

湿地生态水文结构理论与分析

陈敏建¹, 王立群^{2,*}, 丰华丽², 戴向前³, 黄昌硕², 王高旭²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:针对水土资源开发利用引发的湿地消退问题,通过研究湿地水分运动与补给规律,分析湿地和径流进退的关系、湿地生境和生物的扩展关系,分析湿地水文连接度下降引起的湿地消退效应。根据湿地水循环原理和湿地生境空间分布规律,建立湿地径流场与生物多样性场的概念,从而提出湿地生态水文结构理论。以维持湿地存在、保障湿地生物多样性为目标,通过湿地径流场与生物多样性场的耦合关系,将湿地划分为中心区和适宜活动区,以维持湿地生态水文结构所需要的水分条件定义为湿地生态需水。湿地生态需水问题的核心为确定湿地生态水文结构,并以湿地中心区和适宜活动区为边界条件,通过地表水地下水转化的水量平衡模型对湿地生态需水量进行分析计算。以维持中心区的水分条件作为最小生态需水;维持适宜活动区的水分条件作为适宜生态需水。

湿地生态水文结构更对湿地管理提供生态安全阈值。根据湿地生态水文结构的稳定程度,建立湿地生态安全危机管理机制,进行不同级别的预警管理。

关键词:湿地;生态水文结构;径流场;生物多样性场

文章编号:1000-0933(2008)06-2887-07 中图分类号:P343,Q147,Q178 文献标识码:A

Theory and analysis of wetlands' eco-hydrological configuration

CHEN Min-Jian¹, WANG Li-Qun^{2,*}, FENG Hua-Li², DAI Xiang-Qian³, HUANG Chang-Shuo², WANG Gao-Xu²

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

2 State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2887 ~ 2893.

Abstract: Aiming at wetlands diminishing problems caused by soil and water resources utilization, and based on the law of wetlands water movement and supply, a relationship between wetlands and runoff advancing and retreating, and the extending connection between wetland habitats and lives are analyzed. The concepts of wetland runoff field and bio-diversity field are established according to the wetland water cycle principle and the spatial distribution law of wetland habitat. Consequently the theory of wetlands' eco-hydrological configuration is proposed. In order to maintain the existing of wetlands and protect the biodiversity, the wetlands are divided into the center area and the appropriate activity area based on the coupling relationship of wetland runoff field and bio-diversity field. Ecological water demand of the wetlands is defined as the moisture condition to keep the eco-hydrological configuration. The key point is to ascertain the eco-hydrological

基金项目:国家十五科技攻关资助项目(2004BA610A-01, 2001BA610A-01)

收稿日期:2007-01-26; 修订日期:2007-09-17

作者简介:陈敏建(1957~),男,江西人,博士,教授,主要从事水资源规划与管理、生态水文研究. E-mail: mjchen@iwhr.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lqwang@nhri.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Tenth Five-years' National Key Technologies R&D Programme (No. 2004BA610A-01, 2001BA610A-01)

Received date: 2007-01-26; **Accepted date:** 2007-09-17

Biography: CHEN Min-Jian, Ph. D., Professor, mainly engaged in water resources planning and management, ecological hydrology. E-mail: mjchen@iwhr.com

configuration, after which the ecological water demand can be calculated by the water balance model of surface water and groundwater transforming, with the boundary stresses of the center and the appropriate activity areas. The moisture conditions to maintain the center area and the appropriate activity area are respectively recognized as minimum and appropriate ecological water demands.

Wetlands' eco-hydrological configuration proposes the threshold value to ecological security in wetlands management. Crisis management system of wetland ecological security can be built and forewarning management in different levels can be carried out according to the stable degree of wetland ecology.

Key Words: wetland; eco-hydrological configuration; runoff field; bio-diversity field

湿地是地球上一种重要的生态系统,处于陆地生态系统(如森林和草地)与水生态系统(如深水湖和海洋)之间。换言之,湿地是陆生和水生态系统之间的过渡形态,具有水生和陆地生态系统的属性,但又不同于二者,具有一些独特的生态功能^[1,2]。湿地蕴涵丰富的生物资源,在人类生产和生活中发挥了巨大的作用和效益,在环境功能和生物多样性等方面具有其它系统不可替代的作用。近30a来,我国湿地急剧萎缩,出现一系列严峻的生态和环境问题。湿地生态及其需水研究受到日益广泛重视,逐步成为当代资源环境领域最为活跃的重点学科之一。目前湿地生态需水理论和计算方法众多,极大地促进了湿地生态需水研究的发展^[3~11]。

Rashin^[6]等较早提出,为了保证水资源的可持续利用,要有足够的水量来满足河流、湖泊和湿地生态系统要求,但作者并没有给出明确的概念和计算方法;Baird^[7]等针对各类型生态系统(旱地、林地、河流、湖泊、淡水湿地等)的基本结构和功能,较详细地分析了植物与水文过程的相互关系,强调了水作为环境因子对自然保护和恢复所起到的巨大作用,作者尽管没有将生态环境需水量作为研究对象,但许多相关的思想、原理和方法在很大程度上推动了生态环境需水量的研究和发展方向。国内引进消化了湿地生态需水研究方法,针对湿地植物、土壤以及野生生物栖息地等需水量提出了许多相关的计算方法和理论模型。大部分研究都主要集中在湿地生态系统局部需水特性方面,强调生态学观点,将湿地生态系统各要素独立分析,没有突出湿地的整体概念,没有足够重视径流运动对湿地生态的决定性影响,较少研究水文循环作用下生态系统内部各要素之间的依存及联系,并且计算方法没有将阈值理论直接考虑在内。近年来,随着人们认识的深入,从湿地系统整体角度研究生态需水问题正逐步引起重视^[8]。

水文过程是湿地形成、发育和演化的最重要的驱动机制,径流与生物多样性构成湿地独特的生态水文特征,湿地生态系统的发展、演替以及稳定与湿地径流和生物多样性的长期相互作用直接相关。因此,以水文学为基础,将湿地作为一个整体,从湿地径流和生物多样性变化角度来研究湿地的生存与发展及其需水原理必将是湿地生态需水研究领域的重要方向。本文针对水土资源开发利用引发的湿地消退问题,根据湿地水循环原理,通过研究湿地水分运动与补给规律,从机理上分析湿地消长和径流进退的关系,通过研究湿地生境空间分布规律,揭示径流运动作用下湿地生境和生物的扩展关系,从而提出湿地生态水文结构理论,并据此建立湿地生态水文结构分析及计算模型,以湿地生态水文结构的水分条件定义和分析计算湿地生态需水。以期为湿地生态保护、恢复等规划与管理工作提供可操作的生态安全阈值,并为建立湿地生态安全危机管理机制,进行不同级别的预警管理提供技术平台。

1 湿地消退机理

1.1 湿地水文连接度

湿地是陆生和水生生态系统之间的过渡形态,兼具水生和陆地生态系统的属性。湿地生态系统通常指湿地本身及其临近的周围环境,以湿地地表、地下径流活动的最大区域为限。湿地生态系统的水、营养物质等来自相关的外部生态系统的输入,湿地径流运动的不同形式、水文地貌的差异,以及输入物质的不同,形成了不同类型的湿地生态系统。

湿地以及湿地与外部水、营养物质输送系统依靠水文连接度支持。水文连接度^[12~14]是指在系统内部和

其它系统之间,物质、能量和生物体以水为媒介进行迁移和传递的能力。在湿地系统中,水文连接度指湖泊、河流、沼泽等之间地表水和地下水的连接程度。湿地各部分以及各景观之间以水(地表水、地下水)为纽带联结成一个整体,相互影响和作用。

1.2 湿地破碎化

湿地由连续完整的整体趋向于不连续、地理位置上相互分离的斑块体的过程,属于景观破碎化^[15]。景观破碎化是生态学的概念,是景观生态学中的主要研究领域。景观破碎化与水文连接度有很大的关系,当景观逐步破碎、相互分离后,湿地的水文循环必然受到影响,导致部分循环阻断,水文连接度下降。因此,景观破碎化与水文连接度的下降关系密切。本文中的水文连接度并不是研究各类景观的分割分离现象,仅以水面为对象,从水文循环的角度研究湿地中水面面积萎缩、分离、破碎过程及其所引起的湿地生态水文结构改变的机制。

由于天然来水减少引起水位下降,或围垦土地减少水面,或其它人为作用(如修路)阻断水体连通性等,都会导致湿地水文连接度下降,引起湿地消退。随着水文连接度的下降,野生动物栖息地逐渐减少,生物生境破碎化日趋严重;水文连接度下降到一定程度,沼泽基本丧失或发生演替和退化,湖泊严重萎缩,湿地大面积消亡,此时湿地系统服务功能已降至最低,如不采取补水等恢复措施,湿地将面临毁灭性的灾难。图1是对湿地水文连接度下降,湿地水面分离破碎的一个简单示意^[16]。

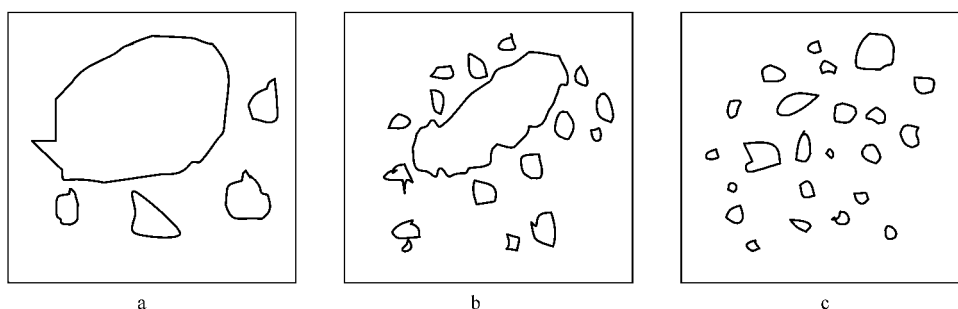


图1 水文连接度下降、水面分离破碎过程示意

Fig.1 Diagram of the process of hydrological connectivity decreasing and water surface breaking up

1.3 湿地消退效应

上述湿地水文连接度下降、湿地水面分离破碎化的过程揭示了湿地消退机理,其成因复杂。由水土资源开发利用引起的湿地大规模消退,可分为如下几种类型:

(1)引水消退效应 由于水资源利用,使湿地补给水量减少,导致湿地由周边逐渐向湿地中心全面萎缩。湿地径流运动为湿地提供营养物质的迁移和能量的流动,为生物提供生存生活的必要空间。湿地上游引水造成天然水文情势的改变,导致湿地补水量减少,水文连接度下降,引起湿地由四周向中心退缩,造成一些生物生境衰退和消失,湿地加速破碎化,生态系统退化甚至消亡。

(2)围垦消退效应 由于围垦,湿地被切割蚕食,湿地面积减少。湿地土地肥沃,围垦农田的同时也占据了湿地生物的生存活动空间,自然水域被压缩,连通性被切割,生境被分离,使得生物生存发展空间被限制,湿地面积迅速减小,生物多样性和湿地特有功能退化甚至丧失。

(3)复合消退效应 在以上两种因素共同作用下的复合效应,使湿地加速消亡。

总体上讲,我国南方湿润地区的湿地消退主要是围垦消退效应,北方半湿润半干旱地区,如华北平原主要是引水消退效应,松花江流域湿地消退是两种因素导致的复合效应。

2 湿地生态水文结构

2.1 湿地径流场与“生物多样性场”

湿地属于由径流支撑的非地带性生态系统,具有独特的水文和生态特征,径流条件及分布决定了湿地活动区域的大小以及生物多样性的丰富程度。正常湿地具有稳定的水分来源,形成随水文情势变化的有序的径

流活动区域,可称之为湿地径流场。湿地径流场提供生物多样性生长条件,径流运动与生物多样性形成对应关系,以水源为中心,在水域活动及影响范围内具有不同的生境,形成一种类似于场的生物生境效应:各种生物在一个相对固定的范围内生存繁衍,具有适宜的生境条件,并形成生物链,可称之为生物多样性场。湿地径流场与生物多样性场的耦合关系,揭示了湿地生态系统的水文-生态演变机理。

2.2 湿地生态水文结构

将湿地径流场与生物多样性场进行分离与耦合,可获得揭示水文-生态演变机理的湿地生态水文结构。按水域活动特点和生物特点,湿地径流场由两部分组成:反映径流运动特征的湿地中心区和反映生物多样性分布特征的湿地活动区。

(1)湿地中心区 水分长期滞留的区域,在不同的水文条件下都保存水,犹如湿地心脏。基本功能是维持湿地最基本的水分条件,是保证湿地生存的前提。中心区大小范围的决定性因素是水文与地形地貌条件。

(2)湿地活动区 不同的水文条件下水分进退的径流活动区域。此处分布湿地独有的生物生境,是生物多样性丰富区域,生物多样性场随径流场的改变而调整 and 适应。

湿地这种生物多样性结构提供了确定湿地活动区合理范围的生物学依据。

2.3 湿地生态水文结构演变的驱动机理

湿地水土资源开发利用引起湿地消退,减少湿地活动空间并降低湿地生态功能。一是引水消退效应:在湿地上游引水或从湿地直接取水,导致湿地补水量减少,引起湿地由四周向中心退缩,造成一些生物生境衰退和消亡,湿地径流场的衰竭,导致生物多样性场的萎缩,生态系统退化,最终导致中心区消失,湿地消亡。二是围垦消退效应引起:在湿地活动区范围内围垦造田,减少径流活动空间,将生物活动场所挤压甚至完全侵占,径流场被切割,使得湿地内部能量输送阻塞,导致生物多样性场破碎断裂,直至消失,湿地名存实亡。如果出现复合消退效应,将加速湿地生态水文结构的崩解,直至消亡。

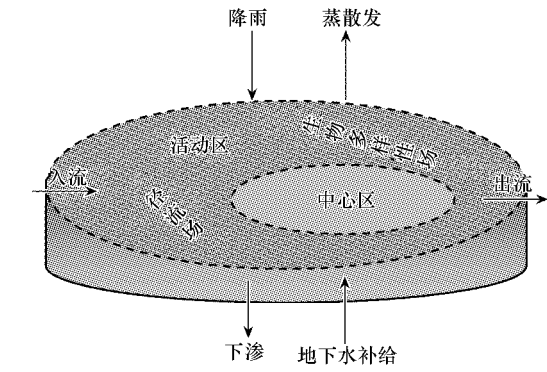


图2 湿地生态水文结构示意图
Fig.2 Diagram of the wetland's eco-hydrological configuration
入流 Inflow;出流 Outflow;降雨 Rainfall;蒸散发 Evapotranspiration;
下渗 Infiltration;地下水补给 Groundwater recharge;中心区 Center
area;活动区 Active area;径流场 Runoff field;生物多样性场
Biodiversity field

表1 湿地生态水文结构及湿地概念性模型

Table 1 Wetland's eco-hydrological configuration and concept model		
湿地结构 Wetland configuration	中心区 Center area	活动区 Active area
径流场 Runoff field	长期存水,为径流活动的最小范围 Long period water remain, minimum range of runoff activity	径流进退区域 Runoff advancing and retreating region
生物多样性场 Biodiversity field	水生生物 Aquatic life	水生、陆生生物,生物多样性丰富 Aquatic and terrestrial life, rich biodiversity
边界确定 Boundary determination	湿地最小水面面积,水文学形态学方法 Minimum water surface area of wetland,Hydrological morphology method	从生物完整性角度,确定生物多样性场的最小范围,此为活动区适宜范围 Determination of the biodiversity field's minimum range based on biological integrity
水循环 Water cycle	包括地表水地下水转化的水平衡模型 Water balance model of the transforming of surface water and groundwater	
生态用水指标 Ecological water use index	维持中心区补给量,最小生态需水 Recharge to maintain the center area, minimum ecological water demand	维持适宜活动区补给量,适宜生态需水 Recharge to maintain the active area, appropriate ecological water demand
管理方式 Administrative mode	红色预警 Red early warning	黄色预警 Yellow early warning

3 湿地生态水文结构概念性模型和分析计算

3.1 湿地生态水文结构概念性模型

根据湿地生态水文结构建立湿地概念性模型,如表 1。为湿地生态水文结构分析计算、湿地管理等提供了方法依据。确定湿地结构是最关键问题:一是要界定中心区的范围,二是湿地活动区适宜范围。在确定湿地生态水文结构之后,进行水平衡分析,维持中心区的水量条件即为最小生态需水,维持适宜区的水量条件为适宜生态需水。

3.2 湿地中心区计算

对于湖泊沼泽型湿地,总有一部分水面能保持相对稳定的状态,即使在枯水季节也能基本维持,这部分区域称为湖泊湿地的中心区,是湿地生存的最小区域。中心区位于湖泊底部,是湖盆的盆底区域,在大于中心区的水域,单位水位的下降对水域影响不显著,如果单位水位的下降导致湖沼水面积的大幅萎缩,此时水域范围即为中心区。中心区对应的临界水位就是防止水面干枯的最小生态水位,此为计算湿地中心区的原理。

3.2.1 单核湿地中心区计算

对于单个湖沼的湿地,可利用湿地水面面积、面积变化率与水位的关系,或湿地蓄水量、蓄水量变化率与湿地水位的关系,通过分析其水位库容曲线或水下 DEM 来分析突变点,确定最小生态水位和湿地中心区。

3.2.2 多核湿地中心区计算——水文连接度法

对于多核湿地,具有两个以上水面或随低水位出现水面分裂的湿地,利用湿地水面积、面积减小率或水面分裂的速率建立与水文连接度的关系,以水文连接度大幅消退的某种临界状态(如 50%),其相应的湿地水面面积为中心区。湿地水面水文连接度的量化是关键,分两种情景:

(1) 连续水体分裂的情形,示意图如图 3。以湿地连续水体水面面积减小分裂的过程来分析水文连接度变化,分析水面分裂过程对湿地生态水文结构的影响,寻找水文连接度减小引起湿地生态水文结构迅速瓦解的临界点。

将湿地水面设为 Ω ,当水位下降、水面面积减小至分裂前的临界状态时,设临界水面为 Ω_0 ,面积设为 A_{Ω_0} 。随着水位继续下降,水文连接度逐渐减弱,经过一段时间的发展,水面 Ω_0 逐渐分裂变成不连续的两块水面,面积分别为 A_1 和 A_2 。

此时水文连接度定义为分裂后湿地中最大的一块连续水体面积与分裂前临界面积的比值。令水文连接度用 C 表示,假设分裂后变成 m 块水体,则:

$$C = \max \left\{ \frac{A_1}{A_{\Omega_0}}, \frac{A_2}{A_{\Omega_0}}, \dots, \frac{A_m}{A_{\Omega_0}} \right\} \quad (1)$$

(2) 原本水体即为不连续的情景。如果湿地中的水面分布原本就是不连续分块状态的,此时水文连接度分析示意如图 4。此种情景,水位下降、水面面积减小的过程中,较小水体逐渐缩小以至消失,最终湿地水体分布格局发生改变。

与式(1)同理,此种情况下湿地中某块水面缩小至消失或分裂前的临界状态 Ω_0 的面积即为 $A_{\Omega_0} = A_{01} + A_{02} + A_{03} + A_{04} + \dots + A_{0n}$ (假设有 n 块水面),此时水文连接度定义为格局改变后其中最大的一块水体面积与格局改变前临界面积的比值。令水文连接度用 C 表示,假设格局改变后共形成 m 块水体,则:

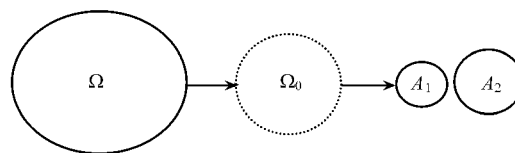


图 3 湿地水面分裂过程示意图

Fig. 3 Breaking-up process of wetland water surface

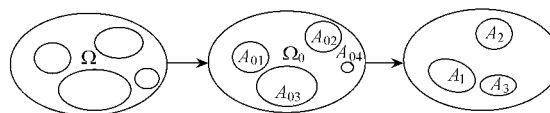


图 4 湿地水面分布格局改变示意图

Fig. 4 Changes of wetland water surface distribution

$$C = \max \left\{ \frac{A_1}{A_{\Omega_0}}, \frac{A_2}{A_{\Omega_0}}, \frac{A_3}{A_{\Omega_0}}, \dots, \frac{A_m}{A_{\Omega_0}} \right\} \quad (2)$$

3.3 湿地活动区适宜范围

在径流场活动的范围内,每种生物都以其特定的生境与对应的径流条件相适应,表现出生物对径流场的适应性。另一方面,径流条件决定着生物场的分布状况。因此,可以依据生物多样性来推求湿地活动区的适宜范围。

方法一 绘制湿地生物多样性场图方法。绘制湿地生物分布图,从生物完整性角度,以指示性物种活动区域作为控制条件,确定生物多样性场最小范围。

方法二 湿地生态演变过程经验分析方法。

(1)历史分析法 湿地天然生态系统具有稳定的生态结构,随着水资源开发利用量的不断增加,可供生态系统使用的水量不断减少,生态系统经历3个阶段:①生态结构稳定生物产量大;②生物产量减小生态结构不稳定;③物种消失生态结构退化。生态结构不稳定至结构退化的过渡时期,即可认为是生物完整性遭受破坏的临界点。通过调查湿地生态结构、功能、生产力的演变历史,确定生态系统的临界点,模拟其时的水位,确定活动区的适宜范围。

(2)现状分析法 在实际操作中,由于湿地演变的历史资料很难获得,因此往往通过现状调查,以维持现状水平、保护湿地不再退化为目的,用现状湿地保护区面积作为活动区适宜范围的方法。

方法一 按照湿地生态水文结构模型中湿地生物多样性场的原理,从生物完整性的角度来确定适宜区面积,计算方法科学严谨,由于湿地生物分布信息采集工作量浩大,将限制该方法推广应用。

方法二 是对生物多样性场进行近似推断。历史分析法从历史调查的角度出发,通过分析湿地的演变过程,以生物多样性由盛转衰的年份为临界点,以其时的湿地范围确定湿地活动区适宜范围,符合生物多样性场的变化特点,同时还包含了生态“恢复”的思想,对历史信息充分的湿地,该方法较为有效。现状分析法可以看成是在湿地生物资料、历史演变资料短缺的情况下,用现状湿地保护区面积代替活动区适宜范围的一种近似方法,但其包含有“从现实出发,加强保护,不再恶化”的思想,这是一种看似平淡实则积极的态度,对湿地宏观管理来讲,意义重大。

4 湿地生态需水

以维持湿地生态水文结构所需要的水分条件分析湿地生态需水。以湿地中心区面积和活动区适宜面积为边界条件,进行地表水和地下水转化的水量平衡模型计算。

多年平均情况下,地下水与地表水相互补给平衡,因此只考虑降水 and 水面蒸发、植被蒸腾。所计算生态需水量分别指在中心区和活动区适宜范围内,为维持湿地生态水文结构,扣除降水之后,用以消耗在水面蒸发及陆面植被蒸腾所需要的净需水量,未包括最小生态水位以下的水量。

$$W_E = A(E - P) \times 10^3 \quad (3)$$

式中, W_E 为湿地的生态需水量(m^3/a); P 为降水量(mm); E 为蒸发量(mm); A 为中心区面积或活动区适宜范围内的水面面积(km^2)。

5 应用与结论

5.1 应用情况

作者应用湿地生态水文结构理论与计算方法对松花江流域湿地进行了大规模研究,获得了预期成功。通过对向海、扎龙、查干湖和卧龙湖等典型湿地深入剖析,建立全流域湿地生态水文结构分析模式,再通过建立经验公式和地区水文规律分析,取得了松花江流域湿地生态演变与需水规律的系统成果。

5.2 结论

(1)将湿地独特的生态水文特征,定义为径流场与生物多样性场,其相互耦合与分离,形成了湿地生态水文结构,据此将湿地划分为中心区和活动区。湿地消退的根本原因是径流场与生物多样性场的相继衰萎,导

致湿地生态水文结构的退化。根据湿地生态水文结构理论建立的湿地概念性模型,系统地描述了湿地生命过程与驱动机理,可成为湿地生态保护的科学研究与管理平台。

(2) 根据湿地生态水文结构分析计算湿地生态需水,机理明确,物理意义清楚,使湿地规划管理中的水资源平衡、水土资源开发、湿地补水,有科学理性基础。

(3) 湿地生态水文结构概念性模型为湿地生态安全管理提供了科学依据。根据湿地生态水文结构的稳定程度,建立湿地生态安全危机管理机制,可进行不同级别的预警管理,为管理部门在湿地保护、恢复及规划工作中提供一定的依据。湿地生态水文结构提供生态安全阈值:当湿地的水量减小到最小生态需水量的临界值(水面小于中心区面积)时,生态系统的安全已经降至最低,此时可称作“红色预警”,需要采取调水措施,以保证湿地生态安全;当湿地的水量连续多年使湿地范围小于适宜活动区,湿地生物多样性场将萎缩,生物完整性难以维持,此时可称为“黄色预警”。湿地生态系统要存在一定的波动,使其处于一种动态平衡的状态中,湿地才能够健康地发展。

References:

- [1] Chen M J. Ecological effect of water cycling and classification of regional ecological demand, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 282 — 288.
- [2] Chen M J. Advances in study of ecological water requirement. *China Water Resources*, 2004(20): 25 — 26.
- [3] Chen M J, Feng H L, Wang L Q, *et al.* Scientific Regulation and Management Base on Ecological Flow Regime. *Journal of Advances in Water Science*, 2006(5).
- [4] Chen M J, Wang H, Wang F. Water-Driven Ecological Evolution Mechanism in Inland Arid Region, *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2108 — 2114.
- [5] Chen M J, Wang H, Wang F, *et al.* Ecological Water Demand Analysis in Arid Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2136 — 2142.
- [6] Rashin P D, Hansen E, Margolis R M. Water and Sustainability: Global Patterns and Long-range Problems. *Natural Researchs Forum*, 1996, 20(1): 1 — 15.
- [7] Baird A J, Wilby R L. *Eco-hydrology: Plant and water in terrestrial and aquatic environments*. London and New York: Routledge Press, 1999.
- [8] Yang Z F, Cui B S, Huang G H, *et al.* Hydro-ecological Processes, Water-Environmental Effects and Integrated Control of Ecological Security for Wetlands in Huang-Huai-Hai Region of China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1119 — 1126.
- [9] Cui B S, Yang Z F. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands. *Acta Scientiae Circum Stantiae*, 2002, 22(2): 219 — 224.
- [10] Gleick P H. The Changing Water Paradigm: A Look at Twenty first Century Water Resource Development. *Water International*, 2000, 25(1): 127 — 138.
- [11] Lopez F R, Quintana X D, Salvado V, Hidalgo M, Sala L, Moreno A R. Comparison of nutrient and contaminant fluxes in two areas with different hydrological regimes (Empordà Wetlands, NE Spain). *Water Research*, 2003, 37(12): 3034 — 3046.
- [12] Amezcaga J M, Santamaría L, Green A J. Biotic wetland connectivity-supporting a new approach for wetland policy. *Acta Oecologica*, 2002(23): 213 — 222.
- [13] Amoros C, Bornette G. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology*, 2002, 47: 761 — 776.
- [14] Brian S. Ickes, Jon Vallazza. River Floodplain Connectivity and Lateral Fish Passage: A Literature Review, U. S. Fish and Wildlife Service, Mark Twain Wildlife Refuge Complex, 2005: 11 — 13.
- [15] Wu Z J, Li Y M. Effects of habitat fragmentation on survival of animal populations. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2424 — 2435.
- [16] Liu H Y, Lv X G, Zhang S K, *et al.* Fragmentation Process of Wetland Landscape in Watersheds of Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 216(2): 289 — 295.

参考文献:

- [1] 陈敏建. 水循环生态效应与区域生态需水类型. *水利学报*, 2007, 38(3): 282 ~ 288.
- [2] 陈敏建. 流域生态需水研究进展. *中国水利*, 2004, 20: 25 ~ 26.
- [3] 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 生态标准河流和调度管理研究. *水科学进展*, 2006(5): 631 ~ 636.
- [4] 陈敏建, 王浩, 王芳. 内陆干旱区水分驱动生态演变机理. *生态学报*, 2004, 24(10): 2108 ~ 2114.
- [5] 陈敏建, 王浩, 王芳, 唐克旺, 王研. 内陆河干旱区生态需水分析. *生态学报*, 2004, 24(10): 2136 ~ 2142.
- [8] 杨志峰, 崔保山, 黄国和, 等. 黄淮海地区湿地水生态过程、水环境效应及生态安全调控. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1119 ~ 1126.
- [9] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. *环境科学学报*, 2002, 22(2): 219 ~ 224.
- [15] 武正军, 李义明. 生境破碎化对动物种群存活的影响. *生态学报*, 2003, 23(11): 2424 ~ 2435.
- [16] 刘红玉, 吕宪国, 张世奎, 等. 三江平原流域湿地景观破碎化过程研究. *应用生态学报*, 2005, 216(2): 289 ~ 295.