

Research Progress on Ecological Impact Assessment about Water Cycle Change

Qiuxia Zhang, Fang Wang*

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing
Email: wangf_iwahr@163.com

Received: Mar. 1st, 2014; revised: Apr. 1st, 2014; accepted: Apr. 7th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Freshwater cycle is the major environmental factor for four ecosystems including slope vegetation, river, lake or wetland and estuary in watershed scale. Variation of hydrological cycle will affect each ecosystem to different extent. By analyzing ecosystem's process, structure and function, the impact assessment research both at home and abroad for how hydrological cycle affect ecosystem was summarized in this article. The article also indicated that in China more and more extensive water resources' development by the government has changed hydrological cycle obviously and future economic development needs both water resources and healthy ecosystem. They will make the study on ecological impacting assessment caused by hydrological cycle variation in watershed become more desired. The main problems were summarized as follow: a) There is a lack of original biological information; b) Processes between hydrology and ecology in aquatic ecosystem are not clear enough; c) Influences of artificial controlling for ecosystem restoration are ignored. The main suggested methods are to construct ecological basis in different area based on limited ecological monitoring station, enhance research on eco-hydrological process and take dynamic assessment for different ecosystems.

Keywords

Ecological Impact Assessment, Hydrological Cycling in Watershed, Hydrological and Ecological Process, Ecosystem Health, Ecosystem Function

*通讯作者。

水循环改变的生态影响评价研究进展

张秋霞, 王芳*

中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京

Email: wangf_iwhr@163.com

收稿日期: 2014年3月1日; 修回日期: 2014年4月1日; 录用日期: 2014年4月7日

摘要

淡水循环是流域尺度内坡面植被、河流、湖沼湿地以及河口近岸海域四大类生态系统的重要环境因子, 改变水循环会不同程度地影响流域内各类生态系统。本文从生态系统过程、结构和功能三方面梳理了国内外有关水循环改变生态系统的影响评价工作; 指出我国水资源开发力度大使流域水循环显著改变, 以及未来发展对水资源与健康生态的双重需要, 将会使围绕流域水循环的生态影响评价有更广泛的需求。目前存在的主要问题是生物本底信息缺乏、生态水文过程不清晰、生态恢复工程人为调控因素被忽略, 需要基于生态站有限的信息建立分区生态基准, 应加强各类生态系统生态水文过程的研究, 开展生态系统的动态影响评价。

关键词

生态影响评价, 流域水循环, 生态水文过程, 生态系统健康, 生态系统功能

1. 引言

随着人类活动对天然生态系统影响程度的增加, 开展生态影响评价工作已经成为资源开发、工程建设等领域的必备前提, 更是生态恢复工程的基础工作。早在 1925 年有研究将野生生物游憩的费用支出作为野生生物的经济价值[1]。到 1941 年, lepold 提出了土地健康的概念, 开始用“健康”表述生态系统的状态[2]。1970 年 Study of Critical Environmental Problems (SCEP)的报告[3]提出了生态系统服务功能(ecosystem services), 开始关注生态系统的功能变化。到 70 年代末, Karr 提出了生物完整性的概念[4], 用此表征复杂生态系统的结构; Schaeffer 等借鉴“土地健康”的概念, 提出了生态系统健康(Ecosystem health)[5]的概念; 到 90 年代, Daily 主编的《Nature's services: Societal dependence on natural ecosystem》[6]一书的出版和同年 Costanza 等人在《Nature》上“*The value of the world's ecosystem services and natural capital*” [7]一文的发表被公认为是生态系统服务功能研究领域的最高成就; 同时, 加拿大、澳大利亚、欧盟、国际科学联合会等许多国家和组织也开始关注生态系统健康与修复、生态影响评估工作[8]-[10]。2000 年由联合国秘书长发起, 各国政府通过四个国际公约授权, 同联合国各机构、公约、企业、非政府组织合作, 由多种利益方面组成理事会, 组织对地球生态系统健康评价的项目, 开展了全球生态系统评价[11]。至此, 对全球生态影响评估在生态系统过程、结构、功能等各个方面全面开展。21 世纪以来, 随着人类对生态环境问题的深入关注, 生态影响评价成为许多学者和专家研究的重点领域[12] [13]。

与流域水循环相互作用的生态系统包括坡面植被、河流、湖沼湿地以及河口近岸海域四大类生态系统, 本文从各类生态系统的生态水文过程、结构和功能三个方面综述了不同类型生态系统生态影响评价的研究进展; 并结合我国生态本底、水资源开发利用与水利工程建设情况, 分析我国生态影响评价中存

在的问题，展望了未来生态影响评价的发展需求。

2. 从生态水文过程认识生态影响机理的进展框架

与流域水循环相互作用的四大类生态系统中，每一类生态系统与水文过程都有着复杂的关系。

区域水文条件决定了植被生态系统的类型，植物群落盖度和类型的改变使得产汇流条件发生变化。对于局部地区的非地带植被系统来说，植物从生理上对水分变化有一系列的适应机制。该方向的研究始于 20 世纪初，主要集中在森林植被变化对流域产水量的影响，上世纪 60~70 年代在美国达到了顶峰，之后我国学者开展了大量的研究，到 20 世纪末形成基本一致的结论，即森林覆盖率增加，会不同程度地减少河川径流量，并坦化洪水过程，但由于局地情况的差异，有时会出现相反的结论。水土保持建设应用水平沟、鱼鳞坑等工程措施改变小流域水循环，以此改善人工林的水分条件，但也同时伴随着“土壤干化”的困扰，国内近 30 年为此开展了大量的研究，以此支撑我国水土保持工程的建设。国外在这个方面针对植被水分生理的研究较多，如 Robert 等[14]给出了日水分胁迫的计算方法及其与树木生长之间的关系；Thomas 等[15]采用微波遥感方法，对植被盖度与土壤水分含量之间的关系进行了分析；Colin 等[16]采用 0.5 m 分辨率的影像对美国西部草甸、草原、和针叶林等三种类型的 NDVI 指数与水分之间的关系进行了评价等。

水文过程是河流生态系统的决定性因素，从上世纪 60 年代开始，以美国、欧盟各国、澳大利亚为首开展河流生态研究，总体的认识是水文过程的流量大小、出现时间和频率、历史长短，对河流生态系统的维护都至关重要，要求水文过程具有沿河纵向的连续性、横向洪水脉冲与滨岸的连接以及垂向与含水层的连接。近年来对河流生物多样性的关注较多，如 Core 等[17]探讨了河流流速多样性与种群多样性之间的关系；Schmera 等[18]采用改进的 FAD 方法对两类淡水生物群落的物种丰富度与功能多样性进行了评价，认为与物种丰富度相比，功能多样性是更好更可靠的群落特征描述指标。国内近十年进行了大量的生态需水研究，从最初的河道形态法计算基流，到“十五”期间通过学习国外研究成果并根据我国水资源过度开发的特点，从河流各时期的需求，总结出河流生态需水过程划分为：维持河流生态系统生物基本生存条件的枯季基流，鱼类产卵期流量，汛期维护河道稳定的平滩流量，以及维护河漫滩生物栖息、营养物带入等整体生态功能的漫滩流量。近几年，根据河流的差异和河流生物特性，开展了大量有针对性的研究[19] [20]。

对于湖沼生态系统，生命周期中不同阶段需要不同的水文条件。Wang 等[21]采用 3 年的数据对美国伊利诺伊州四个结构相似的湿地生态系统磷的动态变化过程做了分析，指出产卵期水量不足会影响滩区产卵和河湖之间生物的洄游。对于干旱半干旱区的内陆湖泊，水量减少将影响到盐度，进而影响湖泊及周围生物的生存。王芳等对青海湖水平衡要素做了分析，并对湖泊水位变化与湖滨高盖度草甸及沼泽面积变化作了评估，结果显示随着湖水位的下降，湖滨带高盖度草和沼泽面积增加[22]；梁梨丽等[23]分析了鄂尔多斯遗鸥保护区湿地湖泊面积减少的原因，并评价了湿地事宜生态需水量和饲料地发展的适宜规模。

河口生态系统处于流域水循环的末端，环境要素复杂，生物多样性丰富，淡水入流是维持河口生态系统盐度和营养盐平衡的重要因素，盐度和营养盐维持着整个河口生态系统的稳定。河口生态水文过程的研究，多集中于河道径流变化对河口生态系统非生物过程(盐度、营养盐等物质运输)和生物(群落结构、群落数量等变化)过程的影响方面。早在 20 世纪 60、70 年代，许多学者就开始关注淡水入流减少引发的问题，Copeland[24]就曾指出，如果没有一定的淡水输入，河口盐度及其生物组成将会发生明显的变化。到 20 世纪 80、90 年代以来，淡水入流对河口生态系统影响的研究迅速发展，Jassby 等[25]通过大量数据的相关分析认为，San Francisco 海湾盐度梯度及生物群落分布与淡水输入关系密切；Ardissona[26]分析了 St.Lawrence 海湾西北海域淡水输入与生物特别是中高级营养层生物产量间的关系。在我国，在 20 世纪

80年代开始有对淡水入流量影响河口鱼类生长的研究[27]。到90年代以来,三峡工程和南水北调工程相继启动后,淡水入流改变对河口生态系统影响研究更加深入[28]。进入21世纪,采用比较成熟的生态需水模型开展河口生态需水研究成为关注的重点[29]。

3. 从生态系统结构评价生态影响的研究进展

生态系统的结构是生态系统生产者、消费者、分解者的组合,通常称为食物链。水生生态系统结构比较复杂,常形成复杂的食物网。对这样复杂的生态系统结构的表征一直是科学家们在探索的问题,直到1978年Karr提出了生物完整性的概念[4],将生物完整性看作是支撑和维持一个平衡的、完整的、自适应的生物系统的能力,该系统具有某一区域处于自然生境条件下所期望的物种组成、多样性、功能组织等结构。生物完整性概念可定量描述人类干扰与生物特性之间的关系。

在实际管理中,Schaeffer等借鉴20世纪40年代提出的“土地健康”概念,于1988年引入了生态系统健康(Ecosystem health)[5]概念。之后关于生态系统健康概念有许多,其中以澳大利亚为首的研究认为,健康的生态系统应该包括其对社会经济的贡献[30]。生态系统健康评价成为人类关注生态系统健康的主要方法。生态系统健康评价主要是评价其受到干扰后的恢复能力,包括完整性、适应性与效率等[31],反映了生态系统综合影响的结果。生态系统健康的评价结果反映了生态系统结构的状态。

在“生态系统健康”概念提出之后,相继涌现出多种“生态系统健康”的评价方法,由于生态系统类型和基础条件不同,采用的评价方法也多种多样。

3.1. 基于生物指示物种评价生态系统环境状况的研究进展

生物是生态系统中的结构的一部分,生物的耐污性、物种丰富度等指标反映了生态系统的环境状态。选取生物作为指示物种评价生态系统环境状况是生态系统结构评价的一个重要方面。根据生态系统特点,选取的主要指示物种包括藻类、无脊椎动物和鱼类等,评价对象主要集中在河流、湖沼等水生生态系统中。这类评价早在20世纪70年代就已经开展,Lange等[32]和Decry等[33]采用硅藻的耐污性作为评价水生生态系统水质健康状况的标准;到20世纪80、90年代达到评价的高潮期,Armitage等[34]介绍了采用无脊椎动物开展河流生态系统健康评价的研究;Karr[35]构建了物种丰富度、耐污性、营养类型、数量、杂交率等12项鱼类指标的生物完整性指数,用于评价河流生态系统的健康,这使得生态系统健康评价在单一指示物种评价的基础上取得了新的突破。在我国,80年代开始有研究采用大型底栖无脊椎动物也主要用于评价水生生态系统的水质状况[36]。采用藻类评价生态系统环境状况的研究主要集中在20世纪90年代以后,主要是利用藻类生物量、优势种、群落组成等指标开展河流、湖沼、近岸海域等生态系统污染状况的评价[37]。由于缺乏本底信息,采用鱼类作为指示物种开展生态系统环境评价的研究相对较少。

3.2. 基于生态系统特征评价生态系统健康的研究进展

生态系统的恢复力、活力等特征反映了生态系统结构的完整性与健康状况。而采用生态系统特征评价的对象范围较广,包含了森林、草地、农田等坡面植被生态系统和河流、湖沼等水生生态系统。在20世纪70年代,开始有研究关注生态系统特征与生态系统健康的关系,Westman[38]采用惯性与恢复力等生态系统状态响应指标评价生态系统的健康状况。到20世纪80、90年代,基于生态系统特征评价生态系统健康的研究进一步深入,Rapport等[39]在研究生态系统胁迫压力时提出了生态系统健康概念,指出生态系统健康主要研究生态、环境及人类可持续发展之间的相互关系;Costanza等[40]根据生态系统可持续能力的特征,提出了基于系统层次的生态系统健康指数,认为生态系统健康度量标准是生态系统活力、弹性和系统组织的加权平均值,完善了基于生态系统状态响应角度评价生态系统健康状况的评价方法。在我国,随着20世纪90年代末生态系统健康概念的引入[41]和人类对生态系统健康认识的提升,自21

世纪以来基于生态系统特征开展了大量不同生态系统类型健康评价的工作。肖凤劲等[42]采用生态系统活力、恢复力和组织结构指标评价了我国森林生态系统健康状况，并通过健康状况与生态系统特征指标的相关分析认为，抵抗力对生态系统健康影响最大，其次是如织结构，影响力最小的是活力；同时还有针对河口地区、湖泊等不同生态系统的健康评价研究[43] [44]。

3.3. 基于生物、环境、社会经济等综合因素评价生态系统健康的研究进展

随着生态系统健康评价的深入，到 20 世纪 90 年代以来，单一的生物指示物种或单纯的生态系统特征不再满足生态系统健康评价的综合要求，综合考虑生态系统生物指标、生态系统特征、社会经济指标、环境等因素的评价方法逐渐引起大家的关注，生态系统健康评价中考虑的因素更全面、评价的结果更科学。Aguilar 等[45]采用包括生产力、组织力和恢复力的生态系统特征指标和系统边缘与之密切相关的社会指标和经济指标，评价了哥斯达黎加占总国土面积 25% 的保护区内生态系统的健康状况；Hartig 等[46]以美国五大湖流域底特律河和 Western Lake Erie 为例，开展了经过长期恢复措施的生态系统评价，通过对改善河流环境的污染源指示指标分析和生态恢复指标分析，评价了恢复措施下生态系统的健康状态，并对威胁生态系统健康的人口增长、非点源污染、外来物种入侵等因素做了汇总，这是对采取恢复措施后生态系统健康评价的重要研究。在我国，在 20 世纪 90 年代末期，Xu 等[47] [48]在对巢湖研究时提出以能质、结构能质和生态缓冲能力为核心的评价淡水生态系统健康的指标体系，涵盖了目前生态系统健康评价中的生态指标和经济指标，并对湖泊在不同时段(如：一年四季)的健康状态进行生态指标的逐一比较；崔保山等[49] [50]以三江平原挠力河流域湿地作为例，构建了湿地生态特征、功能整合性和社会环境等三类指标体系，用于评价该湿地的健康状态；赵彦伟等[51]构建了包含含水量、水质、水生生物、物理结构与河岸带等 5 大要素的城市河流健康评价指标体系，并评价了宁波市甬江干流、岩河、西河与鳗溪的健康状况。

4. 从生态系统功能评价生态影响的研究进展

从物质与能量循环的角度，生态系统的功能包含能量流动、物质循环和信息传递；从服务角度，包含自身生产力和环境功能两方面，其中，自身的生产力包括系统的生物量、生长率、生产能力等，环境功能包括水源涵养、防风固沙、净化环境、吸收 CO₂、养育生物等。为了强调生态系统对人类的作用，生态系统服务功能主要包括为人类提供产品、调节功能、文化功能等。这个概念的提出，真实的意图是强调人类破坏生态系统后，如此多服务于人类的功能将被破坏，这也是从功能方面进行生态影响评价的一个方面。此外，基于生物多样性与生态系统功能的关系，也有相关大量的研究，其考虑的主要是生物多样性与生态系统稳定性或生产力的关系。

4.1. 基于生态系统资本价值度量的生态系统服务功能评价研究进展

采用经济价值计算的方法，衡量生态系统资本价值是评价生态系统于人类的服务功能。从生态学理论和经济学的角度，基于生态系统服务的物质量和生态系统资源的稀缺性，对区域环境与自然资源的服务功能价值进行计算，采用的方法主要有费用支出法、市场价值法、经济成本法、条件价值法等。生态系统基本价值的度量最早出现于 1925 年 Drumarx 的研究中，他将野生生物游憩的费用支出作为野生生物的经济价值[1]。此后直到 20 世纪 60 年代，生态系统功能的价值度量基本停留在生态系统经济价值的初步计算方面。到 1970 年 SCEP 报告提出了生态系统服务功能(ecosystem services)，开始用服务功能的概念评估生态系统的功能，随后大量不同生态系统服务功能评价的研究广泛开展[52]-[55]。2000 年以来，生态系统服务功能评估更加深入、全面，Matthew 等[56]对 1971 到 1997 年之间美国湖泊、河流、湿地等淡水生态系统经济价值的研究进行了总结；Loomis 等[57]评价了美国普拉特河沿岸 45km 范围内，修复河

流生态系统的废水处理、自然净化、侵蚀控制、鱼类和野生动物栖息地、娱乐等 5 个方面的经济价值。在我国,生态系统服务功能评价到 20 世纪 90 年代初才开始开展,侯兆元等[58]采用经济效益计算的方式评估了森林生态系统的经济价值;到 1999 年欧阳志云等最早引用了生态系统服务的概念,并对中国陆地生态系统与地表水水生生态系统的服务功能和经济价值进行了阐述与评价[59][60];之后,大量关于不同生态系统类型的生态系统服务功能评价工作广泛开展,包括草地生态系统、湿地生态系统、森林生态系统、河流生态系统等等[61]-[64]。

4.2. 基于生物多样性与生态系统功能关系的生态系统功能评价

基于生物多样性角度的生态系统功能评价主要是侧重于生物多样性对生态系统生产力和稳定性的影响和作用机制。Hector 等[65]认为生物多样性与生态系统功能关系的研究可以追溯到达尔文时代。自 20 世纪 70 年代以来开展了生物多样性与生态系统稳定性之间的研究。到 20 世纪 90 年代,尤其是 1991 年国际科学联合会环境问题科学委员会组织的一次会议促进了生物多样性与生态系统服务功能关系的研究[10],生物多样性与生态系统功能关系的研究正式发展起来,其研究方法主要是观察、理论和实验,假说(冗余种假说、铆钉假说、不确定假说、无效假说等)是评价生物多样性与生态系统功能关系的主要途径。受观察和实验研究方法的影响,生物多样性与生态系统功能关系的研究出现了两个派别的讨论:一派是通过实验观察建立物种多样性与生态系统功能之间的关系,Tilman 等[66]和 Naeem 等[67]就以各自的试验结果证明了物种多样性与生态系统稳定性和生产力之间的正相关关系;另一派别则是对该方法所得出的结论产生质疑,认为实验观察的结果是取样效应所致,Huston[68]和 Grime[69]对实验方法取得的结果表达了质疑的观点。到 21 世纪,生物多样性与生态系统功能研究范围更加细致深入,包括大的时空尺度上生物多样性与生态系统功能的关系、非生物因素与生物多样性和生态系统生产力的关系,以及物种共存机制对生物多样性与生态系统功能的关系[70]。在我国,生物多样性与生态系统功能关系的研究始于 2000 年以后,且研究较少,陈欣等[71]阐述了农业生态系统中杂草多样性保持的生态学功能,王长庭等[72]论述了草地生态系统中物种多样性与群落稳定性和生态系统功能之间的关系。同时许多学者[73]-[75]对国际生物多样性与生态系统功能研究的历程与进展做过详细的介绍,为我国开展相关研究奠定了基础。

5. 我国水循环改变的生态影响评价中存在的问题及发展需求

我国现状水土资源开发利用程度高,流域水循环改变力度大,生态问题严重。未来一个时期内,人口压力与社会经济发展,对水资源与生态问题的关注将会提高,围绕流域水循环的生态影响评价将会有更广泛的需求。上世纪 50~70 年代的自然普查主要从资源角度开展,从生态系统角度分析不够全面,一些生态系统的本底不太清楚,尤其是河流生态系统。通过上述分析,水循环改变的生态影响评价面临三个方面的问题与需求。

(1) 生物本底信息缺乏,需要基于生态站有限的信息建立分区生态基准

恢复生态系统评价中的本底参照不清楚,评价标准依据不足,因此在评价工作中的任意性较大。另外,从方法角度来看,什么样的生态系统是健康的,哪些方法是生态系统评价中的最优方法,生态系统的服务价值如何体现等等,这些问题在目前的生态系统评价中不尽相同,由于生态系统自身的复杂性,生态系统评价研究内容的交叉性,生态系统评价中制定统一的标准是非常困难的问题。目前我国建立了不同类型生态系统的监测站网,为生态影响评估工作的开展提供了大量的数据支撑,还需要根据系统结构、功能、区域环境要素等建立分区域的生态基准,为生态影响评价提供可参照的依据。

(2) 生态水文过程不清楚,需加强水域生态系统生态水文过程的研究

认识生态水文过程是合理评价水循环改变生态影响的基础。我国关于坡面植被生态与水文过程关系

的认识比较清楚, 从不同自然带的天然森林生态系统到半干旱区黄土高原水土保持生态建设的水文效应都有较深厚的研究基础, 同时改变水文过程对绿洲植被的影响近 10 年来也有较大的进展。但是, 水文过程对河流生态系统的影响基本上来源于国外研究的成果, 国内的基础研究很少。湖泊生态水文过程的研究有一定的基础, 但对目前污染较重的富营养型湖泊, 水文过程的作用还停留在冲污的概念上, 详细的生态水文过程不清楚。关于河口近岸海域的淡水生态水文研究成果相对比较扎实, 主要集中在海洋领域, 淡水流域相关工作对此认识较弱。为此, 应加强水域生态系统淡水生态水文过程的研究, 深入揭示淡水循环的生态影响机理。

(3) 生态恢复工程人为调控因素影响大, 应强调生态系统的动态影响评价

对于深度破坏的生态系统, 恢复工程实施过程中, 人为调控对恢复效果影响比较大, 这部分内容目前既不在工程规划中考虑, 也不在生态评价中考虑。如生态补水工程和植被建设工程, 生态补水工程放水过程的详细调控、放水的地点和路径, 以及地表水和地下水的补给方式对生态恢复效果的影响较大; 植被建设在生态恢复过程中, 一些初期种植的物种完全依靠自然演替来淘汰, 时间比较长, 如果合理地施加人工措施, 整体生态恢复的效果比较好。在生态的预评估中, 需要考虑调控的作用。充分考虑人工调控因素对生态系统的影响。人工调控因素将成为生态系统影响因素中的重要方面, 如何建立基于人工调控因素影响下的生态影响动态评估体系是未来生态影响评估的重要方面。

项目基金

本文的研究受到国家科技支撑计划(2007BAC28B00)、柴达木盆地生态水文研究(编号: 2013ZY06)、柴达木循环经济试验区水资源综合规划专题柴达木盆地生态需水研究项目的资助。

参考文献 (References)

- [1] 刘玉龙, 马俊杰, 金学林, 王伯铎, 林积泉, 张铭 (2005) 生态系统服务功能价值评估方法综述. *中国人口·资源与环境*, **1**, 88-92.
- [2] Leopold, A. (1941) Wilderness as a land laboratory. *Living Wilderness*, **7**, 3.
- [3] SECP (1970) Study of critical environmental problems. Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Karr, J.R. and Dudley, D.R. (1978) Biological integrity of a headwater stream: Evidence of degradation, prospects for recovery. In: Lake, J and Morison, J., Ed., *Environmental Impact of Land Use on Water Quality: Final Report on the Black Creek Project-Supplemental Comments*, U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, 3-25.
- [5] Schaeffer, D.J., Henricks, E.E. and Kerster, H.W. (1988) Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, **12**, 445-455.
- [6] Daily, G.C. (1997) Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem. Island Press, Washington.
- [7] Costanza, R., Arge, R. and Groot, R. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **38**, 253-260.
- [8] Anon, W. (1994) Canada to spend 150 million on Great Lakes program. *Water Environment and Technology*, **6**, 28.
- [9] Leon, A.B., Bruce, C.C. and Barry, T.H. (2002) Australian River Assessment System: Interpretation of the Outputs from AusRivAS. Monitoring River Health Initiative Technical Report.
- [10] 温林泉, 蔡邦成, 陆根法 (2006) 生态系统服务价值评估研究进展及其在环境保护中的意义. *污染防治技术*, **1**, 23-25.
- [11] <http://www.millenniumassessment.org/zh/>
- [12] 王雪梅, 刘静玲, 马牧源, 杨志峰 (2010) 流域水生态风险评价及管理对策. *环境科学学报*, **2**, 237-245.
- [13] 张秀英, 钟太洋, 黄贤金, 江洪, 丁晓东 (2013) 海州湾生态系统服务价值评估. *生态学报*, **2**, 640-649.
- [14] Robert, Z. and Albert, R.S. (1966) A procedure for calculating daily moisture stress and its utility in regressions of tree growth on weather. *Ecology*, **47**, 64-74.
- [15] Thomas, J.J., Thomas, J.S. and James, R.W. (1982) Passive Microwave Sensing of Soil Moisture Under Vegetation Canopies. *Water Resources Research*, **18**, 1137-1142.

- [16] Colin, C.H. and Robert, E.B. (1999) Evaluation of NDVI for monitoring live moisture in three vegetation types of the western U.S. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **65**, 603-610.
- [17] Boon, P.J., Calow, P. and Petts, G.E. (1997) River Conservation and management. China Science and Technology Press, Beijing.
- [18] Schmera, D., Eros, T. and Podani, J. (2009) A measure for assessing functional diversity in ecological communities. *Aquatic Ecology*, **43**, 157-167.
- [19] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 江涛 (2011) 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究. *地理学报*, **1**, 99-110.
- [20] 杨志峰, 于世伟, 陈贺, 余敦先 (2010) 基于栖息地突变分析的春汛期生态需水阈值模型. *水科学进展*, **4**, 567-574.
- [21] Wang, N. and Mitsc, J.W. (2000) A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands. *Ecological Modeling*, **126**, 101-130.
- [22] 王芳, 刘佳, 燕华云 (2008) 青海湖水平衡要素水文过程分析. *水利学报*, **11**, 1229-1238.
- [23] 梁犁丽, 王芳 (2010) 鄂尔多斯遗鸥保护区植被-水资源模拟及其调控. *生态学报*, **1**, 0109-0119.
- [24] Copeland, B.J. (1966) Effects of decreased river flow on estuarine ecology. *Journal of Water Pollution Control Federation*, **38**, 1831-1839.
- [25] Jassby, A.D., Cloem, J.E. and Powell, T.M. (1993) Organic carbon sources and sinks in San Francisco Bay: Variability induced by river flow. *Marine Ecology Progress Series*, **95**, 39-54.
- [26] Ardisson, P.L. and Bourget, E. (1997) A study of the relationship between freshwater runoff and benthic abundance: A scale-oriented approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **45**, 535-545.
- [27] 水电部黄委会勘测规划设计院 (1986) 黄河水资源利用. 水电部黄委会勘测规划设计院, 郑州.
- [28] 王金辉 (2002) 长江口 3 个不同生态系的浮游植物群落. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, **3**, 422-428.
- [29] 傅小城, 王芳, 王浩 (2011) 河口近岸海域生态需水研究——漳卫新河河口生态需水分析. *中国水利水电科学研究院学报*, **2**, 96-103.
- [30] Rapport, D.J., Thorpe, C. and Regier, H.A. (1979) Ecosystem health: The concept, the ISEH and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, **5**, 82-90.
- [31] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰 (2001) 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, **12**, 2106-2116.
- [32] Lange, B.H. (1979) Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. *Nova Hedwigia*, **64**, 285-304.
- [33] Descy, J.P. (1979) A new approach to water quality estimation using diatoms. *Nova Hedwigia*, **64**, 305-323.
- [34] Armitage, P.D., Moss, D., Wright, J.F. and Furse, M.T. (1983) The performance of a new biological water quality score system based on macro invertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Research*, **17**, 333-347.
- [35] Karr, J.R. (1981) Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, **6**, 21-27.
- [36] 杨潼, 胡德良 (1986) 利用底栖大型无脊椎动物对湘江干流污染的生物学评价. *生态学报*, **3**, 262-274.
- [37] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 刘颖, 张远, 孟伟 (2012) 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. *生态学报*, **6**, 1677-1691.
- [38] Westman, W.E. (1978) Measuring the inertia and resilience of ecosystems. *BioScience*, **28**, 705-711.
- [39] Rapport, D.J. (1989) What constitutes ecosystem health. *Perspective in Biology and Medicine*, **33**, 120-132.
- [40] Costanza, R., Norton, B.G. and Haskell, B.D. (1992) Ecosystem health: New goals for environmental management. Island Press, Washington DC, 239-256.
- [41] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等 (1999) 生态系统健康与人类可持续发展. *应用生态学报*, **6**, 751-756.
- [42] 肖凤劲, 欧阳华, 傅伯杰, 等 (2003) 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. *地理学报*, **6**, 803-809.
- [43] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉 (2011) 长江口及毗邻海域生态系统健康评价研究. *水利学报*, **10**, 1201-1208.
- [44] 李春华, 叶春, 赵晓峰, 等 (2012) 太湖湖滨带生态系统健康评价. *生态学报*, **12**, 3806-3815.
- [45] Aguilar, B.J. (2001) Applications of ecosystem health for the sustainability of managed systems in Costa Rica. *Ecosystem Health*, **5**, 36-48.
- [46] Hartig, J.H., Zarull, M.A., Ciborowski, J.J.H., Gannon, J.E., Wilke, E., Norwood, G. and Vincent, A.N. (2009) Long-term ecosystem monitoring and assessment of the Detroit River and Western Lake Erie. *Environmental Monitoring and Assessment*, **158**, 87-104.

- [47] Xu, F. (1996) Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, **2**, 101-109.
- [48] Xu, F. (1997) Exergy and structural exergy as ecological indicators for the development state of the Lake Chaohu ecosystem. *Ecological Modeling*, **99**, 40-49.
- [49] 崔保山, 杨志峰 (2002) 湿地生态系统健康评价指标体系 I: 理论. *生态学报*, **7**, 1005-1011.
- [50] 崔保山, 杨志峰 (2002) 湿地生态系统健康评价指标体系 II: 方法与案例. *生态学报*, **8**, 1225-1233.
- [51] 赵彦伟, 杨志峰 (2005) 城市河流生态系统健康评价初探. *水科学进展*, **3**, 349-355.
- [52] Westman, W.E. (1977) How much are nature's services worth? *Science*, **197**, 960-964.
- [53] Peters, C.M., Gentry, A.H. and Mendelsohn, R.O. (1989) Valuation of an amazonian rainforest. *Nature*, **339**, 655-656.
- [54] Henry, R., Ley, R. and Welle, P. (1988) The economic value of water resources: The Lake Bemidji survey. *Journal of the Minnesota Academy of Science*, **53**, 37-44.
- [55] Desvougues, W.H., Smith, V.K. and Fisher, A. (1987) Option price estimates for water quality improvements: A contingent valuation study for the Monongahela River. *Journal of Environmental Economics and Management*, **14**, 248-267.
- [56] Matthew, A.W. and Stephen, R.C. (1999) Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States: 1971-1997. *Ecological Applications*, **9**, 772-783.
- [57] Loomis, J., Kent, P. and Strange, L., et al. (2000) Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impacted river basin: Results from a contingent valuation survey. *Ecological Economics*, **33**, 103-117.
- [58] 侯元兆, 王琦 (1995) 中国森林资源核算研究. *世界林业研究*, **3**, 51-56.
- [59] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿 (1999) 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, **5**, 607-613.
- [60] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等 (2003) 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *自然资源学报*, **4**, 443-452.
- [61] 刘兴元, 牟月亭 (2012) 草地生态系统服务功能及其价值评估研究进展. *草业学报*, **6**, 286-295.
- [62] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等 (2011) 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. *生态学报*, **8**, 2236-2244.
- [63] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳 (2005) 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, **8**, 2096-2102.
- [64] 张振明, 刘俊国, 申碧峰, 等 (2011) 永定河(北京段) 河流生态系统服务价值评. *环境科学学报*, **9**, 1851-1857.
- [65] Hector, A. and Hooper, R. (2002) Darwin and the first ecological experiment. *Science*, **295**, 639-640.
- [66] Tilman, D. and Downing, J.A. (1994) Biodiversity and stability in grassland. *Nature*, **367**, 363-365.
- [67] Naeem, S., Thompson, L.J., Lawler, S.P., Lawton, J.H. and Woodfin, R.M. (1994) Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, **368**, 734-740.
- [68] Huston, M.A. (1997) Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, **110**, 449-460.
- [69] Grime, J.P. (1997) Biodiversity and ecosystem function: The debate deepens. *Science*, **277**, 1260-1261.
- [70] 张全国, 张大勇 (2003) 生物多样性与生态系统功能: 最新的进展与动向. *生物多样性*, **5**, 351-363.
- [71] 陈欣, 王兆骞, 唐建军 (2000) 农业生态系统杂草多样性保持的生态学功能. *生态学杂志*, **4**, 50-52.
- [72] 王长庭, 龙瑞军, 丁路明, 等 (2005) 草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系. *草业科学*, **6**, 1-7.
- [73] 黄建辉, 白永飞, 韩兴国 (2001) 物种多样性与生态系统功能: 影响机制及有关假说. *生物多样性*, **1**, 1-7.
- [74] 李慧蓉 (2004) 生物多样性和生态系统功能研究综述. *生态学杂志*, **3**, 109-114.
- [75] 杜丽, 戈峰 (2004) 生物多样性与生态系统功能的关系研究进展. *中国生态农业学报*, **2**, 19-22.