

# 基于压力-状态-响应模型的扎龙湿地健康水循环评价研究

周林飞<sup>1,2</sup>, 许士国<sup>1</sup>, 孙万光<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳农业大学水利学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:** 在剖析湿地健康水循环概念内涵的基础上, 建立了湿地健康水循环压力-状态-响应概念模型, 并运用此模型构建湿地健康水循环评价的指标体系。该指标体系探索了压力与湿地健康水循环变化之间的关系, 并提出了相应的改善措施, 有利于湿地管理工作的顺利开展。湿地健康水循环评价模型采用模糊模式识别模型, 各指标权重利用层次分析法确定。根据评价指标的选择原则, 选取 9 个评价指标, 提出了 5 级评价标准, 对扎龙湿地 8 年的湿地水循环状况进行了评价, 明确各年的健康状况及限制因子。评价结果与实际进行对比分析, 证明评价结果是正确的。

**关键词:** PSR 模型; 扎龙湿地; 健康水循环; 指标体系; 评价

**中图分类号:** X143      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2008)02-0205-09

国际上对湿地定义有多种, 虽各有侧重, 但基本都从水、土、植物三要素出发, 界定了多水(积水或饱和)、独特的土壤和适水的生物是湿地的基本要素。由此可见, 水是湿地环境中的主导因子, 水循环在湿地的形成、发育、演替直至消亡的全过程中都起着直接而重要的作用。水分运动与补给和生物多样性关系密切, 水循环在湿地内部形成一个独特的径流场, 并且以水源为中心, 形成了一个与径流场相对应的“生物多样性场”, 各种生物都在一个相对固定的范围内生存繁衍。水分波动将引起湿地内部生物多样性的变化, 具体表现是湿生生境和旱生生境的相互演替, 水量充沛的时候, 会出现生境湿生化现象, 干旱缺水时, 将发生旱生化现象<sup>[1,2]</sup>。因此, 维持湿地内部健康水循环对湿地的生存与发展至关重要。

目前, 湿地健康水循环是湿地研究的新概念、新领域。对于湿地健康水循环和健康水循环评价的研究, 国内外鲜见报道。国内对于健康(良性)水循环的研究主要集中在对城市健康(良性)水循环的研究, 着重考虑的是水的社会循环, 通过节约用水、节制用水、污水处理零排放、改善下垫面、雨水利用等措施, 实现健康水循环。其核心思想是在水的社会循环中, 注意遵循水的自然循环规律和品格, 使得上游地区的水循环不影响下游水域的水体功能, 从而维系或恢复城市乃至流域的良好水环境, 实现水资源的可持续利用。本文将在界定湿地健康水循环概念内涵的基础上, 构建湿地健康水循环的压力-状态-响应概念模型, 并在此模型的组织下建立湿地健康水循环指标体系。应用模糊模式识别模型对扎龙湿地的水循环状况进行评价。

## 1 湿地健康水循环的内涵

湿地健康水循环受制于众多因素, 大体可分为自然因子和人类活动两类。自然因子的变动是指自然界正常的环境因子变化, 如降水、蒸散发、气温, 此外也包括规律性的季节变化和年际变化。这些影响因子决定着湿地水循环变化的特点。人类活动则强调人为干扰对湿地水循环健康状况的影响, 是湿地健康水循环的重要影响因素, 主要包括几个方面: 一是土地利用, 土地利用明显地影响着湿地水文系统和整个湿地生态系统。任何改

收稿日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50139020)

作者简介: 周林飞(1971-), 女, 吉林长春人, 副教授, 博士研究生。主要从事湿地及水资源方面的研究。

E-mail: zlf924@163.com

变降雪积累和径流的土地利用都会对湿地的水循环产生重要影响。二是湿地植被的破坏, 植被对降水的再分配和蒸散作用是湿地水分和能量在土壤-植被-大气界面交换的主要途径。土壤-植被-大气界面水文过程直接制约着与湿地的生态系统结构相关的地表水深度和水量, 是影响湿地水循环的一个重要环节<sup>[3]</sup>。因此, 湿地植被的破坏, 尤其是草根层和泥炭层的破坏, 将改变湿地的水文循环过程, 最终结果是大幅度的水位波动、湿地储水功能下降, 湿地植被生长环境恶化。三是污水的排放。水系统能否维系湿地生态系统正常结构和功能, 主要包括两个方面: 水量和水质, 工业废水和生活污水能够改变湿地生态系统的结构和功能。四是湿地物理结构的改变。湿地内部道路、堤坝、水库等的修建, 破坏了湿地的自然水文情势。一定水文规律下的周期性的洪泛作用是塑造湿地的主要自然动力, 是一种强制性的震荡式补水。可是, 这些工程造成湿地基底的改变, 起到阻水、隔水、束水、雍水的作用, 影响水流的自然交换。五是流域的水资源开发利用。流域水资源的开发利用会对洪泛区和下游湿地产生不利的影响。上游工农业用水和水库的兴建将会大量消耗本应该属于湿地的水量。

湿地健康水循环最理想的状态是接近未受干扰前状态, 最完美的标准应该是荒野性, 即维持湿地的自然水文情势。而实际上, 理想的自然状态的湿地已趋于消失, 湿地在长期的发展过程中, 已与社会、经济发展形成了紧密联系, 是社会-自然-经济复合系统, 需要面对的是变化了的湿地水循环环境。人类已经成为湿地系统的一个组成部分, 人类的各项活动已经改变了湿地的下垫面和湿地的自然水文情势。因此, 健康的水循环不但要考虑水循环自身各要素, 还要把人的因素及价值考虑进去, 健康水循环的表征应该是维持生态系统的结构和功能, 维持湿地生态系统服务功能的永续发挥, 而且水循环的波动要在生态系统健康的弹性范围之内。由此看来, 湿地健康水循环是人类发展与生态保护相协调的高度整合性的概念, 是一个对湿地胁迫与响应关系整体性的表述。对湿地健康水循环的评价及其管理目标的设定, 必须建立在水资源合理配置基础上。

## 2 基于 PSR 模型的湿地健康水循环评价指标体系

### 2.1 湿地健康水循环 PSR 概念模型

压力-状态-响应模型 (Pressure-State-Response, PSR) 最初是由 Tony Friend 和 David Rapport 提出, 用于分析环境压力、现状与响应之间的关系。20 世纪 70 年代, 欧洲经济合作与发展组织 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 对其进行了修改并用于环境报告; 80 年代末 90 年代初, OECD 在进行环境指标研究时对模型进行了适用性和有效性评价<sup>[4]</sup>。PSR 评价模型是目前最广泛应用的指标体系之一, 已广泛地应用在土地质量评价、农业可持续发展评价、水资源承载力评价等领域。PSR 概念模型组织环境指标使用了压力-状态-响应这一逻辑思维方式, 目的是回答发生什么、为什么发生以及人类如何做这样 3 个问题<sup>[5]</sup>。

本文将 PSR 模型引入到湿地健康水循环评价中来, 用其思想来组织各种评价指标, 结合湿地健康水循环评价的需要, 设计一个简单的压力-状态-响应概念模型 (图 1)。该模型分析了人类活动和自然变化对湿地水循环系统施加一定的压力, 因为这些压力, 湿地的水循环的状态发生了变化, 这种变化又影响着湿地生态系统的健康状况; 人类又通过各种管理策略对这些变化和压力做出反应, 使水循环沿着健康的方向发展。

### 2.2 广义的湿地健康水循环评价指标体系

基于 PSR 概念模型, 本文提出了一个广义的湿地健康水循环评价指标体系, 该体系包括的指标范围较广, 不是针对某一具体湿地提出的, 具有普适性。在应用到具体某一个湿地时, 应根据该湿地的具体情况和特点, 选择具体的指标体系, 使其具有针对性, 反映特定水循环系统的健康状况。其评价体系见图 2。

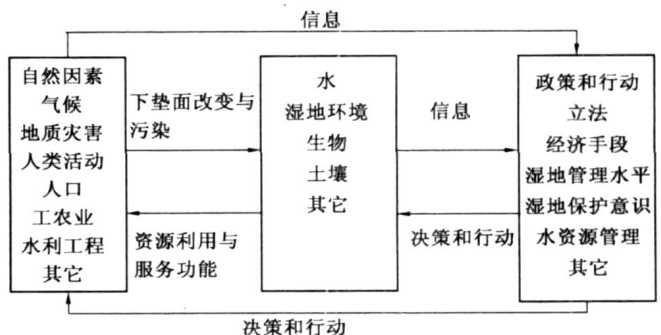


图 1 压力-状态-响应概念模型

Fig. 1 Pressure-state-response framework

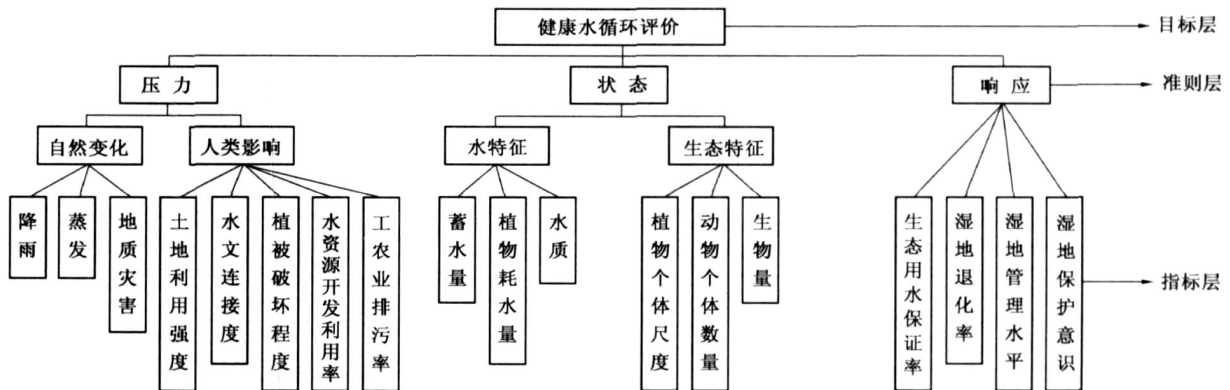


Fig.2 Indicator system of wetland healthy water circulation assessment

### 2.2.1 压力指标

一般可根据人为影响程度把湿地分为4种类型，即完全自然型、受扰自然型、退化自然型、人工型<sup>[6]</sup>。必须现实地意识到，理想的自然湿地状态已趋于消失，大部分湿地均受到人类不同程度的影响<sup>[7]</sup>，人为干扰已经成为湿地的主要压力。人类的各种活动，比如垦殖、各种工程等，改变着湿地的下垫面，使湿地径流过程、蓄水等功能发生变化，指标可以选择土地利用强度，水文连接度和植被破坏程度等。随着社会经济的发展，人口的增长，对水的需求不断地增长，人类对资源的开发利用程度也逐渐增加，这样给湿地用水增加了压力，因此选用水资源开发利用这一指标。工农业活动又向湿地内部排放污水，改变湿地的水环境，使水的功能改变，因此选用工农业排污率，包括污水处理率、农药利用率，化肥利用率等指标。

自然变化包括降水、蒸发和地质灾害。降水和蒸发年际、年内存在着变化，这种变化对湿地水循环产生一定的压力，降水与蒸发的变化将导致水资源状况的较大变化。区域内的地质灾害往往导致地表变化，对湿地水循环产生强烈的影响，如地震导致的崩塌淤塞河道成湖，侵蚀、堆积导致河道变迁，洪泛路径变迁等。地质灾害会对湿地水循环产生更深刻的影响，甚至可以导致湿地的消亡。因此，如果从长时间尺度来对湿地水循环进行评价，应该考虑地质灾害这一指标。

### 2.2.2 状态指标

状态指标是指水循环系统在压力作用下所处的状态。表现在两个方面，一方面是水循环自身的变化，另一方面是气候变化和人类活动通过改变湿地的水文循环过程威胁着湿地生态系统的健康。所以可以选择两方面的指标，水特征和生态特征。水的指标包括蓄水量、植物耗水和水质。蓄水量和水质是水资源的两大重要属性，蓄水量是水循环各个方面的综合，水质则是生物与人群健康的根本保障，两者的有机组合是水生生物生存、水体各种物理过程与生物化学反应得以完成的基本要求<sup>[8]</sup>。生态指标包括植物个体尺度、动物个体数量、生物量，这些指标可以综合地反映湿地生态系统所处的状态，而且这些指标与水分状况息息相关。

### 2.2.3 响应指标

响应指标是管理部门针对压力和状态所采取的管理措施，使湿地水循环尽量遵循自身规律，沿着健康的方向发展，管理措施大多是定性指标，不容易量化。笔者认为可以从以下几个方面考虑：人与湿地争水严重，本来属于湿地的天然来水被人为控制了，所以首先要考虑的就是湿地的水资源配置问题，应该根据当年的水资源状况，根据湿地的不同管理目标进行生态用水配制；是否制定了保护湿地的政策和法规，执行的怎么样；是否有经济来源等；湿地各种管理措施的效果，可用湿地退化率来体现。

### 3 建立湿地健康水循环模糊模式识别模型

湿地健康水循环评价问题具有以下特征：评判客体不存在绝对分明的界限，具有中介过渡性，属于模糊概念；评判主体的思维方法上具有多样性；评判结果在表达上具有口语化的特征<sup>[9]</sup>。因此，不能用一个简单的“是”或“否”，“非此即彼”来回答。对于这种界限(边界)不分明的事物，需要有一种能对事物渐变过程中的不分明性加以描述的数学形式<sup>[10]</sup>。陈守煜<sup>[11]</sup>提出的模糊模式识别模型是处理这类外延边界“模糊不清”问题的最好方法。

#### 3.1 数据规格化处理

设有对模糊概念 $\tilde{A}$ 做识别的 $n$ 个样本集合，每个样本可用 $m$ 个指标特征值表示，则样本集可用 $m \times n$ 阶指标特征值矩阵 $X = (x_{ij})$ 表示。 $x_{ij}$ 为样本 $j$ 指标 $i$ 的特征值； $i = 1, 2, \dots, m$ ； $j = 1, 2, \dots, n$ 。样本集依据 $m$ 个指标按照 $c$ 个级别的指标标准特征值进行识别，则有 $m \times c$ 阶指标标准特征值矩阵 $Y = (y_{ih})$ 。其中 $y_{ih}$ 为级别 $h$ 指标 $i$ 的标准特征值； $h = 1, 2, \dots, c$ 。

评价指标的量纲不同，在进行识别时要先消除量纲的影响，因此首先对评价指标特征值矩阵 $X$ 和指标标准特征值矩阵 $Y$ 进行规格化处理。规格化处理的原理是，根据相对隶属函数的定义，建立对模糊概念 $\tilde{A}$ 进行识别的参考连续统。确定参考连续统关于 $\tilde{A}$ 的两个极点，然后在参考连续统上定义对 $\tilde{A}$ 识别的相对隶属函数。

通常有两种不同的指标类型：指标标准特征值 $y_{ih}$ 随级别 $h$ 的增大而减小；指标标准特征值 $y_{ih}$ 随级别的增大而增大。对于Ⅰ类指标，确定小于、等于指标的 $c$ 级标准特征值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度为0(左极点)，等于、大于指标的1级标准特征值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度为1(右极点)。对于Ⅱ类指标，确定等于、大于指标的 $c$ 级标准特征值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度为0(左极点)。小于、等于指标的1级标准特征值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度为1(右极点)。对于以上两类指标，其特征值介于1级与 $c$ 级标准特征值之间者， $x_{ij}$ 对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度按线性变化确定。则Ⅰ类指标对 $\tilde{A}$ 的规格化公式如式(1)；Ⅱ类指标对 $\tilde{A}$ 的规格化公式如式(2)。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} = y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{ic} < x_{ij} < y_{i1} \\ 1 & x_{ij} = y_{i1} \end{cases} \quad (1) \quad r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} = y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{i1} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1 & x_{ij} = y_{i1} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $r_{ij}$ 为样本 $j$ 指标 $i$ 的特征值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度； $y_{i1}$ 、 $y_{ic}$ 分别为指标 $i$ 的1级、 $c$ 级标准值。类似地，可得指标 $i$ 级别 $h$ 标准值 $y_{ih}$ 对 $\tilde{A}$ 的规格化公式，Ⅰ类指标如式(3)，Ⅱ类指标如式(4)。

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{ic} < y_{ih} < y_{i1} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (3) \quad s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{i1} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $s_{ih}$ 为级别 $h$ 指标 $i$ 的标准值对 $\tilde{A}$ 的相对隶属度。

利用式(1)、式(3)或式(2)、式(4)把指标特征值矩阵 $X$ 、指标标准特征值矩阵 $Y$ 进行数据规格化处理，得到相对隶属度矩阵。

$$R = (r_{ij}) \quad (5)$$

$$S = (s_{ih}) \quad (6)$$

#### 3.2 模糊模式识别模型

将样本 $j$ 的 $m$ 个指标相对隶属度 $r_{1j}$ 、 $r_{2j}$ 、 $\dots$ 、 $r_{mj}$ 分别与矩阵 $S$ 中的第1、2、 $\dots$ 、 $m$ 行的行向量逐一进行比较，可得样本 $j$ 的级别上限值 $b_j$ 和级别下限值 $a_j$ 。

设样本集对  $\tilde{A}$  各个级别的相对隶属度矩阵为

$$U = (u_{hj})_{c \times n} \quad \text{满足约束} \quad \sum_{h=a_j}^{b_j} u_{hj} = 1 \quad (7)$$

式中  $u_{hj}$  为样本  $j$  对  $\tilde{A}$  级别  $h$  的相对隶属度,  $j = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, c$ 。

若样本集指标  $i$  的权重相同, 即  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , 且满足约束  $\sum_{i=1}^m w_i = 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。

则样本  $j$  与级别  $h$  之间的加权广义距离可定义为

$$D_{hj} = u_{hj} d_{hj} = u_{hj} \left\{ \sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ih}) \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (8)$$

式中  $p$  为距离参数。

为了求解样本  $j$  对模糊概念  $\tilde{A}$  的级别  $h$  的最优相对隶属度, 建立目标函数

$$\min \left\{ F(u_{hj}) = \sum_{h=a_j}^{b_j} d_{hj}^2 \right\} \quad (9)$$

根据目标函数式 (9) 与约束条件式 (7) 构造拉格朗日函数, 将等式约束求极值变为无条件极值问题。设  $\lambda_j$  为拉格朗日乘数, 则相应的拉格朗日函数为

$$L(u_{hj}, \lambda_j) = \sum_{h=a_j}^{b_j} u_{hj}^2 d_{hj}^2 - \lambda_j \left( \sum_{h=a_j}^{b_j} u_{hj} - 1 \right) \quad (10)$$

解得模糊模式识别模型

$$u_{hj} = \begin{cases} 1 & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ \frac{1}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \frac{\sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ih}) \left[ \sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ik}) \right]^p}{\sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ih}) \left[ \sum_{i=1}^m w_i (r_{ij} - s_{ik}) \right]^p}} & a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} > 0 \\ 1 & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

### 3.3 层次分析法赋权

在模糊模式识别中应考虑到各指标高低有所不同, 在总的评价中所起的作用亦有所差别。因此有必要对各参评因子赋予权重, 目前比较常用的方法是层次分析法。其基本步骤为<sup>[12]</sup>: 根据研究问题建立层次结构模型; 构造判断矩阵; 层次单排序及其一致性检验; 层次总排序; 层次总排序的一致性检验。

## 4 扎龙湿地健康水循环评价

扎龙自然保护区位于黑龙江省齐齐哈尔市东南。地理坐标: 46°52' ~ 47°32' N, 123°47' ~ 124°37' E。嫩江支流乌裕尔河、双阳河流至下游, 失去明显河道, 河水漫溢形成大面积永久性和季节性淡水沼泽地, 并以无数小型浅水湖泊、广阔的芦苇沼泽和草甸为主要特征。北高南低, 中间低洼, 东西地势高, 整个湿地自北向南呈三角形。本区属寒温带大陆性季风气候, 年平均气温 2~4℃。

### 4.1 评价指标选取和评价标准

#### 4.1.1 评价指标选取

根据评价的科学要求和可操作性, 即要保证健康水循环指标体系的完整性, 又要去除具有相关性的指标, 同时要考虑数据的可获得性。

压力指标的选择: 降水、蒸发可以用干旱指数综合反映, 干旱指数 = 水面蒸发(蒸发能力)/降水。人类影

响选择用土地利用强度、水文连接度和植被破坏程度。土地利用强度 = (居民地面积 + 耕地) / 湿地总面积; 水文连接度, 表示在湿地内所修建的各种工程, 如各种渠道、水库、闸坝等, 破坏了湿地上、中、下游水体的连通性, 破坏了湿地原有的水文格局, 对该指标进行定性描述。植被破坏程度也为定性指标。没有选择水资源开发利用率和工农业排污率, 这是因为水质可以反映工农业排污率。扎龙湿地水源受人为控制, 生态用水保证率可以代替水资源开发利用率。

状态指标的选择: 用蓄水量、植物耗水量、水质。蓄水量指标是水循环过程的综合反映, 湿地水面积的扩大与缩小, 关系到各种植物之间的相互演替, 各种动物的生存, 因此这里选用湿地水面面积代替蓄水量。生态指标没有选择, 一是缺乏生态资料, 二是植物耗水量可以在一定程度上反映植物个体尺度和生物量, 水面面积可以影响关键鸟类丹顶鹤的数量。

响应指标的选择: 用生态用水保证率和湿地退化率。对于扎龙湿地, 其水源主要为天然降水, 乌裕尔河和双阳河的天然来水, 还有嫩江的洪泛水量。目前的状况是, 乌裕尔河和双阳河在扎龙湿地的入口处都有控制性的工程——水库, 嫩江也有堤坝, 本来是天然的来水, 已经转为了人为控制, 所以生态用水保证率, 对于湿地的生存尤为重要。湿地退化率 = 湿地盐碱化面积 / 湿地总面积。生态用水保证率和湿地退化率可以综合反映湿地管理水平。

#### 4.1.2 评价标准

评价标准直接影响到评价结果的合理性。目前对于湿地健康水循环的评价, 尚缺少研究。综合来看, 湿地健康水循环的评价标准具有相对性特征, 处于不同区域、不同规模、不同类型的湿地, 评价标准亦不同。评价标准的确定是湿地健康水循环评价的重点与难点。

分级采用通用的 5 级分级标准: 很健康、健康、亚健康、一般病态和病态。评价指标一共选择 9 个。对水文连接度和植被破坏程度两个定性指标, 分别对各个级别进行了特征描述, 以分值阈“1、2、3、4、5”代表 5 个级别的标准。水面面积、植物耗水和生态用水保证率的分级标准, 采用笔者用生态水面法计算的扎龙湿地生态环境需水量结果, 分为三个级别: 最小、中等和理想, 根据其含义, 分别对应于一般病态、健康、很健康<sup>[13]</sup>。亚健康与病态取相邻两者的平均值。生态用水保证率是取理想生态用水为 100%, 然后再计算中等、最小生态用水占理想耗水的百分比。干旱指数级别按照长系列的干旱指数按照不同频率确定。土地利用强度和湿地退化率通过 1986 - 2002 年卫星图片解译计算, 对其实际数值进行 5 级划分。评价标准见表 1。

表 1 扎龙湿地健康水循环评价指标分级标准

Table 1 Classification standard of assessment indicator of healthy water circulation in Zhalong wetland

指标分级标准	干旱指数	土地利用强度	水文连接度 分值阈 1~5	植被破坏程度 分值阈 1~5	水面面积/ km <sup>2</sup>	植物耗水/ mm	水质	湿地面积 退化率/%	生态耗水 保证率/%
很健康	1.1	0	湿地无任何工程,完全处在天然的水文格局之下。	未受扰动的原始植被盖度 > 80%。	858.24	774.3		2	100
健康	1.4	0	湿地内只有极少量的工程,并不影响湿地的天然水文格局。	轻微扰动,有个别外来物种,盖度为60%~80%。	600.01	619.44		4	65
亚健康	1.7	0.1	湿地内工程较多,但是工程建设时考虑到了湿地天然水文格局。	中等盖度,植被质量下降,盖度为40%~60%。	493.68	542.01		6	50
一般病态	2.2	0.2	湿地内工程较多,且没考虑湿地水文格局。	扰动较强烈,植被退化严重,盖度为20%~40%。	387.35	464.58		8	35
病态	2.8	0.3	湿地内工程纵多,且没考虑湿地水文格局。	植被稀疏,退化很严重,盖度 < 20%。	193.67	309.72		10	20

## 4.2 评价结果与分析

### 4.2.1 数据来源

选择 1986、1988、1989、1998 - 2002 年作为评价对象。遥感数据选择这 8 年的美国 Landsat TM 标准假彩色

合成遥感影像，对其进行解译，将其土地类型分为：耕地、居民地、湖泊、水库、草地、盐碱地、芦苇沼泽、明水沼泽等 7 类。扎龙湿地 1956 - 2002 年的蒸散发资料和降水资料。湿地内的工程布置分布图，用以分析水文连接度。植被破坏程度通过查阅相关历史资料和现场调查确定。水质资料选取的评价指标是  $COD_{Mn}$ 、 $BOD_5$ 、TP、TN，水质分级标准以 GB3838-2002 为依据，水质共分为 5 个评价等级，采用灰色聚类法对各年进行综合评价。最后得出 1986 为 ，1988 为 ，1989 为 ，1998、1999、2000 为 ，2001 和 2002 均为 。

4.2.2 结果与分析

通过层次分析法确定各层权重与层次排序总权重(表 2)，将各数据进行规格化处理，代入式(9)，取  $p = 2$ ，从而计算出各研究年份对各级健康的隶属度与各年压力、状态、响应 3 要素对各级健康级别的隶属度，级别的确定，采用最大隶属度原则(表 3、表 4)。

表 2 扎龙湿地健康水循环指标权重计算结果

Table 2 Results of index weight for healthy water circulation in Zhalong wetland

准则层	权重	因素层	权重	指标层	权重
压力	0.200	自然变化	0.255	干旱指数	0.051
		人类影响	0.745	土地利用强度	0.037
				水文连接度	0.075
				植被破坏程度	0.037
状态	0.400	状态	0.400	年均水面面积	0.171
				植被耗水	0.057
				水质	0.171
响应	0.400	响应	0.400	生态补水量	0.298
				湿地退化率	0.102

表 3 扎龙湿地健康水循环评价结果

Table 3 Evaluation results of healthy water circulation in Zhalong wetland

年份	模糊识别评判矩阵					评价结果
	很健康	健康	亚健康	一般病态	病态	
1986	0.11	0.30	0.34	0.17	0.08	
1988	0.26	0.28	0.23	0.15	0.09	
1989	0.05	0.18	0.40	0.28	0.09	
1998	0.25	0.28	0.23	0.15	0.09	
1999	0.09	0.23	0.33	0.24	0.11	
2000	0.00	0.06	0.14	0.44	0.36	
2001	0.00	0.06	0.14	0.47	0.34	
2002	0.13	0.33	0.31	0.16	0.08	

总体上看，1986 年、1988 年和 1989 年按照最大隶属度原则分别为亚健康、健康和亚健康。1981 - 1988 年湿地处于丰水段，除 1982 年为枯水年，其余年份平均降水量为 524.4 mm，比多年平均多 105.6 mm，水量比较充沛。1989 年虽为枯水年，但是湿地内已经储蓄一定的水量，可以维持湿地健康的水循环。但有两年处于亚健康状态，1988 年虽为健康状态，但其对亚健康、一般病态和病态隶属度之和达到 0.47。原因在于压力指标健康级别较低，均为 级。植被破坏程度，草原高度由 20 世纪 60、70 年代的 80 cm 下降到 46 cm，盖度由 90 % 下降到 75 %，芦苇面积、质量也有所下降。土地利用强度为 12 %、12 % 和 13 %，变化不大，但所占比例大。水文连接度均处于 级。状态指标均为 级，这主要是因为水质均为 级以上。

1998 年、1999 年分别为健康和亚健康。1998 年嫩江大洪水，湿地成为泄洪区，水源充足，部分抵消了人类压力的影响，所以湿地水循环处于健康状态；1999 年虽然降水量减少，为平水偏枯，但由于受到 1998 年大

表 4 压力、状态、响应评价结果

Table 4 Assessment result of pressure, state and response

年份	压力	状态	响应
1986			
1988			
1989			
1998			
1999			
2000			
2001			
2002			

水的影响,湿地内仍储存着一定量的水,水循环仍然保持到亚健康。但 1999 年之后 2000 年、2001 年湿地就严重缺水,其评价均为Ⅲ级。一方面原因是 2000 年、2001 年为枯水年,干旱指数为 2.46、2.88,更主要是因为人类对下垫面的破坏。进入 90 年代,草原植被明显出现逆向演替。2000 年和 2001 年湿地火灾对湿地植被、尤其是芦苇产生了严重的破坏。土地利用强度 2000 年为 13%、2001 年为 13%。水文连接度均处于Ⅲ级。这些导致湿地蓄水功能降低,1998 年大水后到 2000 年就明显缺水。此外,干旱年份生态用水保证率又低,2000、2001 年响应指标级别为Ⅲ级。2002 年为平水年,降水量比 1999、2000、2001 年有所增加,且通过水资源管理,为湿地补水 3.5 亿  $m^3$ ,使湿地水循环状况从 2001 年的恶性状态下有所恢复,评价结果为健康,但对亚健康的隶属度也占到了 0.31。

扎龙流域蒸发大于降水,这是来自自然的压力。但更主要压力来自人类。洪泛是强制性的震荡式补水,漫溢是温和缓慢的滋润沼泽使湿地水分饱和,漫溢是沼泽形成和发育的自然机制。湿地下垫面的破坏,改变湿地水流的流动方式。近 20 年扎龙湿地内修建的引、排水干渠、堤坝和公路等起到阻水、隔水、束水、雍水等作用,影响了湿地中水流的自然交换,水文连接度很差,很多区域湿地不能够参与洪泛补水。因此,应该先恢复湿地下垫面,达到丰水年湿地蓄水,以丰养枯。扎龙湿地的天然来水均被人为控制,因此应该把湿地作为一个用水部门,保证湿地不同管理目标下的生态用水量,这是人类对湿地健康水循环受损的响应措施。水质是扎龙湿地健康水循环的重要影响因素。

## 5 结 论

(1) 湿地健康水循环评价是湿地研究中的一个新领域,目前有关这方面的研究鲜见相关的文献。本文对湿地健康水循环的概念进行剖析,确定湿地健康水循环的影响因素,以压力-状态-响应模型为主线,根据湿地水循环的特点,设计了广义的湿地生态系统健康评价指标体系。该指标体系回答了关于健康水循环这样的问题:发生了什么(状态),为什么发生(压力)、以及如何做(响应)。最终为湿地的水资源规划和管理提供依据。并根据湿地健康水循环评价的特点,选择陈守煜提出的模糊模式识别模型为评价模型,权重利用层次分析法确定,建立了定性 with 定量相结合的模糊层次综合分析法。

(2) 对扎龙湿地 1986 - 2002 年水循环状况进行了实证研究。评价指标的选取遵循以下原则:注意数据的可获得性;保证评价指标体系的完整性;去除指标间的相关性。分级采用通用的 5 级分级标准,分为很健康、健康、亚健康、一般病态和病态。分级标准值来自于遥感资料、历史资料、野外调查、国家标准和笔者的研究成果。评价结果与湿地实际情况进行对比分析,证明了评价体系及模型的正确性。

(3) 扎龙湿地健康水循环问题,主要来自于人类对下垫面的改变,致使湿地水流运动发生变化,蓄水功能下降,其次是工农业污水对湿地的污染,使湿地水环境功能下降。所以保证湿地生态用水,改善湿地下垫面状况,尽可能恢复湿地的天然水文情势,控制污染,是保证湿地健康水循环的途径。

(4) 健康的湿地水循环维系着湿地的生存与发展,对其研究具有相当重要的意义。本研究首次提出了湿地健康水循环的概念,并建立了评价指标体系。但是,湿地健康水循环的概念及其评价应该是一个逐步发展的理论体系,有待于进一步的探讨和完善。

### 参考文献:

- [1] 田 迅,卜兆君,等. 松嫩平原湿地植被对生境干-湿交替的响应[J]. 湿地科学, 2004, 2(2):122 - 127.
- [2] 田 迅,卜兆君. 莫模格湿地干-湿界面优势植物种群动态分析[J]. 四川草原, 2004(11):11 - 13.
- [3] 邓 伟,潘响亮,栾兆擎. 湿地水文学研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4):521 - 527.
- [4] 麦少芝,徐颂军,潘颖君. PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. 热带地理, 2005, 25(4):317 - 320.
- [5] 全 川. 环境指标研究进展与分析[J]. 环境科学研究, 2000, 13(4):53 - 55.
- [6] 崔宝山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 . 理论[J]. 生态学报, 2002, 22(7):1005 - 1011.
- [7] 崔宝山,杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3):31 - 36.



- [8] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 349 - 355.
- [9] 徐向阳, 高学平. 模糊数学在海水入侵地下水水质评价中的应用[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 64 - 69.
- [10] 尚守忠, 田世义. 水资源及其利用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1993. 238 - 249.
- [11] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 24 - 31.
- [12] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [13] 周林飞, 许士国, 李青山, 等. 扎龙湿地生态环境需水量安全阈值的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 845 - 851.

## Healthy water circulation assessment of Zhalong wetland based on PSR model<sup>\*</sup>

ZHOU Lin-fei<sup>1,2</sup>, XU Shi-guo<sup>1</sup>, SUN Wan-guang<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

**Abstract :** Based on the analysis of healthy water cycle concept of wetland and its connotation, and the pressure-state-response (PSR) conceptual model for wetland healthy water cycle is proposed. The assessment indicator system for wetland healthy water cycle is established based on the model. The indicator system aims to explore relationships between the pressure and the wetland healthy water cycle change, and proposes the corresponding improvement measures. The fuzzy pattern recognition model is used to evaluate healthy water cycle of wetland, the calculating weighting method of each indicator is of analytic hierarchy process. Furthermore, the above theory and method are applied to the case study of Zhalong wetland to reveal their health grades and disadvantages. According to the choice principle of the indicator, the 9 indicators are selected. The five-grade assessment standard is adopted. The comparison shows that the evaluation result of this method is in accordance with the actual situation of Zhalong wetland.

**Key words :** pressure-state-response model; Zhalong wetland; healthy water cycle; indicator system; assessment

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50139020).