

扎龙湿地水环境可持续性度量研究

王永洁^{1,2}, 邓 伟³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2 齐齐哈尔大学理学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 湿地水环境的持续性度量的指标体系是从湿地水环境系统结构、功能状态和人为因素三个方面构建的。扎龙湿地水环境可持续综合指数的数学模型是: 可持续综合指数 $P = 0.14P_1 + 0.47P_2 + 0.3P_3 + 0.09P_4$ 。分指数 (PI) 分别是: 水质指数、水资源量指数、生物指数和土地利用变化指数。计算过程运用了灰关联分析法、层次分析法和分段线性函数等方法, 结果表明, 扎龙湿地水环境可持续性的总体趋势在减弱, 其影响因子已经不利于扎龙湿地生态系统的持续发展。

关 键 词: 扎龙湿地; 湿地水环境; 可持续性度量; 可持续指数

中图分类号: P941.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2006)06-0722-06

引 言

湿地水环境是指与湿地生态系统中的水相互关联、相互作用的各要素的集合。包括水体(水量、水质)、水生生物及土壤(底泥)等。湿地水环境是控制湿地发生、发展的最基本因子, 其水文情势直接控制着湿地的地下水补给、径流调蓄和气候调节等水文功能^[1]。水是湿地形成的先决条件 and 环境因素, 水资源量的多少决定了湿地面积的大小。而湿地面积的大小与湿地生态系统对环境的适应能力和调节能力呈正相关关系^[2]。同时, 湿地水环境也是对人为扰动最敏感的环境因子之一。

湿地水环境可持续性特征是湿地水环境系统本身不稳定属性的表现, 是系统结构、功能状态在人类活动干扰及气候变化等自然因素作用下具有的弹性、脆弱性、平衡性和稳定性综合反映。“建立湿地综合评价指标体系, 评估国家重要湿地”被确定为中国湿地保护行动计划优先项目之一^[3]。

扎龙湿地是河流蔓延形成的淡水沼泽地, 是国际重要湿地, 也是国家级自然保护区^[4]。扎龙湿地的价值主要体现在其生态系统的自然性、代表性、典型性和完整性上。受自然因素和人为因素的影响, 扎龙湿地的水环境问题日益严重, 主要表现

是: 水资源短缺, 湿地萎缩; 水质污染, 生态环境恶化; 野生动植物资源减少, 鹤类为主的生物多样性保护受到威胁。因此, 进行扎龙湿地水环境可持续性度量研究迫在眉睫。

1 扎龙湿地水环境可持续性度量的指标体系

指标体系是由若干相互联系、相互补充、具有层次性和结构性的指标组成的有机系列^[5]。湿地水环境可持续性度量指标体系应该具有表征功能、整体协调功能、逐级进行量化功能和预警功能。扎龙湿地水环境可持续性度量的指标体系包括四个层次: 目标层、控制层、准则层和因子层(图 1)。度量的目标是保护扎龙湿地生态系统的可持续性。扎龙湿地生态系统的可持续性强调湿地生态系统的结构和功能, 受人为因素的扰动, 可改变扎龙湿地水环境的结构, 影响湿地生态系统的功能, 因此, 扎龙湿地水环境可持续性度量的指标体系的控制层主要从系统结构、系统功能和人为干扰这三个方面构建。控制层控制着目标层的实现, 同时又依赖于准则层的协调。准则层的各个指标可综合成四个方面, 即: 水质、水量、生物和土地利用, 并进一步由这 4 个方面构建度量的指标因子。

收稿日期: 2005-12-18 修订日期: 2006-08-14
基金项目: 黑龙江省自然基金项目(G0219)与黑龙江省普通高等学校骨干教师创新能力计划项目(1055G060)资助。
作者简介: 王永洁(1963-), 女, 辽宁庄河人, 教授, 博士研究生, 主要研究方向为水资源与水环境。E-mail wangyongjie-63@163.com

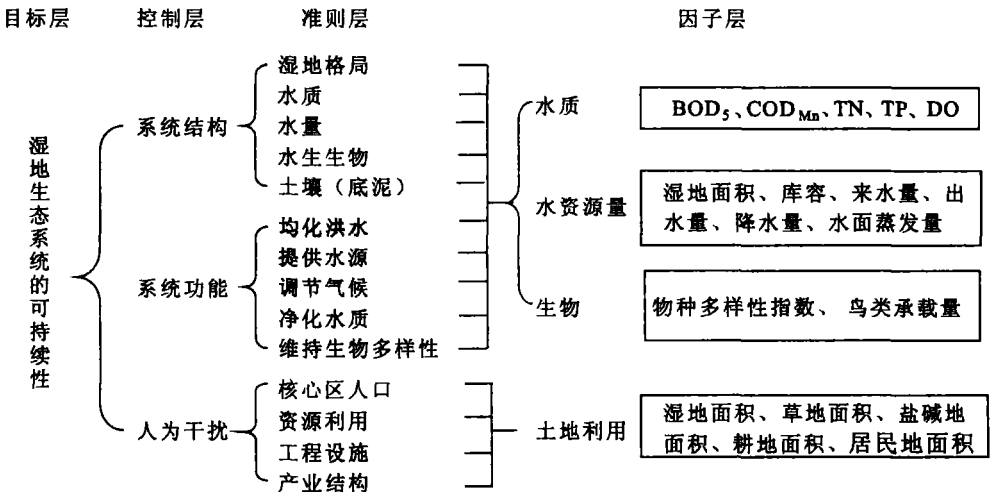


图 1 扎龙湿地水环境可持续性度量指标体系

Fig 1 Preliminary measurement index system of Zhalong wetland water environment sustainability

2 扎龙湿地水环境可持续性度量的数学模型

湿地水环境可持续性度量的数学模型是:

$$P = \sum_{i=1}^n W_i P_i \tag{1}$$

式中, P 为湿地水环境可持续综合指数; n 为分指数的个数, $n = 4$; P_i 为第 i 个可持续分指数, 分别是: P_1 为水质指数; P_2 为水资源量指数 (水量指

数); P_3 为生物指数; P_4 为土地利用变化指数 (土地指数)。 W_i 为第 i 个可持续分指数的权重。

将可持续分指数 (P_i) 和可持续综合指数 (P) 的评价值划分出 6 个等级, 0~ 5 表示可持续性越来越弱, 所对应的可持续程度从高度可持续到严重不可持续。该判断标准是依据湿地水环境特征和研究区历史时期状况, 具体等级分值是采用专家评分法确定的 (表 1)。

表 1 扎龙湿地水环境可持续指数的判别标准

Table 1 The judgement standard of sustainability index on water environment of Zhalong wetland

水质分指数计算值 (P_1')	< 0	0~ 10	10~ 20	20~ 30	30~ 40	> 40
水质状况	良好	较好	一般	开始污染	中等污染	严重污染
蒸发量与降水量的差值	< 100	100~ 200	200~ 300	300~ 400	400~ 500	> 500
水量供给	良好	较好	一般	开始缺水	中等缺水	严重缺水
鸟类承载量	> 5	5~ 4	4~ 3	3~ 2	2~ 1	< 1
物种多样性	> 2.5	2.5~ 2.3	2.3~ 1.8	1.8~ 1.5	1.5~ 1	< 1
湿地生态功能	良好	较好	一般	开始下降	中等下降	严重下降
湿地率	> 69	68~ 69	67~ 68	66~ 67	65~ 66	< 65
居住率	< 0.92	0.92~ 0.94	0.94~ 0.96	0.96~ 0.98	0.98~ 1	> 1
耕地率	< 10	10~ 11	11~ 12	12~ 13	13~ 14	> 14
湿地状况	良好	较好	一般	开始萎缩	中等萎缩	严重萎缩
分指数评价 (P_i)	0	1	2	3	4	5
可持续综合指数 P	< 1.5	1.5~ 2	2~ 2.5	2.5~ 3	3~ 3.5	> 3.5
湿地水环境状况	良好	较好	一般	开始下降	中等下降	严重下降
可持续程度	高度可持续	中度可持续	一般可持续	弱不可持续	中等不可持续	严重不可持续

2.1 扎龙湿地水环境可持续分指数

2.1.1 水质指数

通过查阅文献和 2002、2003 年采样分析, 扎龙

湿地水体以有机污染为主, 水体富营养化严重。参照黄浦江水质指数^[6], 并选取 DO、COD_{Mn}、BOD₅、总氮、总磷为水质控制指标来计算水质指数 (公式

2)。

$$P_1' = \frac{BOD_{5i}}{BOD_{50}} + \frac{COD_{Mn}}{COD_{Mn0}} + \frac{TN_i}{TN_0} + \frac{TP_i}{TP_0} - \frac{DO_i}{DO_0} \tag{2}$$

式中,下角标为*i*的项表示实测值,下角标为0的项代表相应的评价标准值。评价标准值以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)为准,扎龙湿地是国家级自然保护区,水质评价应执行Ⅱ类水的标准值。

应用公式(2)可计算得出典型年水质指数计算值(*P*₁[']),参照表1中的水质状况判别标准得出相应的扎龙湿地水环境水质分指数(表2)。

2.1.2 水资源量指数

控制水资源量的因子包括:库容、来水量、去水

量、降水和蒸发。
由于指标的系列基础数据不足难以用主成分分析等方法量化,而且湿地水环境具有明显的灰色特征,因此,采用灰色关联分析法^[7],选取水资源量因子中影响扎龙湿地水环境可持续性的主要度量指标。

(1) 确定主要影响因子。应用灰色关联分析的目的是将指标因子排序,确定主要指标。表达式(3)是确定影响扎龙湿地水资源量指数主要因子的灰关联因子集。其中:行表示度量因子,列表示度量时间,第一行是湿地面积(包括湖泊、明水、芦苇沼泽面积),是灰色关联分析的参考序列,其余的行是比较序列。度量时间定为1986、1988、1990、1992、1994、1996、1998、2000年。

时间(*j*)

1986年1989年1999年2000年

参考序列 湿地面积

度量因子(*i*)

库容

来水量

出水量

降水量

水面蒸发量

1408.44

608.21

480.94

141.79

417.85

658.8

1420.58

384.32

94.53

0

517.7

652.51

1430.35

436.93

216.97

0

380.7

665.72

1415.87

125.69

39.61

0

283.45

696.31

(3)

对灰关联因子集中的指标数据进行标准化处理等灰色计算,用excel进行数据运算处理,求出进行相关性排序的参考数据——灰关联度(γ)。得到扎龙湿地水资源量与湿地面积的灰色关联分析结果(表3)。主要影响因子是水面蒸发量,其次是降水量、库容、来水量。

(2) 用分段线性函数确定水资源量分指数。自然情况下,蒸发量和降水量是影响扎龙湿地面积变化的主要影响因子,二者之差反映水量损失。参照评价标准(表1)确定扎龙湿地的水资源量分指数(表2)。

表2 典型年扎龙湿地水环境可持续性指数

Table 2 Sustainability index of water environment of Zhalong wetland in certain years

年份(年)	1984	1986	1988	1990	1997	1999	2000
水质指数(<i>P</i> ₁)	2	1	2	5	5	2	3
水量指数(<i>P</i> ₂)	1	2	1	3	3	2	4
生物指数(<i>P</i> ₃)	1	1	1	2	2	2	2
土地指数(<i>P</i> ₄)	2	2	2	2	3	3	3
综合指数(<i>P</i>)	1.23	1.56	1.23	2.89	2.98	2.09	3.17
可持续性评价	高度可持续	中度可持续	高度可持续	弱不可持续	弱不可持续	一般可持续	中等不可持续

2.1.3 生物指数

生物指数考虑两个方面:物种多样性和重点鸟类的承载量。湿地重点鸟类承载量(*Q*)反映湿地的生境质量,选定扎龙湿地的重点鸟类15种,包

括:丹顶鹤、白枕鹤、白鹤、灰鹤、白头鹤、苍鹭、草鹭、白鹳、大白鹭、白鹇、大鸨、鸬鹚、白琵鹭、雁形目、鸨形目。可以用下列公式表示:

$$Q = N/S \tag{4}$$

式中, Q 为湿地重点鸟类承载量; N 为重点鸟类总数; S 为湿地总面积。

用香农 (Shannon) 指数^[8]表示生物群落的种类和个体数量的数值。

$$\bar{d} = - \sum_{i=1}^a \left(\frac{n_i}{N} \right) \lg_2 \left(\frac{n_i}{N} \right) \tag{5}$$

式中, $\bar{d}$ 为物种多样性指数, a 为生物的种类数, N 为群落的个体总数, n_i 为 i 种的个体数。

根据扎龙保护区主要鹤类调查统计, 参照评价标准 (表 1), 并得出扎龙湿地水环境物种多样性指数、承载量与生物分指数 (表 2)。

2 1 4 土地利用变化指数

因不合理的土地利用方式, 导致湿地水调节功能明显下降^[9]。以湿地面积 (包括湖泊、明水、芦苇沼泽面积) 作为参考序列, 同样运用灰色关联分析法得到土地利用类型中影响可持续性的主要因子排序 (表 4)。

按土地利用类型对湿地面积的影响程度, 影响最大的是居民地面积, 其次是耕地、盐碱地、草地面积的变化。现选取湿地面积 (湖泊、明水、芦苇沼泽)、居民地面积、耕地面积为主要指标, 参照土地利用类型分指数评价标准 (表 1), 用三个主要指标占扎龙湿地总面积百分比的分段线型函数确定扎龙湿地和扎龙湿地水环境土地利用变化分指数 (表 2)。

2 2 扎龙湿地水环境可持续分指数的权重

用层次分析法 (AHP)^[10]并结合特尔斐法^[11]确定分指数的权重。首先建立有序递阶指标系统, 通过指标之间的两两比较对系统中各指标予以优劣评判, 并利用这种评判结果来综合计算扎龙湿地水环境可持续分指数的权重系数。

1) 用层次分析法构造判断矩阵。将分指数两两对比, 按扎龙湿地水环境各分指数 P_i 针对可持续综合指数 P 的相对重要性状况构造判断矩阵。

表 3 扎龙湿地水资源量与湿地面积的灰关联分析

Table 3 Grey relation analysis between water quantity and wetland area of Zhalong wetland

时间	1986	1989	1999	2000	灰关联度 (γ)	相关性
湿地面积 (km ²)	1408.44	1420.58	1430.35	1415.87		
库容 (10 ⁸ m ³)	608.21	384.32	436.93	125.69	0.809736325	3
来水量 (10 ⁸ m ³)	480.94	94.53	216.97	39.61	0.687586865	4
水资源量						
出水量 (10 ⁸ m ³)	141.79	0	0	0	0.48330039	5
降水量 (mm)	417.85	517.7	380.7	283.45	0.886102616	2
水面蒸发量 (mm)	658.8	652.51	665.72	696.31	0.987881489	1

表 4 扎龙湿地土地利用类型与湿地面积的灰关联分析

Table 4 Grey relation analysis between land use type and wetland area in Zhalong wetland

时间	1986	1989	1999	2000	灰关联度 (γ)	相关性
湿地面积 (km ²)	1408.44	1420.58	1430.35	1415.87		
草地面积 (km ²)	372.67	314.35	278.56	296.28	0.688765584	3
土地利用						
盐碱地面积 (km ²)	57.47	101.26	105.81	105.57	0.498890873	4
耕地面积 (km ²)	242.38	244.67	264.89	261.92	0.830089602	2
居民地面积 (km ²)	19.29	19.39	20.61	20.61	0.865236053	1

2) 用特尔斐法, 确定判断矩阵中的 b_{ij} 值。通过专家问卷, 以及对问卷的统计分析和再次选择判断等过程, 确定了各分指数 P_i 针对 P 的相对重要性 b_{ij} , 构成了对角判断矩阵 X 。 b_{ij} 是对于综合指数而言, 分指数 P_i 比 P_j 的重要性值, i 和 j 取值均为 1~4 P_i 和 P_j 均是扎龙湿地水环境可持续性度量的四个分指数, 表达式 (6) 是判断矩阵 X 。

3) 应用 Matlab 计算满足: $XW = \lambda_{\max} W$ 的特

$$X = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{41} & b_{42} & \dots & b_{44} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 2 & 5 \\ 3 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{vmatrix} \tag{6}$$

征根 $\lambda_{\max}$ 和特征向量 W 。判断矩阵 X 最大的特征根 $\lambda_{\max}$ 为 4.064 8 对应于 $\lambda_{\max}$ 的特征向量 W 则为 $[0.240\ 4\ 0.811\ 0\ 0.512\ 4\ 0.147\ 9]^{-1}$; 特征向量 W 的归一化向量为 $(0.14\ 0.47\ 0.3\ 0.09)$ 。该向量的分量就是分指数元素排序的权重值。

4) 进行一次性检验。如果一次性检验通过,说明可持续分指数的权重合理。利用一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 、随机一致性比例 $CR = \frac{CI}{RI}$ 和层次分析中平均随机一致性指标的标准,如果 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.10$ 则一次性检验通过。扎龙湿地水环境可持续分指数 $n = 4$ 对应的平均随机一致性指标的标准 $RI = 0.9$ 将 $\lambda_{\max} = 4.064$ 代入公式,可计算出 CI 和 CR : $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.064 - 4}{4 - 1} = 0.021\ 6$ $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.021\ 6}{0.9} = 0.024$ 可见, $CR = 0.024 < 0.10$ 因此,一次性检验通过。

2.3 扎龙湿地水环境可持续综合指数的数学模型

根据扎龙湿地可持续分指数 P_i 相对综合指数 P 的判断矩阵 X 所得出的分指数指标元素排序的权重值 $(0.14\ 0.47\ 0.3\ 0.09)$, 得出扎龙湿地水环境可持续综合指数的数学模型是:

$$P = \sum_{i=1}^n W_i P_i = 0.14P_1 + 0.47P_2 + 0.3P_3 + 0.09P_4 \tag{7}$$

其中, P_1 为水质指数; P_2 为水资源量指数; P_3 为生物指数; P_4 为土地利用变化指数。

3 扎龙湿地水环境可持续性分析

实现湿地水环境可持续的关键是满足湿地水环境系统对影响因子的需求和系统自身的协调发展。由于在某一时段湿地水环境系统的影响因子是不断变化的,因此,其可持续性具有动态意义。根据扎龙湿地水环境可持续性各分指数和综合指数的判别标准(表 1),应用扎龙湿地水环境可持续综合指数的数学模型(公式 7),得出典型年扎龙湿地水环境可持续性指数(表 2)。

上述度量结果与扎龙湿地的实际情况相符,说明该数学模型具有可操作性。在此基础上,将 1985、1987、1989、1991~1995、1998 年扎龙湿地鸟类数量和 1986、1987、1991~1996 年的土地利用变化进行了相似性差补,并应用数学模型得出扎龙湿

地其余年份水环境可持续综合指数,同时得出扎龙湿地水环境可持续性的变化趋势(图 2)。

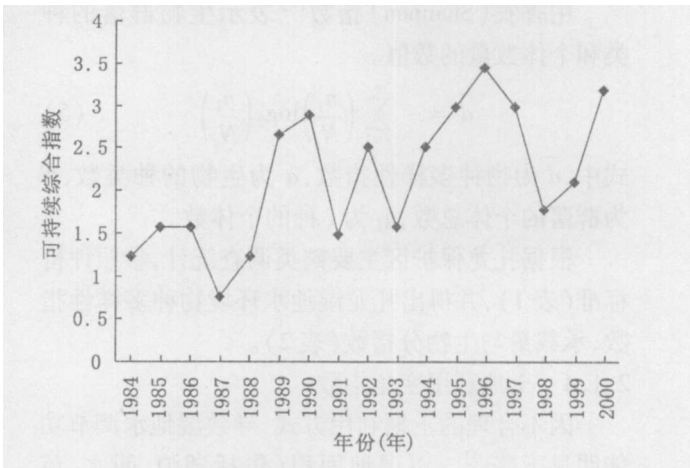


图 2 扎龙湿地水环境可持续综合指数变化趋势

Fig 2 Integrated index dynamics of water environment sustainability of Zhalong wetland

由图 2 可见,扎龙湿地水环境可持续综合指数在某一时段内具有波动性,进入 20 世纪 90 年代,扎龙湿地水环境可持续性以弱不可持续为主,到 2000 年是中等不可持续,说明扎龙湿地水环境可持续性的潜力在减弱,风险在增加。而且随着时间的推移,综合指数变化曲线的底部在不断抬升。

4 结 论

1) 可持续发展是一个动态过程,可持续性度量是针对不同类型的对象在一定时空范围内进行的,时空变化对度量对象的可持续性有重要影响。扎龙湿地水环境可持续性度量的数学模型可以应用于所有湿地水环境的可持续性度量,但指标体系只可以应用于同类湿地——沼泽湿地的水环境可持续性度量研究。

2) 度量指标的概念必须明确,要具有科学内涵,指标体系代表的信息量要大,既能全面反映湿地水环境系统的主要特征和状况,又要避免指标间相互干扰,并使所选指标具有简明、可测、可比的特点。

3) 可持续分指数和可持续综合指数的判别标准要明确。用公式法求得了水质指数计算值和生物指数的主要度量因子:物种多样性、重点鸟类的承载力;用灰色关联分析法选取水资源量和土地利用因子中影响扎龙湿地水环境可持续性的主要

度量指标。采用分段线形函数法, 并对应判别标准得出可持续分指数。

4) 用层次分析法 (AHP) 并结合特尔斐法确定了扎龙湿地水环境可持续分指数的权重系数。

5) 根据扎龙湿地可持续分指数 P_i 及其权重值得出的扎龙湿地水环境可持续综合指数的数学模型是: $P = \sum_{i=1}^n W_i P_i = 0.14P_1 + 0.47P_2 + 0.3P_3 + 0.09P_4$ 。而且随着时间的推移, 综合指数变化曲线的底部在不断抬升, 说明湿地水环境的影响因子在未来总体趋势上不利于扎龙湿地生态系统持续发展, 可持续性的总体趋势在减弱。

参考文献:

[1] 邓伟, 胡金明. 湿地水文学研究进展及科学前沿问题 [J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 12~20.
[2] 刘振乾, 王建武, 骆世明, 等. 基于水生态因子的沼泽安全阈值研究——三江平原沼泽为例 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1610~1614.

[3] 国家林业局 (编制). 中国湿地保护行动计划 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
[4] 吴长申. 扎龙国家级自然保护区自然资源研究与管理 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1999. 1~6
[5] 曹利军, 王华东. 可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究 [J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 526~529
[6] 刘培桐. 环境学概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995. 178
[7] 邓聚龙. 灰色系统理论教程 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
[8] Levins R. Evolution in Changing Environments. Some Theoretical Explorations [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1968.
[9] 邓伟, 翟金良, 闫敏华. 水空间管理与水资源的可持续性 [J]. 地理科学, 2003, 23(4): 385~390
[10] Saaty T L. An exposition of the AHP in reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process" [J]. Management Science, 1990, 36(3): 259~268
[11] Linstone H, Turoff M. The Delphi method: Techniques and applications [M]. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1975

Sustainability Measurement of Water Environment in the Zhalong Wetland

WANG Yong-Jie^{1,2}, DENG Wei³

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130012
2. The Science Department of Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041)

Abstract The index system of sustainability measure of water environment is constructed by wetland water environment structure, the state of wetland functions and human factors. The mathematical model of integrated sustainability index is $P = 0.14P_1 + 0.47P_2 + 0.3P_3 + 0.09P_4$, and the sub-indices are water quality, water quantity, creature and land use change indices. In this study, we used gray relation analyses, Analytic Hierarchy Process (AHP) and Subparagraph Linear Function Method to calculate the integrated index (P). The results show that the overall trend of water environment sustainability in Zhalong wetland is declining and its impact factors are detrimental to the sustainable development of Zhalong wetland.

Key words Zhalong wetland, wetland water environment, sustainability measurement, sustainability index