

Analyzing and Assessing on the Ecological Environment Health of Wetlands in Sanjiangyuan

Min Chang^{1,2,3,4}

¹Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

³Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi
Email: 526885826@qq.com

Received: Sep. 3rd, 2019; accepted: Sep. 18th, 2019; published: Sep. 25th, 2019

Abstract

Based on the theory of ecosystem health, this paper constructs an ecological health evaluation system based on landscape pattern index-based vitality-organization-elasticity-ecosystem services, and studies the ecological health of Sanjiangyuan wetlands. Using the hierarchical analysis method (AHP) to determine the evaluation index and the weight of each plaque type, combined with the calculated landscape pattern index value, the ecological health status of wetland environment in Sanjiangyuan area was evaluated by the comprehensive index method. By comparing the landscape index values in 2018 and 1988, it is shown that the landscape fragmentation of Sanjiangyuan wetland severity increases, the landscape heterogeneity increases, the shape of the landscape is complicated and irregularly increases.

Keywords

Wetlands, Sanjiangyuan, Landscape Pattern Index, Ecosystem Health, AHP

三江源湿地生态健康状况的评价

常敏^{1,2,3,4}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

²自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

³陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

Email: 526885826@qq.com

收稿日期: 2019年9月3日; 录用日期: 2019年9月18日; 发布日期: 2019年9月25日

摘要

本文以生态系统健康理论为基础, 构建了以景观格局指数为主的活力-组织力-弹力-生态系统服务的生态健康评价体系, 来研究三江源湿地的生态健康性。采用层次分析法(AHP)确定评价指标及各斑块类型的权重, 结合计算出的景观格局指数值, 利用综合指数法评价了三江源地区湿地环境的生态健康状况。通过对比2018年与1988年的景观指数值表明三江源湿地景观破碎度增大, 景观异质性增强, 景观的形复杂化和不规则化增大。

关键词

湿地, 三江源, 景观格局指数, 生态系统健康, AHP

Copyright © 2019 by author(s) 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

1. 引言

湿地是地球上非常重要的资源, 也是很重要的生态系统。它具有蓄洪防旱、降解污染、调节气候等诸多生态功能, 被誉为“人类摇篮”、“人类基因库”、和“地球之肾”[1]。近些年来, 随着社会的快速发展, 人们对湿地的开垦越来越严重, 许多湿地被破坏, 甚至萎缩和消失。三江源地区是长江、黄河和澜沧江三大河流的发源地, 素有“中华水塔”之称, 区域内水资源涵养功能显著, 是我国主要的水源地之一[2]。其生态环境状况事关全流域以及全国的可持续发展, 是影响全国甚至世界生态安全的“生态源”、“生态阀”, 具有非常重要的生态地位和功能[3]。

80年代, Schaeffer首次提出了有关度量生态健康的问题[4]; Rapport发展了这个观点, 同时对生态系统健康的测定方法进行了探索性研究[5]; Albert选用了部分湿地的主要水生植物覆盖度来评价北美五大湖的湿地生态健康[6]; Dawson等运用生态健康指数法来评价湖泊的生态健康, 采用了0~100的等级(0代表最差的健康状态, 100代表最好的健康状态), 评价了意大利湖的健康状况[7]; 21世纪, Munyati等运用Landsat MSS和TM遥感影像对赞比亚Kafue湿地进行景观斑块面积的动态变化监测研究, 通过该地区不同时段湿地面积的变化规律来反演该区域洪水的时间变化规律[8]; Maing等利用SPOT XS影像数据提取肯尼亚塔纳下游两岸湿地面积动态变化信息, 分析人类活动与沿海湿地景观变化之间的关系[9]。

本研究以黄河的源头玛多县为例, 通过研究三江源湿地的活力、组织力、弹力和生态系统服务, 更清楚地认识到三江源湿地生态建设本质特征, 从而为湿地恢复与保护、湿地生态环境规划和管理提供科学依据, 对促进区域的可持续发展有重要的现实意义。

2. 研究区概况及主要方法

2.1. 研究区概况

三江源保护区气候属青藏高原气候系统, 在青藏高原强大的高原下垫面和周围大致均匀环境场, 巨

大的地理空间孕育出了一个独特的气候单元。全年平均气温一般在 $-6^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 之间, 极端最低气温 -48°C , 极端最高气温 28°C 。年平均降水量一般在 $250\sim 705\text{ mm}$ 之间, 年蒸发量相对较大, 一般在 $730\sim 1700\text{ mm}$ 之间。总的气候特征是年温差小, 日温差大, 日照时间长, 辐射强烈, 风沙大, 植物生长期短, 绝大部分地区无绝对无霜期, 自然灾害频繁。

源区水资源十分丰富, 水质良好。区内河流纵横, 湖泊湿地星罗棋布, 是世界上河流最多、高海拔地区湿地面积最大的保护区, 被誉为“中华水塔”。同时也是我国重要的湿地分布区, 是世界上分布海拔最高的湿地[10]。长江发源于唐古拉山北麓各拉丹东雪山, 在源头称沱沱河, 主要支流有楚玛尔河、布曲、当曲、聂恰曲等, 年平均径流量为 177 亿 m^3 ; 黄河发源于巴颜喀拉山北麓各姿各雅雪山, 主要支流有多曲、热曲等, 年均径流量 232 亿 m^3 ; 澜沧江发源于杂多县杂青乡的果宗木查雪山, 年均径流量为 107 亿 m^3 。源区湖泊湿地总面积在 1 万 km^2 以上。当地居民生活来源主要依赖于草地畜牧业, 这种单一的经济结构导致了对环境的破坏和对草地资源的掠夺式开发[11]。

2.2. 主要研究方法

1) 层次分析法(AHP法)

由于每个指标对生态系统健康的贡献值是不同的, 因此需要定量的确定指标因子的权重。指标因子的权重值发生变化会直接影响到评价结果, 科学定量地给湿地生态系统健康评价指标进行权重赋值显得尤为重要。层次分析法(Antalytical Hieraehy Process, 简称 AHP)是现在常用的一种用来定量分析指标权重的一种方法。这种方法的特点是: 所需的量化数据较少, 对问题的本质以及所涉及的因素和内在关系的比较透彻; 思路简单明了, 将使用者的思维过程数量化、条理化以便于计算。同时也存在一些缺点: 不能为决策提供更加新颖的方法, 而且其所需要的定量数据较少, 定性分析偏多, 缺乏一定的客观性[12]。

2) 综合指数法

综合指数法将各项指标转化为同度量的个体指数, 便于将各项指标综合起来, 以综合指数为综合评比排序的依据。各项指标的权数是根据其重要程度决定的, 体现了各项指标在综合值中作用的大小。综合指数法的基本思路则是利用层次分析法计算的权重和通过 fragstats 计算取得的数值进行累乘, 然后相加, 最后计算出指标的综合评价指数。

3. 数据处理

3.1. 空间数据

以玛多县为例, 空间数据包括2018年的湿地遥感影像数据, 利用 Landsat 卫星影像, 条带号为134-35、134-36、133-35、133-36、133-37、135-35、135-36。遥感影像均为 ETM 数据。本文遥感影像均为5月至10月份, 云量小于10, 比较适合本文研究。

3.2. 遥感影像处理

遥感影像的解译是指从遥感图像上获取目标地物的信息的过程, 有目视解译和计算机解译两种常见的方法[13]。目视解译是指通过直接的观察和借助仪器在遥感图像上获取目标地物特征信息的过程。本研究首先根据全国第二次湿地普查, 将三江源湿地分为四种类型的斑块: class 1 代表湖泊、class 2 代表河流、class 3 代表沼泽化草甸、class 4 代表植被。然后用 Arcmap 软件 NDVI 数字化提取遥感影像, 然后将其转化为 Polygon 格式, 然后结合目视解译的方法进行斑块类别的划分, 如图 1 所示。之后将其转化成 grid 格式并运用于之后景观格局指数的计算中, 将数字化完成的影像图, 通过如下的转换, 即可转化为

arcgrid 格式, 运用 arctools 中的 conversion tools, 分别利用 feature to raster, raster to other format, 即可完成转换。

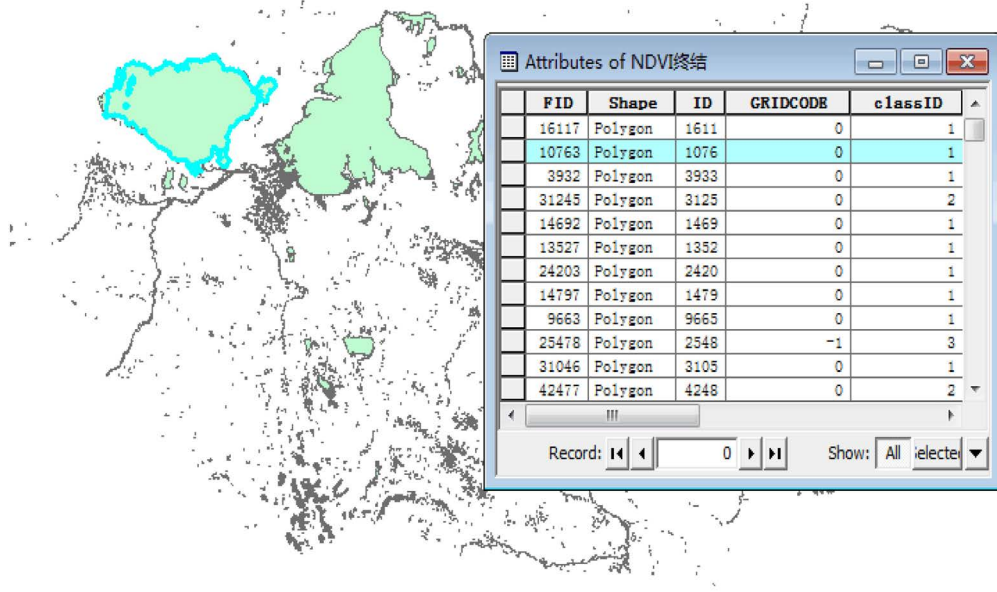


Figure 1. Classified image
图 1. 分类影像图

4. 生态评价

4.1. 评价指标体系的建立

湿地的生态系统功能是由系统功能的转运动态以及景观结构来支持的, 故景观格局在一定程度上对湿地生态系统健康非常重要。景观格局指数是在空间邻接关系的基础上提出来的, 因此可以作为系统健康评价的比较适宜的指标。本研究从三江源区湿地生态系统自身出发, 以景观格局指数为主体建立了三江源湿地生态系统健康评价指标体系, 如图 2 所示。

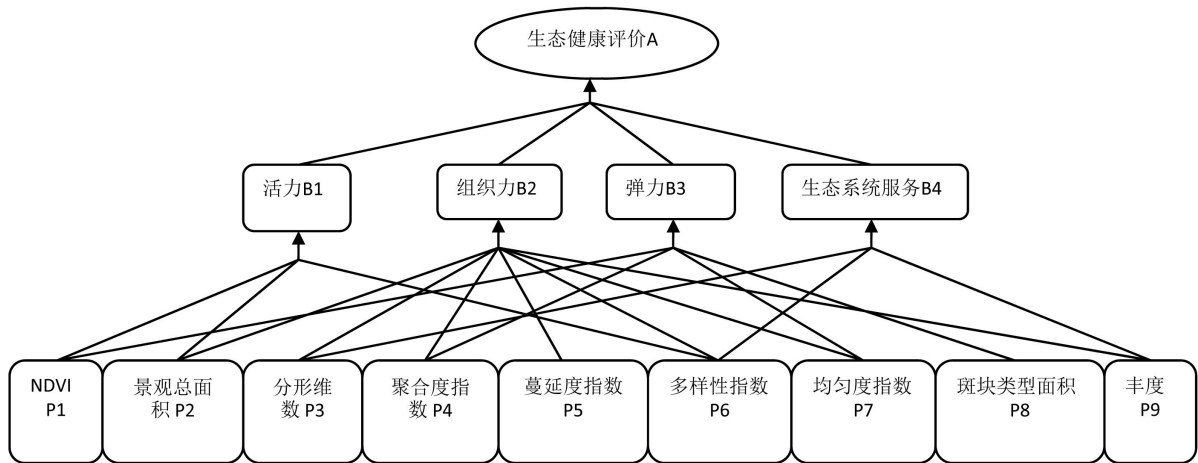


Figure 2. Sanjiangyuan wetland ecosystem evaluation index system (APH Structure)
图 2. 三江源湿地生态系统评价指标体系(APH 结构)

4.2. 评价指标体系的权重赋值

1) 层次分析法确定指标权重

将各层之间的每项因子的联系标出，分层建立比较判断矩阵。矩阵由每一对因子的相对重要性比值构成。求出该层的相对权重，然后逐层推算求出全部因子的权重系数。矩阵中 b_{ij} 为两因子的相对重要标度， b_{ij} 表示对于 A_k 而言，取因子重要性程度对比 b_i/b_j 的比值。一般采用 1、3、5、7 来作为标度，其含义依次为：两个因素一样重要、一个因素比另一个较重要、重要、重要的多；2、4、6 则为两相似判断的中间值，表示折中。而各自的倒数则具有类似相反的意义。矩阵计算后要进行一致性检验，一致性指标 C.I. (Consistency Index)计算公式如下(1)，它的值越大，表明判断矩阵偏离完全一致性的程度越大，C.I.的值越小，表明判断矩阵越接近于完全一致性。对于多阶判断矩阵，引入平均随机一致性指标 R.I. (Random Index)，表 1 给出 1~8 阶正互反 RI 为随机一致性比例。判断矩阵一致性指标 C.I.与同阶平均随机一致性指标 R.I.之比称为随机一致性比率 C.R. (Consistency Ratio)。当 C.R. < 0.10 时，便认为判断矩阵具有可以接受的一致性。当 C.R. ≥ 0.10 时，就需要调整和修正判断矩阵，使其满足 C.R. < 0.10，从而具有满意的一致性。

Table 1. 1 - 8 order positive reciprocal RI consistency index RI

表 1. 1~8 阶正互反 RI 一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{1}$$

首先对准则层和指标层各个要素构建判断矩阵。各层次中要素的排序(相对重要程度)，亦即权重计算，实际上可归结为利用和积法计算判断矩阵的特征向量，再利用公式(2)计算最大特征值。通过计算整理并检验，得到如下权重结果。以表 2~6 为各目标层参评因子的判断矩阵及其计算结果。

Table 2. Judgment matrix of criterion layer B1 (vigorous layer) and its correlation factor P

表 2. 准则层 B1 (活力层)与其相关因子 P 的判断矩阵

B1	P1 (NDVI)	P6 (多样性指数)	P2 (景观总面积)	W_i
P1	1	3	7	0.6434
P6	1/3	1	5	0.2828
P2	1/7	1/5	1	0.0738

备注：经检验 $\lambda_{\max} = 3.0657$ ，其一致性指标 $CI = 0.0329$, $RI = 0.58$, $CR = 0.0567 < 0.1$ 。

Table 3. Judgment matrix of criterion layer B2 (organizational force) and its related factor P

表 3. 准则层 B2 (组织力)与其相关因子 P 的判断矩阵

B2	P5 (蔓延度指数)	P4 (聚合度指数)	P3 (分形维数)	P6 (多样性指数)	P7 (均匀度指数)	P9 (丰度)	P2 (景观总面积)	W_i
P5	1	2	4	5	6	7	9	0.3738
P4	1/2	1	3	4	5	6	8	0.2641
P3	1/4	1/3	1	2	3	4	6	0.1366
P6	1/5	1/4	1/2	1	2	3	5	0.0938
P7	1/6	1/5	1/3	1/2	1	2	4	0.0638
P9	1/7	1/6	1/4	1/3	1/2	1	3	0.0440
P2	1/9	1/8	1/6	1/5	1/4	1/3	1	0.0239

备注：经检验 $\lambda_{\max} = 7.3144$ ，其一致性指标 $CI = 0.0524$, $RI = 1.32$, $CR = 0.0397 < 0.1$ 。

Table 4. Judgment matrix of criterion layer B3 and its correlation factor P
表 4. 准则层 B3 与其相关因子 P 的判断矩阵

B3	P6 (多样性指数)	P1 (NDVI)	P4 (聚合度指数)	P7 (均匀度指数)	P8 (斑块类型面积)	W_i
P6	1	3	5	7	9	0.5028
P1	1/3	1	3	5	7	0.2602
P4	1/5	1/3	1	3	5	0.1344
P7	1/7	1/5	1/3	1	3	0.0678
P8	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0.0348

备注: 经检验 $\lambda_{max} = 5.2426$, 其一致性指标 $CI = 0.0607$, $RI = 1.12$, $CR = 0.0542 < 0.1$ 。

Table 5. Judgment matrix of criterion layer B4 and its correlation factor P
表 5. 准则层 B4 与其相关因子 P 的判断矩阵

B4	P6 (多样性指数)	P9 (丰度)	P3 (分形维数)	W_i
P6	1	3	5	0.6334
P9	1/3	1	3	0.2605
P3	1/5	1/3	1	0.1061

备注: 经检验 $\lambda_{max} = 3.0386$, 其一致性指标 $CI = 0.0193$, $RI = 0.58$, $CR = 0.0333 < 0.1$ 。

Table 6. Judgment matrix of target layer A and criterion layer B
表 6. 目标层 A 与准则层 B 的判断矩阵

A	B1 (活力)	P1 (组织力)	P4 (弹力)	P7 (生态系统服务)	W_i
B1	1	3	5	7	0.5578
B2	1/3	1	3	5	0.2634
B3	1/5	1/3	1	3	0.1219
B4	1/7	1/5	1/3	1	0.0569

备注: 经检验 $\lambda_{max} = 4.1185$, 其一致性指标 $CI = 0.0395$, $RI = 0.90$, $CR = 0.0439 < 0.1$ 。

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{BW_i}{nW_i} \quad (2)$$

最终各参评因子的总权重由公式(3)算得出(表 7)。

Table 7. The total weight of each evaluation indicator
表 7. 最终各评价指标的总权重

A	B1	B2	B3	B4	总权重 W_i
NDVI P1	0.6434	-	0.2602	-	0.3906
景观总面积 P2	0.2828	0.0239	-	-	0.1640
分形维数 P3	-	0.1366	-	0.1061	0.0420
聚合度指数 P4	-	0.2641	0.1344	-	0.0859
蔓延度指数 P5	-	0.3738	-	-	0.0985
多样性指数 P6	0.0738	0.0938	0.5028	0.6334	0.1633
均匀度指数 P7	-	0.0638	0.0678	-	0.0251
斑块类型面积 P8	-	-	0.0348	-	0.0042
丰度 P9	-	0.0440	-	0.2605	0.0264

$$W_i = \sum_{j=1}^3 B_j \cdot P_i \quad (3)$$

B_j ——表示 B 层对于 A 层各相关因子权重;

P_i ——表示 P 层对于 B 层各相关因子权重。

2) 层次分析法确定斑块类型贡献度

根据全国第二次湿地普查, 本研究将湿地分为四种斑块类型: 分别是湖泊、河流、沼泽化草甸、植被四类。沼泽化草甸是区域中最具有生物多样性的草地生态系统, 所以它的贡献度最大。湖泊和河流作为水体一方面直接为人类提供动植物资源, 另一方面在维持生物多样性、生态平衡、涵养水源、净化水质、调节小气候、保持水土、补充地下水均起到重要作用。湖泊是源头, 河流是分支, 因此湖泊的贡献度是大的, 接下来是河流。植被在土壤形成和保护还有原材料价值上比较占优势, 同时也对气体调节、水源涵养和生物多样性有所贡献, 但不及前三个类型。本研究依旧运用层次分析法计算各斑块类型的权重值, 如表 8。

Table 8. Decision matrix of target layer A and criterion layer

表 8. 目标层 A 与准则层的判断矩阵

A	沼泽化草甸	湖泊	河流	植被	W_i
沼泽化草甸	1	3	5	8	0.5578
湖泊	1/3	1	3	6	0.2658
河流	1/5	1/3	1	4	0.1284
植被	1/8	1/6	1/4	1	0.0480

备注: 经检验 $\lambda_{\max} = 4.0602$, 其一致性指标 $CI = 0.0201$, $RI = 0.90$, $CR = 0.0223 < 0.1$ 。

4.3. 湿地生态环境健康性的估算与评价

4.3.1. 健康值的估算

生态健康性随时间、空间的变化而改变, 与自然因子和人为因子相关, 自然因素和人为因素中的某个因子在不同时间和空间范围内作用强度不同, 在一定的时空背景下, 每一因素的改变, 或二者影响的叠加, 都会导致生态系统的变化, 对湿地生态系统健康性产生不同的影响, 导致生态要素和生态系统的结构和功能变化, 进而影响湿地生态系统健康性。所以, 健康性的评价应是在一时间段内的变化情况, 是一个动态的评价, 可随时间的推移, 呈现一定的波动。

利用综合指数法计算三江源区湿地生态系统健康状态综合指数 E 。其他学者是利用专家打分确定其评分值并做归一化处理后分别乘其权重值之和得到总分值用来计算综合健康值[14]。不过这种专家打分的方法相对于通过提取遥感影像计算出来的景观格局指数的值缺乏客观性。因此, 在此利用各个景观格局指数的值 V_i 分别乘其权重值 W_i , 按公式(4)计算。

$$E = \sum_{i=1}^n V_i \cdot W_i \quad (4)$$

对于景观水平的景观指数, 表 6 中值可直接运用; 而对于斑块类型以及斑块水平的景观指数, 则需先用表 4 和表 5 的值与各斑块类型的权重(见表 7)相乘得到加权值再得以运用。其结果可见表 9。

Table 9. Partial landscape pattern index weighting

表 9. 部分景观格局指数加权值

景观指数	景观类型面积(CA)	聚合度指数(AI)	分形维数(PARA)	归一化植被指数(NDVI)
加权值	53267	50.3537	113.4977	0.1547

用公式 3-5 计算三江源区玛多县生态健康值结果, 可得 $CEL = 31,921.39023$ 。

4.3.2. 三江源湿地生态健康分析

对于三江源湿地生态健康评价, 本研究选用 1988 年的值作为对照, 因为 1988 年湿地生态状况较为良好, 可供研究参考。

同法计算出 1988 年湿地景观指数及生态系统健康状态综合指数 $E = 31,729.2171$, 1988 年的景观指数数据与 2018 年数据对比见表 10。

Table 10. Comparison of data between 1988 and 2018

表 10. 1988 年与 2018 年数据对比表

	景观类型面积	聚合度指数	分形维数	景观总面积	蔓延度指数	丰度	香农多样性	香农均匀度	归一化植被指数
1988 年	50,263	50.9718	112.446	192,078	75.5302	4	0.5363	0.409	0.0997
2018 年	53,267	50.3537	113.4977	193,176	75.5576	4	0.5738	0.4139	0.1547

景观的异质性是一个描述景观格局的非常重要的属性, 主要变现在空间分布的异质性和景观类型的多样性这两个方面。空间分布异质性常可以用景观的聚合度指数来描述, 而景观多样性则可以用景观的多样性和均匀度指数来说明。从表 10 可以看出, 研究区的景观多样性增大, 由 1988 年的 0.5363 增大到 2018 年的 0.5738 这种变化趋势表明湿地景观中的优势景观优势越来越弱, 景观的多样性呈上升趋势; 景观均匀度指数由 0.409 升高到 0.4139 这说明湿地景观的均匀度指数也在不断升高。蔓延度指数则由 1988 年的 75.5302 下降到 2018 年的 75.5576。湿地景观的多样性指数和均匀度指数的增大, 以及蔓延度指数的减小, 说明了湿地景观的异质性程度正在增加, 整体景观中各景观类型所占的比例趋于平衡和近似, 优势景观类型受到削弱。景观多样性指数和均匀度指数的增加能够在一定程度上维持和提高湿地的生态稳定性, 使其生态系统的抗干扰能力有所提高。不过聚合度指数的减少, 使得湿地景观的斑块连接度有所降低, 分离性加大, 景观在空间上的分布呈松散趋势。这样将会导致湿地整体景观的能量流动以及物质交换受到障碍, 湿地生物种群的繁衍和迁移也会受到影响。湿地景观的生态系统过程和生态功能在一定程度上受斑块形状的影响。总体来讲, 各个景观指数的值变化不大, 而且也基本都在健康的范围内波动, 说明湿地的健康状况良好。通过综合健康值的增加可知, 湿地整体的健康度还有所提高。

5. 结论

本论文以玛多县为例, 针对三江源区湿地生态环境特征及整体功能特征进行分析, 据此建立评价指标体系, 采用层次分析法与综合指数法结合的评价方法, 对三江源区湿地的健康性进行了初步研究, 结果表明:

1) 三江源湿地生态环境特性, 从活力、组织力、弹力、生态系统服务四个方面确定了 NDVI、景观总面积、分形维数、聚合度指数、蔓延度指数、多样性指数、均匀度指数、斑块类型面积、丰度这 9 个影响因子, 作为三江源湿地生态健康评价指标。

2) 本论文通过运用层次分析法确定各个评价指标的权重, 得到各指标的总权重值: NDVI (0.3906); 景观总面积(0.1640); 多样性指数(0.1633); 蔓延度指数(0.0985); 聚合度指数(0.0859); 分形维数(0.0420); 丰度(0.0264); 均匀度指数(0.0251); 斑块类型面积(0.0042); 这表明影响三江源湿地生态环境健康性的主要指标有 NDVI、景观总面积和多样性指数。

3) 对三江源湿地景观格局进行了分析和讨论: 1988 年和 2018 年这两年中, 湖区湿地景观破碎度增大, 景观异质性增强, 景观的形状复杂化和不规则化。

参考文献

- [1] 杨利. 三峡工程建设与洞庭湖湿地景观格局变化及生态健康研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.
- [2] 马艳. 三江源湿地的消长对区域气候影响的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 漳州: 闽南大学, 2006.
- [3] 刘晓琼, 徐小玲, 薛亮, 等. 三江源地区县域经济发展与生态建设互动研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007(1): 22-26.
- [4] Schaeffer, D.J., Henricks, E.E. and Kerster, H.W. (1988) Ecosystem Health. 1. Measuring Ecosystem Health. *Environmental Management*, **12**, 445-455. <https://doi.org/10.1007/BF01873258>
- [5] Rapport, D.J. (1989) What Constitutes Eco System Health. *Perspective in Biology and Medicine*, **33**, 120-132. <https://doi.org/10.1353/pbm.1990.0004>
- [6] 刘晓丹. 基于遥感图像的湿地生态系统健康评价: 以大沽河河口湿地为例[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [7] 李永建. 拉鲁湿地生态环境质量评价的景观生态学方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2002: 56-62.
- [8] Munyati, C. (2000) Wetland Change Detection on the Kafue Flats, Zambia, by Classification of a Multitemporal Remote Sensing Image. *Remote Sensing*, **21**, 1787-1806. <https://doi.org/10.1080/014311600209742>
- [9] Maing, J.K. and Marsh, S.E. (2001) Assessment of Environmental Impacts of River Basin Development on the Riverine Forests of Eastern Kenya Using Multi-Temporal Satellite Data. *Remote Sensing*, **22**, 2701-2729. <https://doi.org/10.1080/01431160010031298>
- [10] 李素娟. 三江源区产业结构调整研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2007.
- [11] 徐小玲. 三江源地区生态脆弱变化及经济与生态互动发展模式研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- [12] 王月容, 周金星, 周志翔, 孙启祥. 洞庭湖退田还湖区不同土地利用方式对土壤养分库的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010(6): 634-639.
- [13] Zhang, R.Q., Zhang, X.D., Yang, J.Y. and Yuan, H. (2013) Wetland Ecosystem Stability Evaluation by Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach in Yinchuan Plain, China. *Mathematical and Computer Modelling*, **57**, 366-374.
- [14] 张猛. 基于景观格局的生态系统健康评价——以洞庭湖湿地为例[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2011.