman S W. Wetland conversion to beef cattle pasture: changes in soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 2004, 4(1): 4-10.
- [110] Sims, A., Y. Zhang, S. Gajaraj, P. B. Brown & Z. Hu. Toward the development of microbial indicators for wetland assessment. *Water research*, 2013, 47(5):1711-25  
doi:10.1016/j.watres.2013.01.023.
- [111] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 52-67.
- [112] Sovikak Kloveb. Emission of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from a constructed wetland in southeastern Norway. *Science of the Total Environment*, 2007, 380: 28-37.
- [113] Spencer C., Robertson A I., Curtis A. Development and testing of a rapid appraisal wetland condition index in south-eastern Australia. *Journal of Environmental Management*, 1998, 54( 2) : 143-159.

- [114] Tam N. F. Y., Guo C. L., Yau W. Y., Wong Y. S. Preliminary study on biodegradation of phenanthrene by bacteria isolated from mangrove sediments in Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45(1/2) : 316-324.
- [115] Tanner C. C. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. *Water Science and Technology*, 2001, 44(11/12) : 9-17.
- [116] Tockner, K., Push, M., Borchardt, D., Lorang, M.S. Multiple stressors in coupled river-floodplain ecosystems. *Freshwater Biology*, 2010, 55 (1), 135–151.
- [117] Turner R.K., van den Bergh, J.C.J.M., Soderqvist, T., Barendregt, A., van der Straaten, A., Maltby, E., van Ierland, E.C. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. *Ecological Economics*, 2007, 35 (2007), 7–23.
- [118] U S EPA. Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habit. Washington BC: U S EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watershed. 2000.
- [119] U S National Research Council. Restoration of Aquata Ecosystems. Nat Acad Press, Washington D C, 1992.
- [120] United States Environmental Protection Agency & Environment Canada.2000. Selection of Indicators for Great Lakes Basin Ecosystem Health. State of the Lakes Ecosystem Conference. Chicago, USA.
- [121] US National Research Council. Restoration of Aquatic Ecosystems. Washington DC. Nat Acad Press, 1992.
- [122] Van Dijk J., Didden W.A. M., Kuenen F., et al. Can Difference in Soil Community Composition after Peat Meadow Restoration Lead to Decomposition and Mineralization Rate. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1717-1725.
- [123] Verhoeven J.T.A. Wetlands in Europe: Perspectives for restoration of a lost paradise. *Ecol. Eng.*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.03.006>.
- [124] Warren F. J., Waddington J M., Bourbonniere R A, Day S M. Effect of drought on hydrology and sulphate dynamics in a temperate swamp. *Hydrological Processes*, 2001, 15( 16) : 3133-3150.
- [125] Wei Yao, Min Han, Shiguo Xu. Estimating the regional evapotranspiration in Zhalong wetland with the two-source energy balance (TSEB) model and Landsat7/ETM Images. *Ecological*

- Informatics, 2010, 5: 348-358.
- [126] Whigham D. F. Ecological issues related to wetland preservation, restoration, creation and assessment. *The Science of the Total Environment*, 1999, 240: 31-40.
- [127] White D., Fennessy S. Modeling the suitability of wetland restoration potential at the watershed scale. *Ecological Engineering*, 2005, 24 (4): 359- 377.
- [128] Williams L., Reich P., Capon S J., Raulings E. Soil seed banks of degraded riparian zones in southeastern Australia and their potential contribution to the restoration of understorey vegetation. *River Research and Applications*, 2008, 24(7): 1002-1017.
- [129] Wilson R. F., Mitsch W J. Functional Assessment of Five Wetlands Constructed to Mitigate Wetland Loss in Ohio, USA. *Wetlands*, 1996, 16 (4): 436-451.
- [130] Wolski P., Murray-Hudson M. 'Alternative futures' of the Okavango Delta simulated by a suite of global climate and hydro-ecological models. *Water SA*, 2008, 34(5): 605-610.
- [131] Woo M. K., Young K. L. Hydrogeomorphology of patchy wetlands in the high Arctic, polar desert environment. *Wetlands*, 2003, 23(2): 291-309.
- [132] Wright A. L., Reddy K. R., Corstanje R. Patterns of Heterotrophic Bacterial Activity in Eutrophic and Oligotrophic Peatlands. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45: 131-137.
- [133] Wu H, Zhang J, Li P, et al. Nutrient removal in constructed microcosm wetlands for treating polluted river water in northern China. *Ecol. Eng.*, 2011, 37(4): 560-568.
- [134] Xu F. L, Dawson R W, Tao S. A method for lake ecosystem health assessment: an ecological modeling method and its application. *Hydrobiologica*, 2001, 443: 159-175.
- [135] Xu F. L, Lam K. C, Zhao Z. Y. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecological Modeling*, 2004, 173: 355-370.
- [136] Zhang Fa-wei, Liu An-hua, Li Ling-nian, et al. CO<sub>2</sub> Flux in Alpine Wetland Ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (2): 453-462.
- [137] Zhi Wei, Ji Guodong. Constructed wetlands, 1991-2011: A review of research development, current trends, and future directions. *Science of the Total Environment*, 2012, 441, 19-27.
- [138] Zhou H. W., Luan T. G., Zou F., Tam N. F. Y. Different bacterial groups for biodegradation of three-and four-ring PAHs isolated from a Hong Kong mangrove sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(3): 1179-1185.

- [139] Zhu H., Qin P. Functional group classification and target species selection for Yancheng Nature Reserve, China. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13 (7): 1335-1353.
- [140] Zomer R. J., Trabucco A., Ustin S. L. Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90 (7): 2170- 2177.
- [141] 安娜, 高乃云, 刘长娥. 中国湿地的退化原因、评价及保护. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 821-828.
- [142] 白红军, 欧阳华, 邓伟, 等. 湿地氮素传输过程研究进展. *生态学报*, 2008, 25 ( 2) : 326-333.
- [143] 白秀玲, 谷孝鸿, 何俊. 太湖环棱螺 ( *Bellamya sp.* ) 及其与沉水植物的相互作用. *生态学报*, 2009, 29( 2) : 1032-1037.
- [144] 陈芳清, Hartman J M. 退化湿地生态系统的生态恢复与管理-以美国Hackensack湿地保护区为例. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 217-223.
- [145] 陈颖, 张明祥. 中国湿地退化状况评价指标体系研究. *林业资源管理*, 2012, 2:116-120.
- [146] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I . 理论. *生态学报*, 2002, 22(7) : 1005-1011.
- [147] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II .方法与案例. *生态学报*, 2002, 22(8) : 1231-1239.
- [148] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展. *生态学杂志*, 2001, 20 (3) : 31-36.
- [149] 崔丽娟, 张明祥. 湿地评价研究概述. *世界林业研究*, 2002, 15( 6) : 46-53.
- [150] 崔丽娟, 赵欣胜, 张岩, 等. 退化湿地生态系统恢复的相关理论问题. *世界林业研究*, 2011, 24(2): 1-4.
- [151] 邓伟, 栾兆擎, 胡金明, 等. 三江平原典型沼泽湿地生态系统水分通量研究. *湿地科学*, 2005, 3(1): 33-36.
- [152] 邓伟, 潘响亮, 栾兆擎. 湿地水文学研究进展. *水科学进展*, 2003, 14( 4) : 521-527.
- [153] 董李勤, 章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述. *水科学进展*, 2011, 22(3):429-436.
- [154] 杜刚, 黄磊, 高旭, 等. 人工湿地中微生物数量与污染物去除的关系. *湿地科学*, 2013, 11(1): 13-20.
- [155] 范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水-地下水交互作用的研究综述. *地球科学进展*, 2012,

- 27(4): 413-423.
- [156] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展. 地理研究, 2001, 20(1): 120-128.
- [157] 高士武, 李伟, 张曼胤, 王义飞, 商晓静. 湿地退化评价研究进展. 世界林业研究, 2008, 21(6): 13-18.
- [158] 宫少军, 叶思源, 詹华明, 乔吉果, 赵卫. 天津市滨海湿地生态系统健康研究进展. 海洋地质前沿, 2012, 28(7): 52-58.
- [159] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 湿地退化研究进展. 生态学报, 2012, 32(4): 1293-1307.
- [160] 韩仕群, 张振华. 国内外利用藻类技术处理废水、净化水体研究现状. 农业环境与发展, 2000, 63(1): 13-16.
- [161] 何少林, 黄翔峰, 乔丽, 等. 高效藻类塘氮磷去除机理的研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(8): 6-11.
- [162] 侯伟, 匡文慧, 张树文, 等. 近50年来三江平原北部土地利用/土地覆被变化及生态效应分析. 生态环境, 2006, 15(4): 752-756.
- [163] 侯伟, 张树文, 卜坤, 等. 三江平原浓江、别拉洪河地区湿地退缩过程及其成因. 地理研究, 2005, 24(4): 507-512.
- [164] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响. 环境科学, 2008, 29(5): 1380-1387.
- [165] 姜跃良, 王美敬, 李然, 等. 生态水力学原理在城市河流保护及修复中的应用. 水力学报, 2003, 8: 75-78.
- [166] 金相灿, 稻森悠平, 朴俊大, 等. 2007. 湖泊和湿地水环境生态修复技术与管理指南. 北京: 科学出版社.
- [167] 孔凡亭, 郗敏, 李悦, 孔范龙, 陈苑. 基于RS和GIS技术的湿地景观格局变化研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(4): 941-946.
- [168] 李凤霞, 伏洋, 肖建设等. 长江源头湿地消长对气候变化的响应. 地理科学进展, 2011, 30(1): 49-55.
- [169] 李国栋, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型菜地土壤氮磷向水体径流输出与生态草带拦截控制. 生态学杂志, 2006, 25(8): 905-910.
- [170] 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等. 近10年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(3): 201-207.



- [171] 李宁云. 纳帕海湿地生态系统退化评价指标体系研究. 昆明: 西南林学院, 2006.
- [172] 李胜男, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 湿地水环境生态恢复及研究展望. 水生态学杂志, 2011, 32(2): 1-5.
- [173] 李小霞, 解庆林. 菌藻共生系统处理污水的研究及应用前景. 广西民族学院学报: 自然科学版, 2006, 12(3): 112-117.
- [174] 梁素娟, 史秀华, 曾玉, 张信文. 湿地退化监测体系的构建. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 22(1): 73-77.
- [175] 刘红玉, 李兆富. 挠力河流域湿地景观演变的累积效应. 地理研究, 2006, 25(4): 606-616.
- [176] 刘景双. 湿地生物地球化学研究. 湿地科学, 2005, 3(4): 302-309.
- [177] 刘平, 关蕾, 吕偲, 等. 中国第二次湿地资源调查的技术特点和成果应用前景, 湿地科学, 2011, 9(3): 284-289.
- [178] 刘影, 彭薇. 鄱阳湖湿地生态系统退化的社会经济驱动力分析. 江西社会科学, 2003(10): 231-233.
- [179] 吕宪国, 刘晓辉. 中国湿地研究进展-献给中国科学院东北地理与农业生态研究所建所 50 周年. 地理科学, 2008, 28(3): 301-308.
- [180] 马沛明, 况琪军, 凌晓欢, 等. 2007. 藻类生物膜技术脱氮除磷效果研究. 环境科学, 28(4): 742-746.
- [181] 马蕊, 林英, 牛翠娟. 淡水水域富营养化及其治理. 生物学通报, 2003, 38(11): 5-9.
- [182] 马瑞俊, 蒋志刚. 青海湖流域环境退化对野生陆生脊椎动物的影响. 生态学报, 2006, 26(9): 3066-3073.
- [183] 孟向东, 张平究, 李泽熙. 生态恢复下湿地土壤微生物研究进展. 云南地理环境研究, 2011, 23(4): 101-105.
- [184] 牛振国, 宫鹏, 程晓, 等. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析. 中国科学 (D辑: 地球科学), 2009, 39(2): 188-203.
- [185] 彭少麟. 退化生态系统恢复与恢复生态学. 中国基础科学, 2001,(3):18-24.
- [186] 气候变化国家评估报告编委会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.
- [187] 钦佩. 2006. 海滨湿地生态系统的热点研究. 湿地科学与管理, 2(1): 7-11.
- [188] 秦峰, 李玉梅, 杨小华. 2001~2010年我国湿地恢复研究的文献计量学分析. 安徽农业科学, 2013, 41(2): 904-906.

- [189] 尚士友, 杜健民, 李旭英, 申庆泰, 王丽敏. 草型富营养化湖泊生态恢复工程技术的研究-内蒙古乌梁素海生态恢复工程试验研究. 生态学杂志, 2003, 22( 6) : 57-62.
- [190] 沈佳, 纪桂琴, 许文, 等. 沉水植物菹草在低温条件下对重金属 Cu、Pb、Zn 的吸附和富集. 植物研究, 2009, 29( 5) :585-591.
- [191] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展. 地理科学, 2003, 23( 5) : 622-628.
- [192] 田昆, 莫剑锋, 陆梅, 等. 人为活动干扰对纳帕海湿地环境影响的研究. 长江流域资源与环境, 2004, 13 ( 3) :292- 295.
- [193] 万力, 曹文炳, 胡伏生,等. 生态水文学与生态水文地质学. 地质通报, 2005, 24( 8) : 700-703.
- [194] 王昌海, 崔丽娟, 毛旭峰. 湿地退化的人为影响因素分析-基于时间序列数据和截面数据的实证分析. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1677-1687.
- [195] 王笛, 马风云, 姚秀粉, 等. 黄河三角洲退化湿地土壤养分、微生物与土壤酶特性及其关系分析. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 94-98.
- [196] 王芳. 湿地缺水问题的研究展望. 湿地科学与管理, 2006, 2(1): 12-17.
- [197] 王浩, 严登华, 贾仰文, 等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题. 水科学进展, 2010, 21(4) : 479-489.
- [198] 王珺, 裴元生, 杨志峰. 营养盐对白洋淀草型富营养化的驱动与限制. 中国环境科学, 2010, 30( Z1) : 7-13.
- [199] 王平, 盛连喜, 燕红. 植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能. 生态学报, 2010, 30 ( 24) : 6990-7000.
- [200] 王升忠. 松嫩平原芦苇湿地洪水年份磷素水文地球化学迁移. 东北师大学报: 自然科学版, 2005, 37( 3) : 95-98.
- [201] 王育礼, 王烜, 孙涛. 湿地生态水文模型研究进展. 生态学杂志, 2008, 27( 10) : 1753-1762.
- [202] 吴涛, 赵冬至, 康建成. 流域-河口三角洲湿地生态系统健康评价研究进展. 海洋环境科学, 2010, 29( 2) : 286-292.
- [203] 吴向培, 田俊量, 王建荣. 青海湖景区草地与湿地现状及其保护对策. 青海环境, 2003, 13 ( 1) : 35-38.
- [204] 伍卡兰, 曹启民, 陈桂珠. 汕头红树林湿地沉积物多环芳烃垂直分布特征. 生态学杂志, 2009, 28( 12) : 2553-2560.

- [205] 熊红, 刘永碧. 植物引种与生物入侵. 自然杂志, 2003, 25(6): 351-354.
- [206] 徐艳艳, 徐艳东. 国内外湿地研究进展和展望. 河北渔业, 2008, 169 ( 1 ) : 3-7.
- [207] 许辉熙, 何政伟, 但尚铭, 等. 基于EOS/MODIS 的若尔盖高原湿地定量遥感研究. 冰川冻土, 2007, 29 ( 3 ) :450- 456.
- [208] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 生态水文学研究进展. 地理科学, 2001, 21( 5 ) : 467-473.
- [209] 杨文斌, 王国祥. 南京玄武湖范草种群的环境效应. 湖泊科学, 2007, 19( 5 ) : 572-576.
- [210] 杨永兴, 杨杨, 刘长娥. 湿地与湿地科学基本理论问题与湿地生态系统的生态、环境功能. 景观设计学, 2009, 3: 14-17.
- [211] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. 地理科学进展, 2002, 21 ( 2 ) : 111-120.
- [212] 姚勤农. 海河流域水资源和水生态环境问题刍议. 海河水利, 2003, 6:26-30.
- [213] 尹连庆, 韩忠阁, 龙源. 衡水湖湿地生态系统健康评价. 环境科学与管理, 2009, 34(11): 136-140.
- [214] 雍国玮, 石承苍, 邱鹏飞. 川西北高原若尔盖草地沙化及湿地萎缩动态遥感监测. 山地学报, 2003, 21 ( 6 ) :758-762.
- [215] 余其芬, 牛振国, 郑姚闽. 基于MODIS数据的湿地退化监测方法研究-以扎龙湿地为例. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37(3):6-12.
- [216] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径. 水资源保护, 2010, 26( 3 ) : 87-90.
- [217] 张建云, 王国庆, 杨扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究. 气候变化研究进展, 2008, 4( 5 ) : 290-295.
- [218] 张建云. 气候变化对水的影响研究及其科学问题. 中国水利, 2008( 2 ) : 14-18.
- [219] 张剑锋, 邢尚军, 樊宝敏, 等. 黄河三角洲植被群落和土壤酶活性对湿地退化的响应. 水土保持通报, 2009, 29(4): 1-6.
- [220] 张昆, 吕宪国, 田昆. 纳帕海高原湿地土壤有机质对水分梯度变化的响应. 云南大学学报: 自然科学版, 2008, 30 ( 4 ) : 424- 427.
- [221] 张强, 马友鑫, 刘文俊. 滇西北高原湿地区土地利用变化特征. 山地学报, 2007, 25 ( 3 ) : 265-273.
- [222] 张晓龙, 李培英. 湿地退化标准的探讨. 湿地科学, 2004, 2(1) : 36-41.
- [223] 张晓龙, 李萍, 刘乐军, 李培英. 现代黄河三角洲滨海湿地退化评价. 海洋通报, 2010, 29( 6 ) : 685-689.

- [224] 张祖陆, 辛良杰, 梁春玲. 近50年来南四湖湿地水文特征及其生态系统的演化过程分析. 地理研究, 2007, 26(5) : 957-966.
- [225] 章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题. 湿地科学, 2008, 6( 2) : 106-115.
- [226] 章家恩, 徐琪. 现代生态学研究的几大热点问题透视. 地理科学进展, 1997, 16(3): 29-37.
- [227] 郑春雨, 王光华. 湿地生态系统中主要功能微生物研究进展. 湿地科学, 2012, 10(2): 243-249.
- [228] 周进, Hisako Tachibana. 受损湿地植被的恢复与重建研究进展. 植物生态学报, 2001, 25 ( 5) : 561-572.
- [229] 朱晓丽. 浅析河道治理与水环境保护. 浙江水利科技, 2005, 2: 47-48.