

DOI: 10.5846/stxb201710141842

李卓凌, 王冬梅, 任远. 漓江水陆交错带截污效果评价. 生态学报, 2018, 38(21): - .

Li Z L, Wang D M, Ren Y. Assessment of the interception effect of Lijiang River land and water ecotone. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

漓江水陆交错带截污效果评价

李卓凌, 王冬梅*, 任 远

北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083

摘要:水陆交错带作为水生、陆地生态系统之间的过渡带,具有拦截水体污染物、保护河流水质等重要作用。根据立地划分原则并结合广西壮族自治区漓江风景区实际情况,将漓江水陆交错带划分为 6 种立地类型:薄土层河滩地、中土层河滩地、厚土层河滩地、薄土层岸坡地、中土层岸坡地、厚土层岸坡地,筛选了 14 个指标并建立指标评价体系,利用层次分析法将漓江水陆交错带截污效果分为 4 个等级:优、良、中、差。评价结果如下:在漓江水陆交错带选取了 20 块样地,其中,薄土层河滩地占 5%、中土层河滩地占 10%、厚土层河滩地占 10%、薄土层岸坡地占 10%、中土层岸坡地占 35%、厚土层岸坡地占 30%,评价为“优”、“良”、“中”、“差”的样地分别占 10%、60%、25%、5%,说明漓江水陆交错带整体截污效果良好,但是有少部分区域急需修复,部分区域有潜在生态危险。根据评价结果,针对不同截污效果的漓江水陆交错带,提出最佳的生态修复措施,对漓江水陆交错带生态修复工作具有指导意义。

关键词:水体污染物;截污效果;立地类型;层次分析法;漓江;水陆交错带

Assessment of the interception effect of Lijiang River land and water ecotone

LI Zhuoling, WANG Dongmei*, REN Yuan

School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil & Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, China

Abstract: Lijiang River is a famous tourist scenic spot. In recent years, it faces numerous problems in the dry season in the Lijiang River land crossing zone, including serious exposure of the riverbed, large amounts of sediment in the flood period, and floating debris in the water. As a transitional zone between aquatic and terrestrial ecosystems, the land-water ecotone plays an important role in intercepting water pollutants and protecting river water quality. Here, we studied the interception effect of the land and water ecotone based on the principle of index selection and the current situation in the Lijiang River Scenic Area in the Guangxi Zhuang Autonomous Region. There are 14 indexes in the index evaluation system that are screened from three aspects: the floodplain and slope water blocking effect, the vegetation interception, and soil adsorption. Using the analytic hierarchy process (AHP), the interception effects of the Lijiang River land and water ecotone is divided into 4 grades: excellent, good, general, and poor. The pollution interception effects of 20 plots along both sides of Lijiang River were evaluated. The results show that 2 of the 20 plots retained complete structure. The gravel content of soil is low, the soil layer is thick, the vegetation is rich, and the pollution removal effect is obvious. Thus, their interception effect level is excellent. There were 12 plots rated ‘good’ with relatively complete structure. These are characterized by low gravel content in soil and a thick soil layer. Their vegetation diversity and interception effects are good. Five plots ranked at an general level. Their structure has a certain degree of damage, the soil gravel content is higher, and the soil layer is thin. The vegetation in the plot is singular and the interception effect is normal. There was one plot ranked as ‘poor’,

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAC16B03, 2011BAC09B08-07)

收稿日期:2017-10-14; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dmwang@126.com

characterized by sparse grass species and a poor interception effect, missing land structure, and largely gravel surface. According to the evaluation results, the best ecological restoration measures are proposed for the Lijiang River land and water ecotone with different interception effects in Lijiang River, which is of guiding significance for the ecological restoration of this area. We suggest a management method to maintain the natural appearance, strengthen the construction of a monitoring system, and improve this ecotone. For the interception of good water and land ecotone, with natural recovery, the appropriate increase in human intervention. And constantly improve the interception of water and land interception function, and long-term monitoring and management. To improve the effect of interception of the ecotone, outplanting and engineering measures should be utilized, supplemented by the ecological restoration model.

Key Words: water pollutant; the interception effect; analytic hierarchy process; the Lijiang River; land and water ecotone

水陆交错带又称为河岸带、滨岸带或者消落带,是指水生生态系统和陆地生态系统之间的界面区,也是水生生态系统与陆地生态系统进行物质交换与能量流动的重要地带。作为保护水源的最后一道防线,水陆交错带可以通过物理、化学作用以及生物效应减缓径流、拦截漂浮物、过滤泥沙、吸收悬浮物颗粒,减弱进入水体的污染物毒性,达到减少污染和保护水质的效果^[1]。最早对水陆交错带植被截污效果的研究开始于 20 世纪 60 年代, Wilson 等^[2]发现水陆交错带草本植物具有拦截径流泥沙的功能。后来 Anna 等^[3]人研究发现水陆交界处的河岸缓冲带对截留河流污染物、净化河流水质具有重要作用,是截留面源污染物、改善河道水质的有效手段。Onrizal 等^[4]人认为利用河岸带生态评估结合社会经济学是减缓吉兰丹流域洪水灾害的重要方法。夏继红等^[5]人通过研究发现生态水陆交错带能够维持生态环境的动态平衡,具有改善环境、自我调节等功能,且具有一定宽度的河岸带可对污染物进行过滤、渗透、吸附、拦截并沉淀,从而减轻污染程度。以往的研究中对水陆交错带截污效果的影响因素分析有了一定的研究成果,张丹丹等^[6-7]人探讨了漓江水陆交错带植被对漂浮物的拦截效果以及草带对悬浮物颗粒的拦截效果,并定量分析了影响漂浮物和悬浮物拦截效果的因素。吴林川等^[8]人研究表明硝态氮的淋失量与土壤容重呈显著正相关,并且轻度淹没带对硝态氮的截留效果最佳。周思思^[9]通过对国内外关于水陆交错带净污机制以及净污效果的研究,总结了水陆交错带净污效果的主要影响因子分别是:污染物种类、土壤、缓冲带宽度、缓冲带坡度、缓冲带植被和其他因素。目前对于水陆交错带的研究多以水陆交错带两侧污染物浓度变化为对象,关于水陆交错带截污效果综合评价研究较少。桂林漓江风景区,是漓江旅游价值最高但生态环境较为脆弱的江段。且漓江汛期分明,雨洪冲刷下来的大量枯枝杂草、动植物残骸进入水体,加上人类活动造成的旅游污染、生活污染等,严重威胁到漓江水环境质量^[10]。本文通过查阅资料以及对漓江实地调查,以截污效果较为明显的灌丛、草本为主要研究对象,从河漫滩和岸坡阻水效果、植被截污效果、土壤吸附效果三个方面建立了漓江水陆交错带截污效果综合评价体系,沿漓江两岸对不同结构水陆交错带样地进行截污效果评价并给出修复意见,对保护漓江水源具有现实意义,同时水陆交错带生态修复工作具有指导意义。

1 研究区概况

本研究区域选择在广西漓江桂林—阳朔段的中游河段,全长 83km,属于岩溶地貌,是世界岩溶峰林景观发育最完善的典型地之一。研究区位于中亚热带季风气候区,年平均气温 17.8—19.1℃,年降水量 1814—1941mm,年蒸发量 1482.5mm^[11],流域内径流总量丰富,但分布不均,全年径流量的 77.5%分布在 3—8 月份,37.7%分布在 5—6 月份,枯水期为 9 月份至次年 2 月份。土壤类型为山地黄壤土,土壤厚度分布不一,靠近水体区域砾石含量高。植物种类丰富,常见乔木种有香樟(*Cinnamomum bodinieri*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)和阴香(*Cinnamomum burmannii*)等;常见灌木种有水杨梅(*Geum aleppicum*)、黄荆(*Vitex negundo*)等;常见草本有水蓼(*Polygonum hydropiper*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等。植被配置模式较为复杂,分类方法与分类结果存在较大差异,如以植被类型为标准进行划分,漓江水陆交错带植

被配置模式可分为草本、灌草、乔草和乔灌草四种类型;以河岸带断面地形结构和植被组成特征进行划分,可分为以下 6 种植被配置类型:江心洲疏林灌草自然型、丘陵陡坡乔灌草天然型、滩地灌草近自然型、平原缓坡乔灌草近自然型、村落阶地乔灌人工型、城镇岸坡乔草人工型^[12]。

2 研究方法

2.1 污染物种类及来源调查

通过调查收集漓江近年来水体污染物资料以及数据,整理分析发现污染物来源复杂多样,包括居民区、旅游业、餐饮业等带来的人为污染,降雨降水后地表径流带来的自然污染和农业非点源污染等等。漓江水体中的污染物主要包括以下 3 类:①河流中的漂浮物,主要来源于降雨降水过后,雨水、洪水冲刷带来的枯枝、杂草以及动植物残骸等;游客和两岸居民随意倾倒的生活垃圾。②悬浮物颗粒,主要来源于降雨及其产生的地表径流所造成的水土流失,包括泥沙颗粒和其他颗粒状污染物。③可溶性物质,主要包括 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TP 等,这些物质附着在漂浮物和悬浮物颗粒中,随着地表径流经过水陆交错带进入水体。

2.2 样地调查

采取典型样地野外调查对漓江桂林-阳朔段两岸水陆交错带进行实地系统调查,沿漓江两岸按照坡度梯度、土壤梯度、植被梯度每隔 10km(具体间隔大小视情况而定)布设一块样地,共计 20 块样地,调查内容主要包括河漫滩和岸坡结构特征、植被配置情况以及土壤特性等。其中河漫滩和岸坡结构特征调查内容包括:河漫滩土石特征、岸坡坡度、植被缓冲带宽度、生态护岸措施现状等。植被配置情况调查分为乔木调查、灌木调查和草本调查,乔木调查是在样地内随机选取 5 个 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 的乔木样方,调查内容包括:乔木种类、数量等;灌木调查是在所选样地内随机选取 5 个 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 的灌木样方,调查内容包括:灌木种类、数量、高度、基径、体积等;草本调查是在样地内随机选取 10 个 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的草本样方,调查内容包括:草本种类、数量、盖度等。土壤特性调查是在样地内随机选取 10 个土壤样方,分别采取 10cm 以下以及 10—20cm 土样,充分混合后取 500g 样品放在自封袋内带回实验室测定砾石含量以及土壤理化性质等。参照广西桂林自然地理情况,按照《中国森林立地分类》标准,通过对定量因子和定性因子的综合分析,最后将漓江水陆交错带立地类型分为两个类型组:河滩地类型组、岸坡地类型组,6 个立地类型并进行编号(以阿拉伯数字 1、2 分别代表河滩地类型组与岸坡地类型组,字母 a、b、c 分别代表薄土层、中土层、厚土层):1a.薄土层河滩地、1b.中土层河滩地、1c.厚土层河滩地、2a.薄土层岸坡地、2b.中土层岸坡地、2c.厚土层岸坡地。漓江水陆交错带样地基本情况见表 1。

2.3 评价指标选取方法

通过参考夏继红等^[4]关于河岸的生态系统综合评价指标体系的研究和其他一些相关领域的研究成果^[13-16],同时参照现有的国家、地区或行业标准或规范,从中进行总结与修改,最终确立 14 个漓江水陆交错带截污效果评价指标,并借鉴了每项指标的选取标准与选取原则:

(1)河漫滩土质类型。土质类型对于土壤渗透性与吸附性起着重要作用,并且影响植物的生长。研究表明:水陆交错带河滩砾石与土质比例在 1:9 左右时,能有效促进土壤通气透水性,并且对于植被的生长效果最好^[17]。本实验将土样带回实验室,分别测定每个 500g 样方中砂砾石质量和土壤质量,计算砾石含量并进行分类。分类标准按照《国际制土壤质地分级标准》将水陆交错带土质类型分为砾质土(砾石含量 1%—30%)、轻砾石土(砾石含量 30%—50%)、中砾石土(砾石含量 50%—70%)、重砾石土(砾石含量) $>70\%$ 。

(2)植被覆盖度。植被可以通过自身的物理形状、柔韧性、密度以及分布等影响水力学参数,增加水陆交错带河床的粗糙度,降低地表径流流速,增加土壤入渗,从而有效拦截径流中漂浮物及径流泥沙等污染^[18]。本实验采用机械布设小样方的方法测量盖度。

(3)岸坡坡度。坡度是影响水陆交错带径流流速的重要指标。实验表明水陆交错带岸坡坡度的变化对于面源污染影响效果显著^[19],坡度越小,地表径流流速越低,土壤入渗量越大,流入水体的污染物浓度越低。

表 1 漓江水陆交错带样地基本情况
Table 1 The basic situation of riparian zone

样地 Sample mark	河漫滩土质类型 Floodplain soil characteristics	土层厚度 Soil thickness/cm	植被缓冲带宽度 Width of vegetation buffer belt/m	岸坡坡度 Slope of bank/(°)	立地类型 Site type	护岸措施 Shore protection measures	植被配置类型 Plant configuration type	优势灌木 Dominant shrub	优势草本 Dominant herbs
A	轻砾石土	68.8	31	15	2c	无	乔灌木	夹竹桃	狗牙根、鼠尾草
B	砾质土	31.5	28	14	2b	无	乔草	无	狗牙根、水竹叶
C	轻砾石土	20.2	21	23	2b	无	灌木	芭麻、桑树(幼树)	水竹叶、空心莲子草
D	中砾石土	31.0	22	12	2b	无	灌木	水杨梅	空心莲子草
E	重砾石土	13.2	13	12	2a	无	草	无	艾草
F	轻砾石土	59.5	24	23	2c	植物措施	乔灌木	水杨梅、一叶萩	水蓼、苍耳
G	砾质土	29.4	18	23	2b	综合措施	灌木	枫杨(幼树)	狗牙根、苔草、酢浆草、鹅观草
H	中砾石土	41.6	18	21	2c	无	乔草	无	狗牙根、苔草
I	砾质土	65.9	25	9	2c	植物措施	乔灌木	水杨梅、一叶萩	艾草、苔草
J	重砾石土	11.5	25	17	2a	工程措施	草	无	白茅、狗牙根
K	轻砾石土	24.5	29	7	1b	综合措施	灌木	水杨梅	水蓼
L	轻砾石	59.0	19	7	1c	无	乔灌木	黄荆	艾草、荻草
M	中砾石土	29.6	11	5	1b	无	灌木	枫杨(幼树)	结缕草、双穗雀稗
N	砾质土	49.7	31	14	2c	无	乔灌木	枫杨(幼树)	假俭草
O	轻砾石土	30.2	32	21	2b	工程措施	灌木	水杨梅	狗牙根、鼠尾草
P	轻砾石土	48.6	15	25	2c	无	灌木	水杨梅	狗牙根、蒿蓄
Q	中砾石土	19.8	19	6	1a	无	草	无 None	狗牙根、苔草、红根草
R	砾质土	75.6	38	19	2c	综合措施	乔灌木	枫杨(幼树)	狗牙根、苔草
S	轻砾石土	36.9	25	15	2b	无	灌木	芭麻	红根草
T	轻砾石土	39.3	30	17	2b	无	乔灌木	水杨梅	狗牙根、苔草

以阿拉伯数字 1、2 分别代表河滩地类型组与岸坡地类型组,字母 a、b、c 分别代表薄土层、中土层、厚土层;1a.薄土层河滩地、1b.中土层河滩地、1c.厚土层河滩地、2a.薄土层岸坡地、2b.中土层岸坡地、2c.厚土层岸坡地

(4) 植被缓冲带宽度。植被缓冲带宽度是影响延缓地表径流流入水体的主要因素,一般认为,一定范围内,在其他条件相同或相似的情况下,带宽越大,阻水截污效果越好^[20]。植被缓冲带的范围下至与洪水接触的界线,上至水陆交错带植物区域的顶端,所测距离即为植被缓冲带宽度。

(5) 生态护岸措施。生态护岸是结合生态工程与水土保持工程技术的一种护岸形式,对于削减洪水、延缓径流具有非常重要的作用。有研究表明:在漓江水陆交错带护岸效果评价中,植物措施>综合措施>工程浆砌措施>工程石笼措施^[9]。本文借鉴该研究成果,调查并记录所选样地中护岸措施现状,重新进行统一后归类,分为植物措施、综合措施、工程措施和无。

(6) 植被配置类型。不同的植被配置类型截留的污染物种类以及污染物数量不同。例如:灌木对于漂浮物截留效果明最好,草本植物对于径流污染物的截留效果最佳,乔木林截污能力方面远不及灌木,但是可以起到稳定岸坡、改善土壤和防止水土流失的作用。研究表明:草本+灌木+乔木的植被组合在防治面源污染和土壤抗侵蚀方面效果优于草本+灌木和草本+乔木的植被组合^[21]。

(7) 植物多样性。植物多样性影响着整个生态系统稳定性与生态系统健康性。本文通过对样地内植被调查,记录乔、灌、草各种类型植被种类、数量等特征,并计算 Shannon-Wiener 多样性指数。

(8) 草本生物量。植物生物量是指某一时间单位面积或体积栖息地内所含一个或一个以上生物种,或所含一个生物群落中所有生物种的总个数或总干重。有研究发现,草本生物量的变化与水陆交错带截污效果具有明显的正相关关系^[1]。本研究采用收割法测量,在 1m×1m 的草本样方中,将所有植物地上部分剪下,称量鲜重,然后带回室内,在 65 度的烘箱内烘干至恒重,计算其含水率以及干重。

(9) 灌木枝条柔韧性。灌木枝条柔韧性对于拦截漂浮物起着重要作用,是水陆交错带护岸植物材料选择的一个重要依据,也是衡量植物是否适用在水陆交错带生态修复中的一个重要条件。根据植物力学原理,面对水流冲刷时,枝条柔韧性弱、刚性强的植物最大抗弯能力强,抗折断能力也强,能承受更大的外界压力,从而可以增加拦截漂浮物的能力^[22]。本研究在每块灌木样地中各选取 20 个茎秆横截面积相近的新鲜枝条作为样本,在距离地面 50cm 处用拉力计做拉力测验,沿水平方向拉伸 30cm 并记录拉力计读数。

(10) 枯落物含量。枯落物对降雨、径流带来的污染物有重要的截留作用,可以有效过滤并吸收林冠淋溶的物质,具有一定厚度的枯落物可以将有机氮转化为可供植物及微生物吸收利用的氨化氮,并且枯落物厚度与枯落物拦蓄能力呈显著正相关关系^[23]。本文采取地表收集法对每个草本样方收集枯落物,带回实验室在 65°烘箱内烘干至恒质量,称量其质量并取平均值。

(11) 土壤机械组成。土壤机械组成影响着土壤的吸附性,是影响水土流失的重要因素,也是影响截留转化污染物效率的主要因素。土壤中黏粒含量与土壤吸附性及土壤截留能力成正相关关系^[24]。将土壤样品带回实验室,采取比重计进行测定土壤中黏粒(直径<0.002mm)含量,主要有以下步骤:①称样;②制备悬液;③测定悬液比重;④计算与数据处理。

(12) 土壤含水率。水陆交错带土壤含水率是水陆交错带生态系统中一个特殊因子,土壤含水率的多少与距水体的远近呈线性关系,且研究表明,水陆交错带土壤含水率与土壤氮、磷含量直接存在显著正相关^[25],即:土壤含水率越高,越能促进土壤对氮、磷的富集。本文采用烘干法测量土壤含水率。

(13) 土壤有机碳含量。土壤中有机碳的含量决定着微生物反硝化作用,增加土壤中有机碳含量是去除土壤中 NO_3^- -N 的有效方法,且水陆交错带土壤反硝化速率与土壤有机碳含量呈显著正相关关系^[26]。本文采取重铬酸钾氧化—外加热法测定土壤有机碳含量。

(14) 土壤根密度。植物根系固结作用对土壤抗冲性有重要影响,强化土壤抗冲性的能力主要取决于土壤中有效根系密度(即 $\leq 1\text{ mm}$ 径级的须根密度)的大小,有效根密度越大抗冲性越好,减少水土流失并拦截污染物能力越强^[27]。同时植物根系的吸收作用可将硝态氮转化为可供植物吸收的有机氮,从而减少污染物流入水体污染源。本实验在每块样地取 3 个 10cm×10cm×10cm 的土壤截面,清查每个土方上小于 1 mm 径级须根的根数,得出每个土方的须根数,再计算 3 个土方须根数的平均值。

2.4 评价方法

本文采用美国著名运筹学家、匹茨堡大学教授 T.L.Saaty 提出的层次分析法 (AHP) 结合专家打分法进行指标权重的确定。AHP 在系统工程中, 能将非定量事件做定量分析, 复杂问题分解化, 在指标计算权重过程中准确性高、耗时少。

2.4.1 建立层次分析结构

AHP 中最关键的一步就是建立层次分析结构。首先分析和确定影响截污效果的主要特征因素, 将这些因素按照其属性分为若干组, 再根据支配关系归为不同层次, 如目标层、标准层、指标层, 最后建立一个合理的层次分析法结构模型, 即评价指标体系。

2.4.2 构建判断矩阵

通过咨询相关的水文学家、生态学家、环境质量评价专家等, 由专家参与打分; 并结合漓江实际情况, 对层次分析结构模型中的影响因子两两比较, 采用 9 分制构造判断矩阵。

2.4.3 一致性检验

为了检测判断矩阵中赋值可靠性以及各元素重要度之间的协调性, 需要进行一致性检验, 计算公式如下:

$$C_i = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$C_R = C_i / R_i$$

式中, C_R 表示随机一致性比率; C_i 表示判断矩阵一致性指标; R_i 表示判断矩阵平均随机一致性指标; $\lambda_{\max}$ 表示判断矩阵最大特征根; n 表示判断矩阵阶数。当 $C_R < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性, 排序合理; 当 $C_R \geq 0.1$ 时, 需要调整判断矩阵赋值, 直至 $C_R < 0.1$ 为止。

2.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 2015 软件录入样地内所有指标, 进行计算与处理并绘制相应图表。将处理后的数据运用统计软件 SPSS 10.0 进一步的整理与分析, 并结合层次分析法、专家打分法, 计算每项指标所得分数。运用 OriginPro 2017 软件对评价分值作柱状图堆积表分析。

3 确定评价模型

3.1 确定评价指标体系

水陆交错带截污过程发生在具有一定宽度的河滩、土壤、植物组成的生态系统内, 通过拦截、吸收、渗透、沉积等作用达到拦截漂浮物、沉泥阻沙、过滤并削减水体氮和磷等污染物含量的效果。当降雨、洪水到达水陆交错带时, 河漫滩由于自身具有粗糙度会对水体起阻拦作用, 岸坡结构会影响径流流速, 两者共同起到阻水作用; 其次是植被对污染物的拦截吸收和转化作用, 灌木可以对大型漂浮物有效拦截, 草本对径流、泥沙拦截效果明显, 枯落物可将有机氮转化为氨化氮供植物及微生物吸收利用; 当污染物进入土壤, 土壤可吸附大量离子, 降低地表径流对污染物的运送能力, 避免过量营养元素进入水体造成水体富营养化。综上所述, 本文主要从河漫滩和岸坡阻水效果、植被截污效果、土壤吸附效果 3 方面筛选出 14 个指标对水陆交错带截污效果进行综合评价。并利用 AHP 进行排序划分, 最终建立了完整的评价指标体系, 如图 1 所示:

3.2 指标权重的确定

经过对国内外学者在相关评价技术中关于指标权重的研究, 对比其中的优缺点, 决定采用专家打分法和层次分析法相结合的方法确定指标权重。根据 2.4 中的方法和步骤, 计算各项指标权重, 再经过一致性检验, 均符合要求, 评价指标体系权重结果如下表 2。

3.3 评语等级划分

3.3.1 综合评价指标计算

综合评价指标计算是将各个指标因子的权重值与等级评分值进行层次加权计算得到, 计算公式如下:

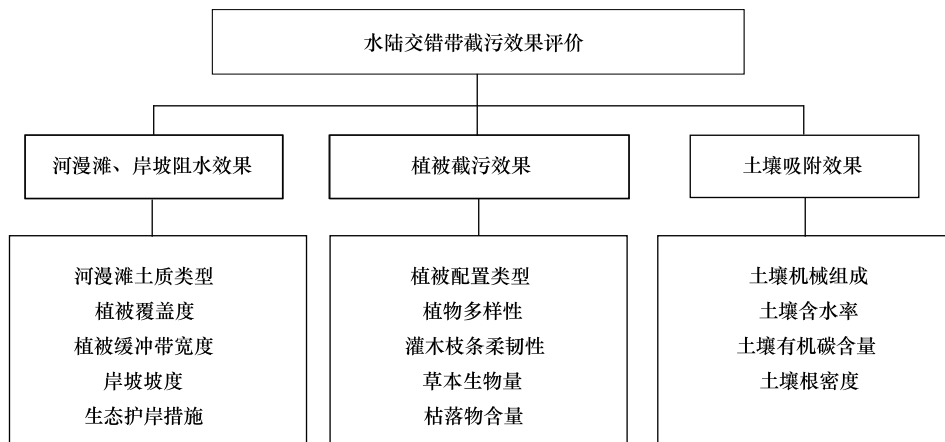


图1 水陆交错带截污效果评价指标体系

Fig.1 The evaluation index system of riparian zone interception efficiency

$$N = \sum_{i=1}^{14} D_i F_i$$

式中, N 为漓江水陆交错带截污效果综合评价指数; D_i 为第*i*个指标所占权重; F_i 为第*i*个指标的评分值。

表2 评价指标体系权重

Table 2 Weights of indicators in assessment system

评价标准 Standard	评价指标 Indicators	指标赋值 Index value			
		优 Excellent (4 分)	良 Good (3 分)	中 General (2 分)	差 Poor (1 分)
河漫滩、岸坡阻水效果 Effect of water blocking on bank slope and flood plain	河漫滩土质类型	砾质土	轻砾石土	中砾石土	重砾石土
	植被覆盖度/%	>80	60—80	40—60	<40
	河漫滩缓冲带宽度/m	>30	20—30	10—20	<10
	岸坡坡度/(°)	<10	10—15	15—20	>20
	护岸措施	植物措施	综合措施	工程措施	无
植被截污效果 Effect of vegetation interception	植被配置类型	乔灌木	灌木	乔木	草或裸地
	物种多样性	>2.5	2.0—2.5	1.5—2.0	<1.5
	灌木枝条柔韧性/N	>35	30—35	25—30	<25
	草本生物量/(kg/m ²)	>1.2	0.8—1.2	0.4—0.8	<0.4
	枯落物含量/(kg/m ²)	>1.2	0.8—1.2	0.4—0.8	<0.4
土壤吸附效果 Effect of soil adsorption	土壤机械组成/%	>45	40—45	35—40	<35
	土壤含水率/%	>30	25—30	20—25	<20
	土壤有机碳含量/(g/kg)	>35	25—35	15—25	<15
	土壤根密度/根/(m ²)	>3000	2000—3000	1000—2000	<1000

3.3.2 截污效果等级划分

根据漓江水陆交错带截污效果评价体系的层次结构以及漓江水陆交错带截污效果的特点,将漓江水陆交错带截污效果评价等级分为优、良、中、差 4 个等级:

(1) 优($N \geq 3.25$):水陆交错带河漫滩及岸坡结构完整,植被种类丰富、覆盖率高,土壤吸附能力强,能有效降低径流流速、截留污染物,水陆交错带生态系统环境稳定健康。

(2) 良($2.50 \leq N < 3.25$):水陆交错带河漫滩及岸坡结构基本完整,植被种类多样,土壤吸附能力较强,整个水陆交错带生态系统对于外界污染物的降解能力较强。

(3) 中($1.75 \leq N < 2.50$):水陆交错带河漫滩岸坡结构有一定程度变形或破坏,植被物种单一,土壤条件吸附效果一般,截污效果不明显,水陆交错带生态系统容易遭受污染。

(4)差($N<1.75$):水陆交错带河漫滩岸坡结构存在明显破坏,植被稀疏或无植被,地表砾石较多,无土或土层薄,水陆交错带生态系统无法对外界污染力作出有效抵抗。

3.4 确定隶属度模型

确定隶属度模型,首先要明确各项指标的标准评价。本文选取指标标准的依据主要来源于以下:(1)国家和广西省以及桂林市规定的相关标准和规范,例如 SL219-98《水环境监测规范》等;(2)漓江风景区生态环境的背景值和本底值^[28],例如漓江风景区植被覆盖率、漓江水土流失本底值等;(3)类比标准,以类似条件的植被因子或土壤因子等作为类比标准。然后建立各评价指标的隶属度函数,再将实测值代入隶属度函数,求得各个等级的隶属度值,如表 3:

表 3 漓江水陆交错带截污效果评价指标赋值
Table 3 The evaluation value of pollution interception effect of riparian zone

评价目标层 Object layer	评价准则层 Standard layer	标准层权重 Weight	评价指标层 Indicators layer	指标层权重 Weight
水陆交错带截污效果评价 Evaluation of pollution interception effect of riparian zone	河漫滩阻水效果	0.595	河漫滩土质类型	0.084
			植被覆盖度	0.173
			河漫滩缓冲带宽度	0.198
			岸坡坡度	0.091
	植被截污效果	0.277	生态护岸措施	0.049
			植被配置类型	0.094
			物种多样性	0.066
			灌木枝条柔韧性	0.044
			草本生物量	0.04
			枯落物含量	0.033
	土壤吸附效果	0.128	土壤机械组成	0.054
			土壤含水率	0.034
			土壤有机碳含量	0.021
			土壤根密度	0.019

4 评价结果与分析

漓江水陆交错带样地综合评价得分结果见表 4,根据表 4 中数据制作柱状图,如图 2,20 块样地中,评价为“优”、“良”、“中”、“差”的样地分别占 10%、60%、25%、5%,说明漓江水陆交错带整体截污效果良好,但仍有很大的进步空间。通过纵向比较,水陆交错带阻水效果评价得分最高的是样地 R(2.149),得分最低的为样地 E(0.975),最大相差为 1.174,其中:R 样地为砾石含量低,结构完整,水陆交错带特征明显,E 样地为砾石滩,水陆交错带结构遭到明显破坏;植被截污效果评价得分最高的是样地 I(0.969),得分最低的为样地 E、J、Q(0.317),最大相差为 0.625,其中 I 样地植被配置方式为乔灌草,植被丰富、物种多样,样地 E、J、Q 植被配置单一,以草本为主,植被稀疏;土壤吸附效果得分最高的是样地 R(3.535),得分最低的为样地 H(1.826),最大相差为 1.709,其中样地 R 土壤水分充足、有机碳含量高,样地 H 土壤水分不足、有机碳含量低。通过横向比较,20 个水陆交错带样地中,综合得分在 3.25 分以上的有 2 个(I、R),此类样地截污效果明显,无需修复,人工长期监测与管理即可;得分在 2.50—3.25 分的有 12 个(A、C、D、F、G、K、L、M、N、O、S、T),此类样地截污效果较好,其中,样地 C、D、F、G、M 阻水效果一般,可以通过削减岸坡坡度、清除大块砾石、增加地表粗糙度等措施进行改善,样地 C、M 在植被截污效果方面还有上升空间,建议在植被种类的选择上进行更系统的规划,样地 A、C、D、G 可以通过改良土壤增加土壤吸附能力;得分在 1.75—2.50 分的有 5 个(B、H、J、P、Q),此类样地截污效果一般,原因是砾石含量较高、土层较薄、植被配置单一,建议采取植物为主、工程为辅的生态修复措施,植物措施以灌草为主,在立地条件不好、岸坡稳定性差的区域可采取工程措施修复,如铺设生态植被毯、浆砌石护

坡等;得分在 1.75 分以下的有 1 个(E),截污效果差,此类样地多为砾石滩,立地条件差,无土或土层薄、植被生长不良,可采用工程与植物措施相结合的生态修复措施,工程措施包括生态植被毯、克土喷播等工程绿化措施,植物措施以植草为主,适当点缀一些灌木,栽植前需整地,植被种类的选择上尽量选择对大颗粒基质抗逆性强且耐淹的植物。

表 4 漓江水陆交错带样地评分

Table 4 The score of sample plots of riparian zone

样地编号 Sample mark	河漫滩、岸坡阻水效果 Effect of water blocking on bank slope and flood plain	植被截污效果 Effect of vegetation interception	土壤吸附效果 Effect of soil adsorption	综合得分 Total score
A	1.712	0.881	0.296	2.889
B	1.622	0.491	0.345	2.458
C	1.596	0.688	0.29	2.574
D	1.43	0.842	0.237	2.509
E	0.975	0.317	0.182	1.474
F	1.57	0.87	0.385	2.825
G	1.58	0.754	0.289	2.623
H	1.166	0.423	0.237	1.826
I	2.091	0.969	0.384	3.444
J	1.353	0.317	0.216	1.886
K	1.876	0.802	0.344	3.022
L	1.778	0.819	0.369	2.966
M	1.479	0.688	0.398	2.565
N	1.771	0.921	0.383	3.075
O	2.016	0.732	0.344	3.092
P	1.316	0.798	0.331	2.445
Q	1.496	0.317	0.237	2.05
R	2.149	0.914	0.472	3.535
S	1.86	0.838	0.312	3.01
T	1.605	0.936	0.31	2.851

漓江水陆交错带立地类型平均得分结果见表 5,当土层厚度相近时比较两组立地类型组,平均得分 $1a > 2a$ 、 $1b > 2b$ 、 $1c > 2c$,说明在其他条件相近时,河滩地的截污效果普遍要比岸坡地的效果好,这可以理解水陆交错带岸坡坡度越缓,表面径流速度越慢,土壤入渗量越大,截污能力越强;当立地类型组相同时比较不同厚度类型的样地,平均得分 $1a < 1b < 1c$ 、 $2a < 2b < 2c$,说明其他条件相近时,土层厚度越大,土壤条件越优秀,植被生长状况越好,整体截污能力越强。

表 5 漓江水陆交错带立地类型平均得分

Table 5 The average score of the site type of riparian zone

立地分组 Site type group	立地类型 Site type	样地编号 Sample mark	平均得分 Average
河滩地 Overflow land	1a	Q	2.05
	1b	K、M	2.794
	1c	L、R	3.251
岸坡地 Bank slope	2a	E、J	1.68
	2b	B、C、D、G、O、S、T	2.731
	2c	A、F、H、I、N、P	2.750

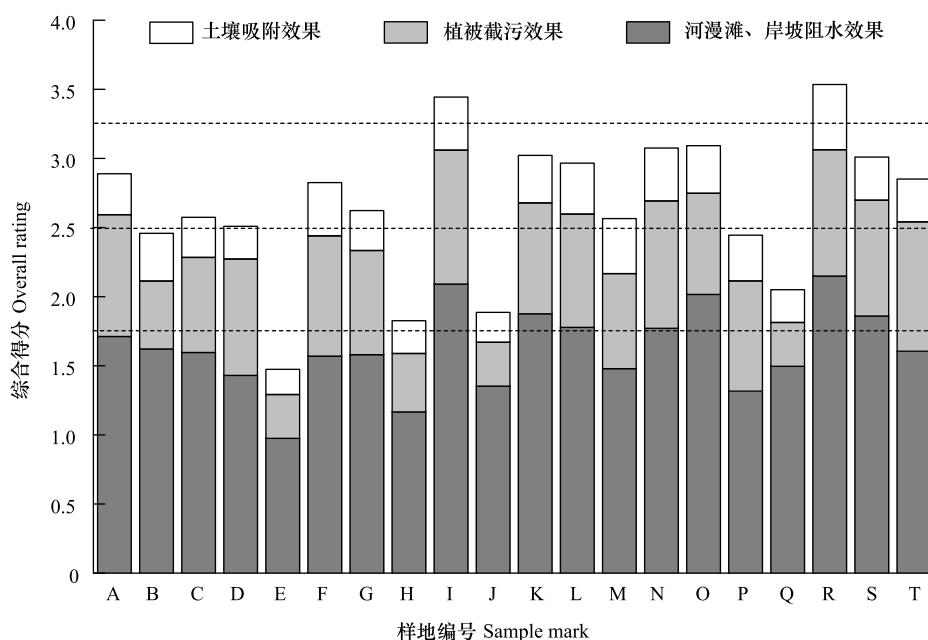


图2 漓江水陆交错带综合评价结果分析

Fig.2 Comprehensive evaluation results of riparian zone

5 结论与建议

1) 根据立地划分原则并结合广西壮族自治区漓江风景区实际情况,同时把土层厚度、坡度等结构因子作为主导因子,将漓江水陆交错带划分为两个立地类型组、6种立地类型,分别是:薄土层河滩地、中土层河滩地、厚土层河滩地、薄土层岸坡地、中土层岸坡地、厚土层岸坡地。通过对20块样地调查发现,漓江水陆交错带中薄土层河滩地占5%、中土层河滩地占10%、厚土层河滩地占10%、薄土层岸坡地10%、中土层岸坡地35%、厚土层岸坡地30%。

2) 建立了漓江水陆交错带截污效果评价的指标体系,准则层包括:河漫滩和岸坡阻水效果评价、植被截污效果评价、土壤吸附效果评价,筛选出14个指标,并对漓江两岸水陆交错带进行评价,评价结果表明:20块水陆交错带样地中,评价为“优”、“良”、“中”、“差”的样地分别占10%、60%、25%、5%,比较漓江水陆交错带立地类型平均得分情况发现,河滩地平均得分普遍大于岸坡地,且平均得分随土层厚度的增大而升高,表明:土层厚度、砾石含量、坡度等是影响立地质量、植被生长的重要因子,也是评价水陆交错带截污效果的重要依据,同时说明漓江水陆交错带整体截污效果良好,但是有少部分区域急需修复,部分区域有潜在生态危险,该评价结果与张丹丹、陈茜等人在漓江流域^[6-7,29]研究成果相符,说明该评价方法能真实有效的反映漓江水陆交错带截污效果。

3) 针对漓江不同截污效果的水陆交错带,提出以下修复意见:对于截污效果“优”类水陆交错带,建议保持其自然原貌,加强监测体系建设,提高水陆交错带的管理水平;对于截污效果“良”类水陆交错带,建议以自然恢复为主,适当增加人工干预,完善水陆交错带截污功能,并进行长期监测与管理;对截污效果“中”类水陆交错带,建议采取植物措施为主、工程措施为辅的生态修复模式,对于立地条件差、土壤条件差的区域加大工程绿化措施量,并进行长期监测与管理;对于截污效果“差”类水陆交错带,可采取工程措施与植物措施相结合的生态修复模式,工程绿化措施和改善立地条件后,尽可能选择大颗粒基质抗逆性强且耐淹的草类植物(如艾草、空心莲子草等)进行种植,并加以监测与管理。

4) 漓江水陆交错带截污效果评价过程中受到众多因素的干扰,例如,获取评价指标时,易遭到降雨、洪水等因素的干扰导致实测值与实际值有偏差;同时温度、湿度等会对指标数值产生影响。因此在指标选取时尽

可能与实际自然环境相结合,增加样本数量,对所得数据进行进一步检验与修正,使其准确性更高,评价结果更具有说服力。

参考文献(References):

- [1] 夏继红,严忠民.生态河岸带研究进展与发展趋势.河海大学学报:自然科学版,2004,32(3):252-255.
- [2] Wilson L G. Sediment removal from flood water by grass filtration. Transactions of the ASAE, 1967, 10(1): 35-37.
- [3] Lloyd A, Law B, Goldingay R. Bat activity on riparian zones and upper slopes in Australian timber production forests and the effectiveness of riparian buffers. Biological Conservation, 2006, 129(2): 207-220.
- [4] Onrizal, Ismail S N, Hamid M A, Mansor M. The current status of riparian vegetation along bank of kelantan river after the worst flood for decades. Wetland Science, 2017, 15(1): 60-65.
- [5] 夏继红,严忠民,蒋传丰.河岸带生态系统综合评价指标体系研究.水科学进展,2005,16(3):345-348.
- [6] 张丹丹,王冬梅,任远,周思思.滨岸植被带对漂浮物拦截效果及其影响因素.北京林业大学学报,2015,37(4):98-103.
- [7] 张丹丹,王冬梅,信忠保,史常青.漓江滨岸草带对径流泥沙的拦截效果.生态学报,2016,36(21):6985-6993.
- [8] 吴林川,王冬梅,卢洋,任远,黄端.漓江水陆交错带硝态氮淋失规律的模拟研究.水土保持学报,2016,30(1):20-25.
- [9] 周思思,王冬梅.河岸缓冲带净污机制及其效果影响因子研究进展.中国水土保持科学,2014,12(5):114-120.
- [10] 许立巍,郭德钦.漓江水面漂浮物情况调查及处理方式分析.轻工科技,2013,(6):128-129.
- [11] 韩耀全,周解,吴祥庆.漓江的自然地理与水质调查.广西水产科技,2007,(2):8-16.
- [12] 任远,王冬梅,信忠保.漓江流域水陆交错带植被配置型式分类及生态特征.生态学报,2014,34(15):4423-4434.
- [13] Paillex A, Schuwirth N, Lorenz A W, Januschke K, Peter A, Reichert P. Integrating and extending ecological river assessment: concept and test with two restoration projects. Ecological Indicators, 2017, 72: 131-141.
- [14] 杨璐,杜红玉,宋雪珩,江洪,田晶晶,蔡永立.黄浦江河岸带植物资源调查与健康状况评价.中南林业科技大学学报,2017,37(8):72-80.
- [15] 王兵,高甲荣,王越,杨建英,顾岚,高宇婷.北京市永定河生态护岸效果评价.中国水土保持,2014,(4):10-13.
- [16] 娄会品,高甲荣,陈子珊.北京郊区河岸带自然性评价指标体系.水土保持通报,2010,30(1):161-165.
- [17] 王冬梅,王晶.水陆交错带生态修复体系构建及生态系统管理.北京:中国水利水电出版社,2017:73-74.
- [18] 张升堂,梁博,张楷.植被分布对地表糙率影响.水土保持通报,2015,35(5):45-48,54-54.
- [19] 钱进,王超,王沛芳,侯俊,高越超.坡度对入渗河岸带表土层氮素截留效果的影响.河海大学学报:自然科学版,2011,39(5):489-493.
- [20] 申小波,陈传胜,张章,孙晓涛,肖波.不同宽度模拟植被过滤带对农田径流、泥沙以及氮磷的拦截效果.农业环境科学学报,2014,33(4):721-729.
- [21] 吴健,王敏,吴建强,杨泽生,唐浩.滨岸缓冲带植物群落优化配置试验研究.生态与农村环境学报,2008,24(4):42-45,52-52.
- [22] 刘瑛,高甲荣,顾岚.基于植物柔韧性的土壤生物工程护岸材料选择.北京林业大学学报,2013,35(6):74-79.
- [23] 周娟.大辽河流域水源涵养林水文效应及其水质研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [24] 郭彬,汤兰,唐莉华,何威威.滨岸缓冲带截留污染物机理和效果的研究进展.水土保持研究,2010,17(6):257-262,274-274.
- [25] 向繁国.长江上游江津段德感坝河岸带植物群落结构及多样性研究[D].重庆:西南大学,2014.
- [26] 娄焕杰,邓焕广,王东启,陈振楼,李杨杰.上海城市河岸带土壤反硝化作用研究.环境科学学报,2013,33(4):1118-1126.
- [27] 李勇,朱显谟,田积莹.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性.科学通报,1991,36(12):935-938.
- [28] 广西壮族自治区统计局.广西统计年鉴—2016.北京:中国统计出版社,2016:105-125.
- [29] 陈茜.漓江流域水陆交错带立地类型划分与评价[D].北京:北京林业大学,2013.