DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.04.008

金龙河入湖口生态堆岛植被恢复效果及其生态适应性评价

屈月雷[1],王 晨[1],魏千贺[2],马富强[2],彭尔瑞[2]

(1.云南农业大学资源与环境学院,云南 昆明 650201;
2.云南农业大学水利学院,云南 昆明 650201)

摘要:为了探索泥沙淤积严重的高原湖泊湿地退化的生态修复技术,通过植被恢复来验证生态堆岛的可行性,从生态角度对生态堆岛做出适应性评价,为剑湖湿地乃至高原湖泊生态修复提供实证研究。2017年7月和10月,以工程扰动后2年生态堆岛的自然恢复植物、土壤为研究对象,对金龙河入湖口生态堆岛进行多次调查与采样,并进行植物多样性和土壤单因素方差分析,综合确定评价指标体系,结合层次分析法辅助软件yaahpV11.3确定指标权重,运用模糊综合评价模型对生态堆岛的植被恢复效果(优、良、中、差、劣)作出综合评价,以此评价生态堆岛的生态适应性与可行性。结果表明,Ⅰ型堆岛植被恢复效果评价的综合值为3.54,等级为中,区域植被恢复效果良好;Ⅱ型、Ⅲ型堆岛植被恢复效果评价的综合值为2.79,等级为差,区域植被恢复效果较差。从生态角度来看,Ⅰ型生态堆岛在解决剑湖金龙河泥沙淤积的生态适应性较好。

关键词:生态堆岛;植被恢复;模糊综合评价模型;金龙河

中图分类号:Q819 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)04-0055-08

入湖河口湿地作为湖泊与河流物质和能量交换的区域,由于受化学、物理和生物等多种要素的影响,使之成为一个生物多样性富集的生态边缘区(朱卫红,2014);入湖河流不仅为各种生物提供丰富的营养物质,孕育丰富的生物多样性,同时也是湖泊淤积和污染的重要来源(尹小娟,2014)。金龙河入湖口、永丰河入湖口和石狮子河入湖口是剑湖泥沙淤积严重地区,为减少湖泊水域淤积面积,剑湖湿地管理局已经采取淤积泥沙就地堆岛的试点方式,在金龙河入湖河口形成8个人工岛屿的示范试点区域,以探索研究剑湖泥沙淤积的最佳解决途径(赵锐锋,2013)。符文超等(2014)对剑湖湿地生态进行多年修复,水质明显改善,同时剑湖植物配置更加合理,取得了很好的经济和社会效益;柏建坤等(2016)基于黄河三角洲湿地及修复工程,从湿地环境质量、结构与功能构建评价体系,得到较好的评价结果;张悦等(2013)对黄河口湿地评价时主要考虑了植被盖度及健康状况,通过长、短期评价,建立植被修复效果监测与评价方法,取得较为准确的结果。

目前,国内外用常规工程修复措施较多,利用生态堆岛来解决湿地面积退化问题研究较少,对生态堆岛植被恢复效果的分析评价研究更为少见(刘绍雄,2013)。在此背景下,项目组对工程扰动后2年的生态堆岛植被恢复效果进行多次采样调查研究。通过分析不同堆岛方式下植物群落、土壤特性,建立植被恢复效果综合评价指标体系,结合层次分析法辅助软件yaahpV11.3确定指标权重,运用模糊综合评价模型对生态堆岛植被恢复效果进行综合评价,通过植被恢复来验证生态堆岛的可行性,从生态的角度对生态堆岛做出适应性评价,旨在为剑湖湿地乃至高原湖泊植被恢复提供实证研究,对高原湖泊的保护研究具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

剑湖湿地位于云南大理州剑川县(99°55′E,26°28′N),由剑湖和玉华水库以及二者周围面山流域汇水区及面山森林组成,澜沧江主要支流漾濞江上游的黑惠江穿湖而过,金龙河是剑湖的重要来水源,黑惠江是剑湖的唯一出水口;除金龙河外,还有永丰河、狮河、格美江等数十条河汇入湖泊(田昆,2004)。剑湖南北长12.3 km,东西宽6.2 km,湖面海拔2 186 m,湖面面积6.23 km^2。正常蓄水水位时,湖面南北长3.35 km,东西最宽处3.25 km,平均水深2.7 m,最大水深6.0 m,径流面积918 km^2,常

收稿日期:2018-08-19

基金项目:云南省科技惠民专项计划项目"剑川县金龙河入湖口湿地修复关键技术研究与示范"(2016RA024)。

作者简介:屈月雷,1994年生,男,硕士研究生,研究方向水土保持与生态水工。E-mail:694184020@qq.com

通信作者:彭尔瑞,1966年生,女,教授,主要从事农田水利与生态水工关键技术研究。E-mail:1750272433@qq.com

年蓄水量为1 680万 m^3，是云南省现存的28个高原湖泊之一，居全省高原湖泊第13位(郭玉静，2018)。

受人为活动的干扰，剑湖湿地退化严重，狮河、金龙河入湖口有大量的泥沙淤积物，入湖口不断萎缩，大量泥沙涌入湖中，剑湖水域面积逐年缩小，由于湖泊不断萎缩，大片的沼泽湿地在湖滨形成。随着湿地生态环境的恶化，生物多样性受到严重威胁。由于人为影响对河流湿地和入湖口湿地垦殖为农田的过度开发利用，水体污染加重，加之城镇生活污水排入永丰河，致使剑湖水质污染逐年加剧，富营养化程度加深(田昆，2004；丁煌英，2017)。因此，在剑湖金龙河入湖口利用生态堆岛进行生态修复试验，共分为3种类型堆岛：Ⅰ型堆岛—在原生岛上覆盖河底淤泥，堆岛高度高于常水位0.8 m；Ⅱ型堆岛—由浅层河底淤泥堆成，堆岛高度高于常水位0.8 m左右；Ⅲ型堆岛—由深层河底淤泥堆成，堆岛高度高于常水位1.2 m左右。

1.2　评价指标选择

1.2.1　植被特征指标

(1)乔木、灌木层的重要值 Q_1=(相对密度+相对频度+相对优势度)/3

(2)藤本、草本层的重要值(汪攀，2018) Q_2=(相对频度+相对盖度)/2

(3)多样性指标值：

Patrick丰富度指数(唐宽燕，2018)：$R=S$

Shannon-Wiener多样性指数(余娇娥，2018)：

$H=-\sum P_i \ln P_i$

Simpson优势度指数(余娇娥，2018)：

$D=1-\sum P_i^2$

Pielou均匀度指数(张雪妮，2016)：

$J=H/\ln S$

式中：S 为出现在样方中的物种数总和，即物种丰富度指数；$P_i=N_i/N$，表示种 i 的相对重要值；N_i 为种 i 的重要值；N 为出现在样方中的物种重要值之和(丁扬，2018)。

1.2.2　土壤特征指标　主要分析土壤pH、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾等几项指标，并构建了如下评价指标群，如图1。

1.3　评价标准与方法

利用层次分析法构建植被恢复效果评价体系，基于yaahpV11.3的模型，得出指标层对目标层的权重。然后利用模糊综合评价法构建评价模型，实现对生态堆岛植被恢复效果的评价(王树梅，2018)。

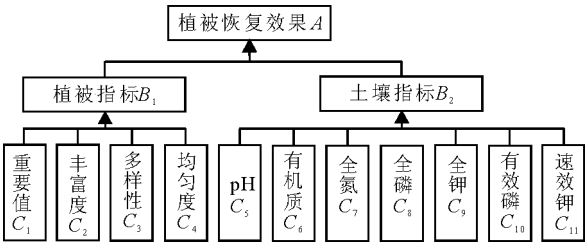

图1　植被恢复效果综合评价指标体系层次结构

Fig.1　Comprehensive evaluation index system of vegetation restoration effect

层次分析法是一种无结构的多准则决策方法，是将定性分析和定量分析相结合，并按照思想和心理的规律把整个决策过程进行层次化和数量化，最后归结为对两个事物的相对重要性进行判断(常凤，2018)。

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的评价方法，是根据模糊数学的隶属度将一些不易定量的要素量化，以达到对受多种因素制约的对象做出总体评价目的(李欣莅，2018)。

基于上述方法，本文将生态堆岛植被恢复效果分为优、良、中、差、劣5个等级来对应植被恢复效果等级，即用评价集 $V=(V_1,V_2,V_3,V_4,V_5)$=(优，良，中，差，劣)=(5，4，3，2，1)。

1.4　样品采集及数据分析

本实验以剑湖入湖口生态堆岛及剑湖主体水域为研究对象，生态堆岛位于26°29′42″～26°30′04″N，99°55′40″～99°56′08″E，选取Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛作对比分析，再以金龙河上游、下游作为空间对比。

对比不同类型的堆岛，以原生植物为对照，在每种类型的生态岛设置4个1 m×1 m样方，并在上下游设置3个样方，共计15个样方。对生态堆岛的植物进行采样调查，记录各样方内各植物种名、密度、高度、盖度、数量，并用GPS定位。

土壤采集与植物调查同时、同地进行，在所选取的植物样方内(图2)，去除表层枯枝落叶，取表层0～20 cm的土壤2 kg，装入自封袋中，标记并带回实验室。将土样风干去杂后过60目和100目的土壤筛，用四分法称取所需样品用于测定土壤的pH、有机质(soil organic matter，SOM)、全氮(total nitrogen，TN)、全磷(total phosphorus，TP)、全钾(total potassium，AK)、有效磷(available phosphorous，AP)、速效钾(available potassium，AK)土壤理化性质，每个样品重复3次，对上游、Ⅰ型堆岛、Ⅱ型堆岛、Ⅲ型堆岛、下游各土样分别加权平均，形成各区域的代表值，以此作为对比分析。

实验所得数据运用 Microsoft Excel 2013 进行计算和图表制作，采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析，LSD 多重比较法检验差异显著性，运用 yaahpV11.3 层次分析法确定指标权重，将权重因子相乘得到最终权重；同时，各具体因子权重结果得出后，需对判断矩阵进行一致性检验（孔庆仙，2017）。首先，计算出判断矩阵的最大特征值 λ_{max}，然后用 λ_{max} 和矩阵的阶数 n 计算一致性指标 CI；其中，CR 为随机性指标，CI 为一致性指标，RI 为平均随机一致性指标（杨杰峰，2017）。

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1};\ CR=\frac{CI}{RI}$$

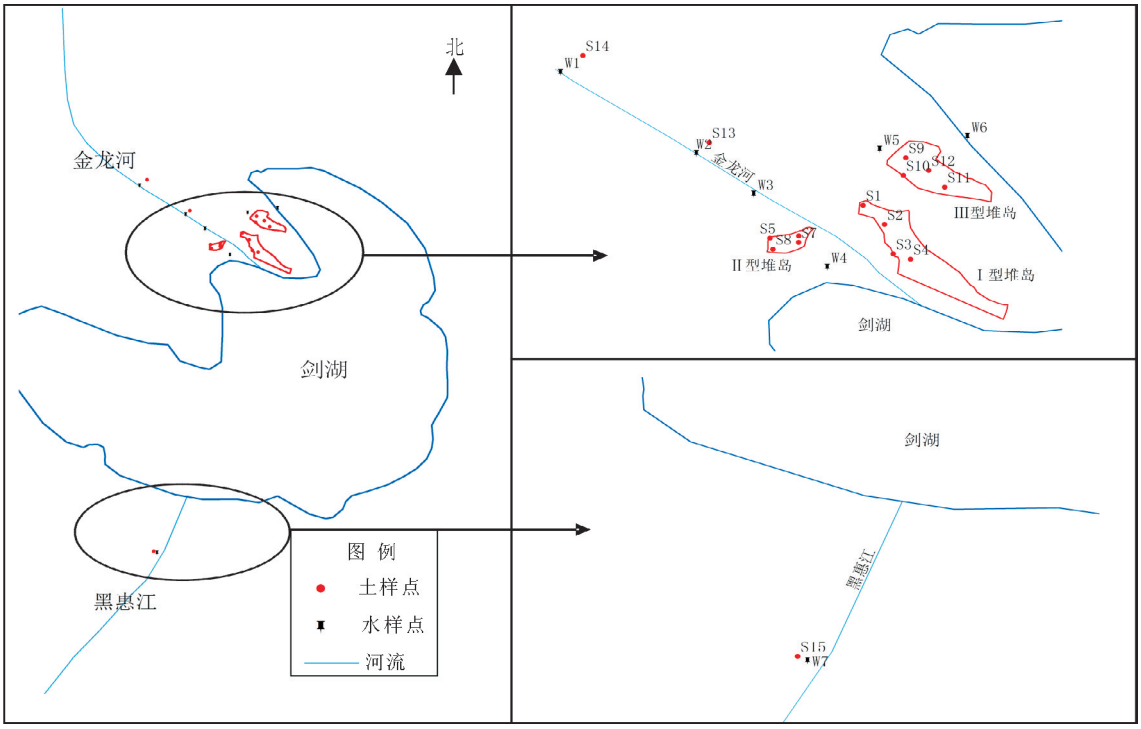

图 2　剑湖生态堆岛样点分布

Fig.2　Location of the sampling sites

2　结果与分析

2.1　生态堆岛植被和土壤指标

经过多次调查取样，生态堆岛区域样方内现有植物共 31 科、50 属、52 种，乔灌木有 5 种，其中小乔木或灌木有 4 种（垂柳为人工恢复栽种的幼苗，属小乔木）；草本植物 40 种，其中一年生草本植物 14 种，多年生草本植物 26 种；水生作物 7 种。

2.1.1　堆岛植被群落特征　Ⅰ型堆岛植物种类丰富，共 30 种，草本层优势种为牛筋草（*Eleusine indica*），重要值达 98.96，其次金丝草（*Pogonatherum crinitum*）、马鞭草（*Verbena officinalis*）、雀稗（*Paspalum thunbergii*）、菖蒲（*Acorus calamus*）、鬼针草（*Bidens pilosa*）的重要值相对较大；乔灌层优势种为白桦（*Betula platyphylla*），重要值达 208.72；整体地面覆盖率高。

Ⅱ型和Ⅲ型堆岛的植物种类较为单一，共 18 种植物，以草本和半灌木为主，优势种为牛筋草和结香（*Edgeworthia chrysantha*），重要值分别为 115.67、157.55，草本层中花叶滇苦菜（*Sonchus asper*）、苦苣菜（*Sonchus oleraceus*）、灯芯草（*Juncus effusus*）、小花鬼针草（*Bidens parviflora*）的重要值相对较大；整体来看植物物种单一，分布稀疏，仅存在小部分生长较好的物种。

原生植物草本层中优势种为虎耳草（*Saxifraga stolonifera*），重要值为 72.99，但与其他草本重要值差距并不大，均匀度较好；乔灌层中优势种为滇杨（*Populus yunnanensis*），重要值为 75.73，与其他乔灌木重要值差距不大；整体密度均匀，覆盖率较高。

对比Ⅰ型与Ⅱ型、Ⅲ型堆岛，牛筋草的重要值最大，且其为一年生草本，有助于入湖口生态堆岛植被迅速恢复。相较于Ⅱ型、Ⅲ型堆岛，Ⅰ型植物种类丰富，整体地面植被覆盖率较高，可直接观测到湿地植被恢复的成效。对比原生植物与Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛，原生植物各重要值差距不大，植物覆盖均匀，草本层与乔灌层分布均匀，植物种丰富。

2.1.2　堆岛植被的α-多样性　通过对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛的物种及原生植被进行调查、测量、统计和计算，结果如表1。可以看出，Ⅰ型堆岛的种类最为丰富，而且分布均匀，相对于原生植被，还有多种新的物种生长，说明整体Ⅰ型堆岛最为有利于恢复生态。

表1　不同类型生态堆岛的α-多样性

Tab.1　Diversity indices of different vegetation types in the investigated ecological islands

研究区域	植物类型	*S*	*H*	*D*	*J*
Ⅰ型堆岛	草本	28	2.701	0.868	0.810
	乔灌木	2	0.614	0.423	0.886
Ⅱ-Ⅲ型堆岛	草本	15	2.204	0.816	0.814
	乔灌木	3	1.021	0.611	0.929
原生植被	草本	21	2.138	0.864	0.702
	乔灌木	10	2.222	0.870	0.965

2.1.3　土壤性状变化　全国土壤养分等级分级标准见表2。从土壤理化性质来看(图3)，pH值、有机质和全钾在各堆岛区域的整体变化不大，Ⅰ型堆岛的全磷含量比Ⅱ型和Ⅲ型高4%和1%，全氮含量高20%和9%，速效钾高3%和22%，整体处在中等水平。但全磷指标在运用堆岛后呈现了比上下游都高的趋势；主要可能是由于堆岛上的泥土源于湖底，植物吸收磷的能力强，植物多样性也比上下游高。而在速效钾、全钾和全氮方面则与全磷相反，上游比各堆岛要高，速效钾含量比下游要低18 mg/kg，可能由于不同堆岛方式对下游的土壤提供了钾元素和氮元素，说明生态堆岛对于钾和氮的固定较差，Ⅰ型堆岛方式相比Ⅱ型和Ⅲ型，对氮、磷、钾的吸收能力更强，在3种堆岛里是最适宜采用的。

表2　全国土壤养分等级分级标准

Tab.2　National soil nutrient classification standards

指标	分级标准					
	一级	二级	三级	四级	五级	六级
pH值	<4.5	4.5～5.5	5.5～6.5	6.5～7.5	7.5～8.5	>8.5
有机质/g·kg^{-1}	>40	30～40	20～30	10～20	6～10	<6
全氮/g·kg^{-1}	>2.0	1.5～2.0	1.0～1.5	0.75～1.0	0.5～0.75	<0.5
全磷/g·kg^{-1}	>1.0	0.8～1.0	0.6～0.8	0.4～0.6	0.2～0.4	<0.2
全钾/g·kg^{-1}	>25	20～25	15～20	10～15	5～10	<5
有效磷/mg·kg^{-1}	>40	20～40	10～20	5～10	3～5	<3
速效钾/mg·kg^{-1}	>200	150～200	100～150	50～100	30～50	<30

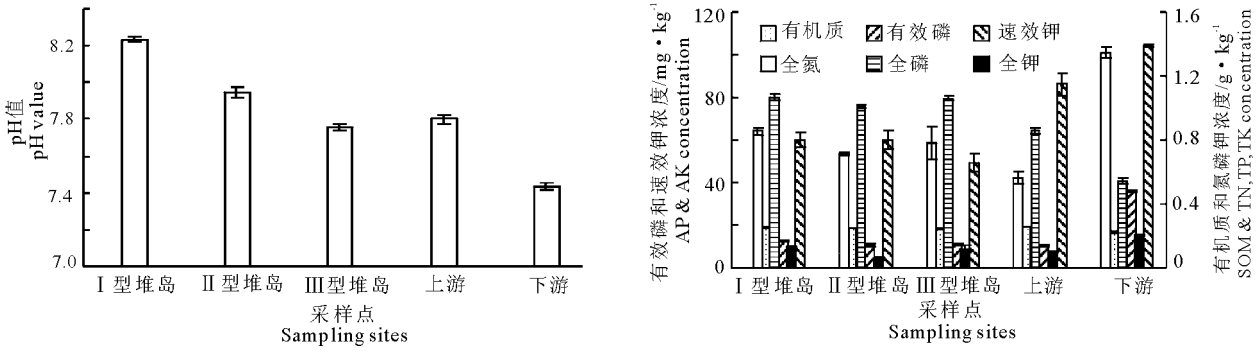

图3　不同区域土壤的理化性质

Fig.3　Soil physical and chemical properties of different investigated regions

2.2　层次分析法确定指标权重

在获取了以上评价指标的测定数据后，根据前文建立的评价指标体系，通过对剑川县科技局、水利局、剑湖湿地保护管理局以及水利学院生态水工团队的有关专家、学者、工作人员发放20份问卷调查表(实际收到18份)，利用层次分析法yaahpV11.3模型对各指标权重进行计算(表3)，将两个权重值相乘得到最终权重W_i(邱阳凌，2018)。以上判断矩阵CR均小于0.1，即判断矩阵具有满意的一致性，判断矩阵可接受。

2.3　模糊综合评价得分

通过层次分析法确定了各指标在指标群中的权重后，利用模糊综合评价模型来计算生态堆岛植被恢复效果评价得分(陆志强，2015)。

2.3.1　Ⅰ型堆岛综合评价得分　(1)确定评价因素集U。评价因素集$U=(U_1,U_2)=$(植被特征，土壤特征)，$U_1=$(重要值，丰富度，多样性，均匀度)，$U_2=$(pH，有机质，全氮，全磷，全钾，有效磷，速效钾)。在此基础上确定评价因素的权重集A，由表5可知$A=(0.7500,0.2500)$。

表 3　不同类型堆岛植被恢复效果综合评价指标最终权重值汇总

Tab.3　Index weight of the comprehensive evaluation system for vegetation restoration

类型	一级指标	权重值 a	二级指标	权重值 b	最终权重 W_i
Ⅰ型堆岛植被恢复效果 A	植被指标 B_1	0.7500	重要值 C_1	0.1953	0.1465
			丰富度 C_2	0.1381	0.1036
			多样性 C_3	0.3905	0.2929
			均匀度 C_4	0.2761	0.2071
	土壤指标 B_2	0.2500	pH 值 C_5	0.1010	0.0253
			有机质 C_6	0.1911	0.0478
			全氮 C_7	0.1571	0.0393
			全磷 C_8	0.1291	0.0323
			全钾 C_9	0.0701	0.0175
			有效磷 C_{10}	0.2604	0.0651
			速效钾 C_{11}	0.0913	0.0228
Ⅱ-Ⅲ型堆岛植被恢复效果 A	植被指标 B_1	0.6667	重要值 C_1	0.2668	0.1779
			丰富度 C_2	0.1512	0.1008
			多样性 C_3	0.3880	0.2587
			均匀度 C_4	0.1940	0.1293
	土壤指标 B_2	0.3333	pH 值 C_5	0.1302	0.0434
			有机质 C_6	0.1000	0.0333
			全氮 C_7	0.1823	0.0608
			全磷 C_8	0.1625	0.0542
			全钾 C_9	0.0715	0.0238
			有效磷 C_{10}	0.2158	0.0719
			速效钾 C_{11}	0.1377	0.0459

(2)确定评价集 V。评价集 $V=(V_1,V_2,V_3,V_4,V_5)$=(优,良,中,差,劣) = (5,4,3,2,1)。

(3)Ⅰ型堆岛模糊综合评价指标隶属度。模糊评价矩阵 U 是由所有评价指标分属于镉评价等级的隶属度值构成的,本文将应用专家评价给分法确定各种因素对评价等级的隶属度(菅文娜,2006;孙丽娜,2006)。由专家调查结果并归一化后可得因素的评价矩阵 U_1,U_2。

$$U_1=\begin{bmatrix}0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0\\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0\\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0\\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0\end{bmatrix}$$

$$U_2=\begin{bmatrix}0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1\\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0\\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0\\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1\end{bmatrix}$$

(4)Ⅰ型堆岛综合评价模型。由表 4 可知,Ⅰ型堆岛植被特征所确定的权重向量 W_1 = (0.1465, 0.1036,0.2929,0.2071),土壤特征所确定的权重向量 W_2 = (0.0253,0.0478,0.0393,0.0323,0.0175, 0.0651,0.0228)。

建立各因素的评价矩阵:

$B_1=(W_1)\cdot(U_1)$ = (0.2043,0.2250,0.2000, 0.1207,0.0000)

$B_2=(W_2)\cdot(U_2)$ = (0.0309,0.0581,0.0927, 0.0557,0.0184)

用归一化后的 B_i 建立总评价矩阵 $B=(B_1, B_2)^T$,即:

$$B=\begin{bmatrix}0.2724 & 0.3000 & 0.2667 & 0.1660 & 0\\ 0.1208 & 0.2272 & 0.3623 & 0.2177 & 0.0720\end{bmatrix}$$

建立植被恢复效果评价矩阵 $C=A\cdot B$,经归一化处理后得:

$C=A\cdot B$ = (0.2345,0.2818,0.2906,0.1751, 0.0180)

系统总得分计算如下:

$F=C\cdot S^T$ = 0.2345×5+0.2818×4+0.2906 ×3+0.1751×2+0.0180×1=3.54

式中:S^T 为相应因素级分。

2.3.2　Ⅱ型和Ⅲ型堆岛综合评价得分　由上述步骤同理得出Ⅱ、Ⅲ型堆岛权重集 A = (0.6667, 0.3333)。

评价集 V = (V_1,V_2,V_3,V_4,V_5)=(优,良,中, 差,劣)= (5,4,3,2,1)。

评价矩阵 U_1,U_2:

$$U_1=\begin{bmatrix}0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1\\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.2\\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.1\\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{bmatrix}$$

$$U_2=\begin{bmatrix}0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1\\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{bmatrix}$$

植被特征所确定的权重向量 W_1 = (0.1779, 0.1008,0.2587,0.1293),土壤特征所确定的权重向量 W_2 = (0.0434,0.0333,0.0608,0.0542,0.0238, 0.0719,0.0459)。建立各因素的评价矩阵:

$B_1=(W_1)\cdot(U_1)$ = (0.0537,0.1075,0.1899, 0.2259,0.0897)

$B_2=(W_2)\cdot(U_2)$ = (0.0284,0.0732,0.1105, 0.0912,0.0294)

用归一化后的 B_i 建立总评价矩阵 $B=(B_1, B_2)^T$，即：

$$B=\begin{bmatrix}0.0806 & 0.1612 & 0.2849 & 0.3388 & 0.1345\\ 0.0855 & 0.2199 & 0.3321 & 0.2741 & 0.0884\end{bmatrix}$$

建立植被恢复效果评价矩阵 $C=A\cdot B$，经归一化处理后得：

$C=A\cdot B=(0.0822, 0.1808, 0.3006, 0.3173, 0.1192)$

系统总得分计算如下：

$F=C\cdot S^T=0.0822\times5+0.1808\times4+0.3006\times3+0.3173\times2+0.1192\times1=2.79$

基于模糊综合评价的综合值，Ⅰ型堆岛植被恢复效果评价综合值为3.54，Ⅱ型和Ⅲ型堆岛植被恢复效果评价综合值为2.79，可知Ⅰ型堆岛植被恢复适应性优于Ⅱ型和Ⅲ型。由此可知，从生态的角度来看，Ⅰ型生态堆岛在解决剑湖金龙河泥沙淤积的生态适应性较好。

3 讨论

3.1 生态堆岛对湿地植物生物多样性的影响

以剑湖金龙河上游、下游的植被作为对照，对比分析Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛的植被特征，得出牛筋草的重要值最大，且牛筋草为一年生当地草本；另外，金丝草、马鞭草等草本植物的生长周期快，有助于入湖口生态堆岛植被迅速恢复。堆岛内植物主要以速生草本和灌木为主，对比上下游植物种类，未发现入侵物种，利于堆岛的生态环境构成和稳定。对比3种堆岛的α-多样性，Ⅰ型堆岛在物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数均比Ⅱ型和Ⅲ型堆岛高，说明植物物种丰富，整体地面覆盖率较高，植物分布均匀。Ⅰ型堆岛的植被恢复效果在3种堆岛中最好。随着时间的延长，湿地植被恢复成效显著，没有外来物种的入侵也有利于维持湖泊生态的稳定。

3.2 生态堆岛对土壤理化指标的影响

根据表2所示的全国第二次土壤普查养分分级标准，生态堆岛土壤总体呈碱性，pH值变化范围为7.44～8.23，总体属于五级标准；土壤有机质各区域间变化幅度不明显，均属中等水平；Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛的全氮含量较低，为四级标准，上游、下游全氮含量均较高，分别为三级、二级标准；下游土壤有效磷含量较高为二级标准，上游、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛均属三级标准，有效磷含量中等水平；Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型堆岛全磷含量很高，属一级标准，上游、下游分别属二级、四级标准；土壤速效钾含量相对较低，各区域均在三级标准以下；下游土壤全钾含量为二级标准，全钾含量较高，其他区域均在四级标准以下，相对较低。可以看出，堆岛土壤中全氮比上游高，比下游低，可能由于堆岛植物对于全氮吸收较差，建议岛上种植相关固氮植物，有机质和pH整体变化不大。全磷在堆岛区域内比上下游都要高，可能岛上对于磷元素的吸收较好。整体来看Ⅰ型堆岛的土壤状况是3种堆岛方式最好的，对于植被生长的状况也是最好的，建议在原生岛上堆积淤泥。

3.3 不同生态堆岛方式的植被恢复效果比较

通过对植被和土壤性质的分析，利用植物特征和土壤特征计算得到评价结果，Ⅰ型堆岛植被恢复效果评价的综合值为3.54，等级为中，岛区域植被恢复效果良好；Ⅱ、Ⅲ型堆岛植被恢复效果评价的综合值为2.79，等级为差，区域植被恢复效果均较差。故从生态的角度来看，Ⅰ型生态堆岛在解决剑湖金龙河泥沙淤积的生态适应性较好，对比上下游的植被和土壤特征，堆岛对于生态恢复虽然有较好的作用，但相对上下游生态情况来说仍然存在着植被种类单一和土壤养分含量较低的情况，因此生态堆岛不是一项较为完善的技术，但对于湖泊淤积泥沙的处理仍然是一种较为完善的技术。

综上，生态堆岛对于剑湖入湖口金龙河土壤修复和植被恢复有着良好的促进作用，而且将湖底淤泥不同堆岛，不仅有利于处理湖底淤积泥沙，也有利于改善剑湖植被和生态环境，一举两得；同时，也为高原湖泊湿地修复提供参考，为云南乃至全国的推广运用起到很好的示范作用。

参考文献

柏建坤，臧震宇，冯建祥，等，2016. 黄河三角洲芦苇湿地生态修复效果评价研究[J]. 湿地科学与管理，12(3)：17－22.

常凤，刘彬，刘若坤，等，2018. 库车山区新疆假龙胆适生地植物群落多样性及其环境解释[J]. 草地学报，26(5)：1084－1090.

丁煌英，宁鹏飞，张庆，等，2017. 剑湖摇蚊幼虫的空间分布与水质评价[J]. 水生态学杂志，38(3)：58－65.

丁扬，姜百惠，丁鑫，等，2018. 热带水库消落区植物群落物种组成与结构特征——以海南松涛水库为例[J]. 湖泊科学，30(6)：1745－1754.

符文超，田昆，肖德荣，等，2014. 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析[J]. 生态学报，34(9)：2187－2194.

郭玉静，王妍，郑毅，等，2018. 滇西北高原湖泊剑湖流域景观时空演变特征[J]. 浙江农林大学学报，35(4)：695－704.

菅文娜，张延龙，2006. 陕西关中城市街道园林绿化景观模糊评价[J]. 西北林学院学报，21(3)：147－149.

孔庆仙，信忠保，夏晓平，2017. 北京怀九河河岸带植物多样性及影响因子分析[J]. 科技导报，35(24)：57－65.

李欣莅，弓弼，高丽娟，等，2018. 千渭之会国家湿地公园植物多样性调查评价[J]. 西北林学院学报，33(4)：268－272，281.

刘绍雄，王明月，杨宇明，等，2013. 剑湖湿地湖滨带 5 种植物群落类型氮和磷根际效应[J]. 环境科学与技术，36(10)：73－77.

陆志强，李吉鹏，章耕耘，等，2015. 基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价[J]. 生态学报，35(14)：4907－4919.

邱阳凌，林育青，刘俊杰，等，2018. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价[J]. 环境科学学报，38(4)：1665－1672.

孙丽娜，孙铁珩，金成洙，2006. 卧龙泉河流域土壤重金属污染的模糊评价[J]. 水土保持研究，13(1)：126－129.

唐宽燕，闫志坚，尹强，等，2018. 库布齐沙地不同沙丘类型植物多样性研究[J]. 中国草地学报，40(6)：71－77.

田昆，陆梅，常凤来，等，2004. 农业利用和人为干扰对剑湖湿地土壤特性的影响[J]. 农业环境科学学报，(2)：267－271.

汪攀，王霖娇，盛茂银，2018. 西南喀斯特石漠化生态系统植物多样性、土壤生态化学计量特征及其相关性分析[J]. 南方农业学报，49(10)：1959－1969.

王树梅，庞元湘，宋爱云，等，2018. 基于林龄的滨海盐碱地杨树刺槐混交林土壤理化性质及草本植物多样性动态[J]. 生态学报，38(18)：6539－6548.

杨杰峰，杜丹，田思思，等，2017. 湖北省典型湖泊湿地生物多样性评价研究[J]. 水生态学杂志，38(3)：15－22.

尹小娟，宋晓谕，蔡国英，2014. 湿地生态系统服务估值研究进展[J]. 冰川冻土，36(3)：759－766.

余娇娥，司宏敏，吴雪涛，等，2018. 海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征[J]. 生态环境学报，27(11)：2017－2022.

张雪妮，杨晓东，吕光辉，2016. 水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境的关系[J]. 生态学报，36(11)：3206－3215.

张悦，刘长安，宋永刚，等，2013. 滨海湿地植物修复效果监测与评价方法研究[J]. 海洋环境科学，32(4)：544－546.

赵锐锋，姜朋辉，赵海莉，等，2013. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析[J]. 生态学报，33(14)：4436－4449.

朱卫红，苗承玉，郑小军，等，2014. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报，34(6)：1379－1390.

（责任编辑　万月华）

Effect of Restoring Vegetation and Evaluation of the Ecological Adaptability of Artificial Islands in the Jinlong River Inlet of Jianhu Lake

QU Yue-lei[1], WANG Chen[1], WEI Qian-he[2], MA Fu-qiang[2], PENG Er-rui[2]

(1.College of Resources and Environmental, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, P.R.China;
2.College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, P.R.China)

Abstract: Jianhu Lake is an important plateau lake, located in Jianchuan County, Yunnan Province. In recent years, the surface area of Jianhu Lake has been declining because of sediment deposition in the Jinlong River and Shihe River inlets to the lake. An ecological restoration project was carried out in the wetlands of Jianhu Lake by vegetating islands of three types: Type I, natural islands covered by sediments; Type II, artificial islands constructed by dredging and consolidation of shallow sediments; Type Ⅲ, artificial islands constructed by dredging and consolidation of deep sediments. In July and October 2017, plants used in the restoration and soil from the ecological islands were studied to evaluate the effect of vegetation restoration and the ecological adaptability and feasibility of the islands two years after the project disturbance. Our study aimed to verify the feasibility of ecological islands through vegetation restoration and explore the ecological restoration technology of degraded plateau lake wetlands impacted by heavy sedimentation. The study area was at the mouth of the Jinlong River on Jianhu Lake. The diversity of vegetation and soil physicochemical properties of the three ecological island types were determined and eleven indices of vegetation diversity and soil physicochemistry were selected. The indices were incorporated into a comprehensive evaluation system with weighting factors for each index determined by the analytic hierarchy process (AHP). The vegetation restoration effect of each ecological island type was then evaluated using a fuzzy comprehensive evaluation model. The evaluation score for the Type I island was 3.54, a medium score indicating good vegetation restoration. The scores for Type II and Type Ⅲ islands were both 2.79, low evaluation scores indicating poor vegetation recovery. From the perspective of ecology, Type I ecological islands are more ecologically adaptable for addressing the sedimentation problem in Jinlong River at the mouth of Jianhu Lake.

Key words: ecological island; vegetation restoration; fuzzy comprehensive evaluation model; Jinlong River