

肖羽芯,王妍,刘云根,等.典型岩溶湿地流域生态功能区划研究——以滇东南普者黑流域为例[J].华中农业大学学报,2020,39(2):47-55.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.02.007

# 典型岩溶湿地流域生态功能区划研究

——以滇东南普者黑流域为例

肖羽芯<sup>1</sup>,王妍<sup>1,2</sup>,刘云根<sup>1</sup>,郭玉静<sup>1</sup>,张紫霞<sup>1</sup>,刘鹏<sup>1</sup>

1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224; 2.西南林业大学石漠化研究院,昆明 650224

**摘要** 以滇东南典型岩溶湿地普者黑流域为研究对象,在确定区划目标前提下,在区域生态环境调查基础上结合地理信息系统和遥感工具,从生态环境敏感性、生态服务功能重要性以及区域发展优势度3个方面,明确生态环境敏感性和生态服务功能重要性的区域分异规律,将研究区划分为3个大区、6个亚区,并在此基础上划分普者黑流域的生态功能区,明确各个小区的主要生态问题及其发展方向。研究表明:西部农林生态农业建设功能区的农业生产结构低下,区域经济发展需以水源保护为前提;东部生态旅游功能区的生计模式搭配不合理,区域应将生态环保理念与经济发展结构相结合;南部湿地生态保护功能区水源涵养和水土保持功能突出,但工业污染严重,控制区域工业污染同时应采取相应水土保持措施。

**关键词** 岩溶湿地;生态功能区划;生态敏感性;AHP分析法;信息熵;生态环境敏感性;区域发展;普者黑流域

中图分类号 X 826 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2020)02-0047-09

生态功能区划是根据区域生态系统格局、生态环境敏感性与生态系统服务功能空间分异规律,将区域划分成不同生态功能的地区。生态功能区划的主要目的是确定和保护对人类福祉至关重要的生态系统,从而保持长期提供人类需要的生态系统生产和服务的能力<sup>[1]</sup>。因此,确定和保护对人类福祉至关重要的生态系统,区域资源的合理开发利用就至关重要<sup>[2]</sup>。近年来生态功能区划主要强调生态系统提供服务 and 受到胁迫的程度<sup>[3]</sup>,更侧重于生态功能类型、重要性、敏感性等。如,孙京姐<sup>[4]</sup>对泗河流域生态系统进行了区划评价;许心倩<sup>[5]</sup>通过泰安市区域的生态环境现状、生态环境敏感性、生态系统服务功能的重要性评价对其进行生态功能区划分。孙然好等<sup>[6-7]</sup>基于流域生态系统的时空演化规律,对流域进行生态功能分区。目前,对于流域生态系统的功能区划的研究主要集中于生态环境敏感性和生态系统服务功能对流域的影响两个方面<sup>[8]</sup>。但是生态功能区划存在涉及地域类型的范围广、生态属性多且组成关系繁杂以及旧有的区划方案无法满足现实需要等特点,需要因地制宜,针对特殊环境问题制定不

同的区划方案。

我国岩溶地层层面积约占国土总面积的1/3,在6种主要的岩溶地貌中,西南地区岩溶地貌具有孤峰多、土层薄、洼地广等特点,使得岩溶湖泊及湖滨湿地数量众多<sup>[9]</sup>,独特的地形地貌和特殊的岩溶湖泊生态系统,具有较高的研究及保护价值。目前区域经济的发展导致该区生态环境问题频发,而关于该区域发展方面的宏观规划研究较少<sup>[10-11]</sup>。本研究以岩溶湿地区域特殊的地质条件为本底,选择岩溶湿地流域普者黑为研究对象,融合定性分析与定量分析<sup>[12-14]</sup>,通过层次分析和综合指数的方法对指标数据进行计算。并采用区划要素评价的方式,根据生态功能区划的理论、原则与方法,探析典型岩溶湿地流域内生态资源的分布特征和人类活动对生态系统干扰的特征,以期对岩溶湿地流域地区的功能区划方法和规划发展方向提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

普者黑岩溶湿地位于云南省东南部的丘北县境

收稿日期:2019-03-24

基金项目:国家自然科学基金项目(31560237;31760245)

肖羽芯,硕士研究生.研究方向:脆弱生态系统修复. E-mail:xyx36248498@126.com

通信作者:王妍,副教授.研究方向:脆弱生态系统恢复. E-mail:wycyf@126.com

内,地处云贵高原向桂西平原斜坡地带的滇东南褶皱带中山峰丛洼地岩溶区,地貌呈现罕见的高原喀斯特峰林、峰丛、湖群相间构造,水面 10.8 km<sup>2</sup>,是珠江流域分支内较大的湖泊,有着丰富的湿地复合生态系统。该区地质构造丰富多变,具有层次性,包含褶皱、断裂发育,是典型发育的岩溶地貌。规划区所在地丘北县属滇东南喀斯特山原丘陵地带,境内山多平地少,地势西南高而平坦、东北低。独特的地理位置与环境,并具有常见的溶沟、石芽、溶蚀洼地、峰林、落水洞等类型,使得该区域内生态系统敏感性高、抗干扰及承受能力较差,是典型的生态敏感区。

规划区属低纬度季风气候,具有终年温和湿润的中亚热带气候特征,多年平均气温 16.4 °C,极端高温 35.7 °C,极端低温 -7.6 °C。多年平均降雨量 1 206.8 mm,年平均日照时数 1 800 h,年相对湿度 77%,无霜期 259 d,平均风速 2.0 m/s。

普者黑流域在涵养水源、水文调蓄、产品提供、生态系统安全和岩溶地貌湿地特有的生物多样性保育等方面发挥着独特和不可替代的生态服务功能。但目前面临 3 个问题:

(1)湖泊保护压力剧增,流域污染源控制亟待加强。目前,由于近湖工农业和生活供水、交通运输、水力发电、观光旅游、维系区域、繁衍水产等依靠湖泊资源而进行的人类活动,造成流域内湖泊入湖污染源种类繁多且源点分散。湿地水质总体符合地表水环境质量Ⅲ类标准,但氮磷含量超过标准临界值的状况时有发生,湖泊富营养化问题已成为普者黑湿地保护面临的重大难题。

(2)流域生态系统恢复有待提速。普者黑湖泊是中国西南地区最大的岩溶湖泊,地貌景观独特罕见,高原喀斯特峰林、峰丛、湖群组成的湿地复合生态系统。流域内环境的长期失衡将使得整个大区域内生态系统受到干扰。

(3)保护与发展的矛盾体急需破解。由于对陆生生态系统、湿地生态系统两者之间内在联系的忽视,在发展模式上造成湿地生态系统的结构特征与功能分区彼此矛盾、不相适应的现状,从而导致在发展区域经济的条件下,湿地保护效果不理想,整个功能区划不协调,衍生出更多的湿地问题。

## 1.2 研究方法 with 数据收集

1)区划原则。本研究区划主要遵循 5 个原则:

(1)可持续发展原则。生态功能区划的目的即是促进生态资源的合理开发与利用,避免资源的过

度开发而导致的生态环境破坏,增强区域内社会经济发展的生态环境支撑能力,以促进区域的可持续发展。

(2)发生学原则。根据区域内生态问题、生态环境敏感性以及生态服务功能区域生态系统结构、过程、格局的关系,来确定区划过程中的主导因子与区划依据。

(3)区域相关原则。在空间尺度上,生态服务功能的评价与区划都应该与该区域甚至更大范围的自然环境与社会经济因素相关。

(4)相似性原则。生态环境状况虽然会在特定区域内趋于一致,但由于地域之间自然因素的差别和当地人类活动的影响,使得区域内生态系统结构、过程和服务功能存在某些相似性和差异性。生态功能区划是根据区划指标的一致性与差异性进行分区。

(5)区域共轭性原则。任何生态功能区划都必须是一个完整的个体,不存在彼此分离的部分。

2)区划方法。在确定区划目标前提下,结合区域生态环境调查,进行生态环境现状评价、生态环境敏感性评价和生态服务功能重要性评价,分析主要生态环境问题的现状和趋势,明确生态环境敏感性和生态服务功能重要性的区域分异规律。主要评价指标和方法如表 1 所示。

3)区划指标体系构建。本研究的指标体系包括 3 个一级指标、8 个二级指标和 14 个三级指标,依据生态环境敏感性、生态服务功能重要性和区域发展优势度<sup>[29]</sup> 3 个影响因素对普者黑流域的生态系统进行功能区划。

4)指标体系权重确定。层次分析法:用 AHP 计算评价指标的权重分配可使人的判断更具客观性,避免偏离客观实际不能通过一致性检验。因此,必须及时调整判断矩阵,直至通过一致性检验<sup>[30-31]</sup>。本研究使用信息熵来进行修正,通过信息熵比较不同指标的相对重要性。然后获得相对重要性的度量,再引入评估者的主观判断权重,综合实际权重,排除人为因素、风险因素等干扰因素,得到最终的评价权重<sup>[32]</sup>。

用 AHP 方法求得评价指标集  $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ , 权重  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ , 其中判断矩阵为  $B = (b_{gh})_{q \times q}$ 。那么,用信息熵对其修正的步骤如下:①对  $B$  进行归一化处理  $b'_{gh} = b_{gh} / \sum_{g=1}^q b_{gh} (g, h = 1, 2, \dots, q)$ ; ②定义指标  $U_h = (1, 2, \dots, q)$  的输

表 1 普者黑流域生态功能区划方法

Table 1 The ecological functional zoning method of Puzhehei basin

评价目标 Evaluation objectives	评价指标 Evaluation index	公式或方法 Formula or method
生态环境敏感性评价 Eco-environmental sensitivity evaluation	地形起伏度敏感性分析 <sup>[13-15]</sup>	ArcGis 的邻域分析模块 (Neighborhood Statistics) 工具, 取 3×3 窗口提取地形起伏度
	土壤可蚀性 K 值 <sup>[16]</sup>	$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orge} \cdot f_{hisand}$
	植被覆盖度 <sup>[17-18]</sup>	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
	土壤侵蚀敏感性综合分析 <sup>[18]</sup>	通过 ArcGis 的 Raster calculator 工具进行加权运算: $E_j = \sum_{i=1}^3 W_{ij} B_{ij}$
	石漠化敏感性评价 <sup>[19-20]</sup>	ArcGIS10.1 空间分析中的 Surface Analysis 功能提取出坡度因子
生态服务功能重要性评价 Evaluation of the importance of ecological services	生物多样性维持功能评价 <sup>[22-25]</sup>	对生物多样性分布图作数字化处理
	水源涵养重要性评价 (地表植被覆盖) <sup>[26-27]</sup>	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
	产品提供重要性评价 <sup>[21,28]</sup>	选取单位面积第一产业值进行产值评估
	服务功能重要性综合评价	$S_{Fj} = \sum_{i=1}^3 W_i \times S_i$
区域发展优势度 <sup>[24]</sup> The dominance of regional development	经济发展优势度评价	选取区域内二、三产业收入和人均纯收入做评价指标
	区位优势度评价	选取区国省道的分布情况, 以及交通运输线对区域的辐射范围作为评价因子
	人类活动强度评价	人口密度: $P_i = \frac{N_i}{S_i}$
	区域发展优势度综合评价	$S_{Fj} = \sum_{i=1}^3 W_i \times S_i$

出熵  $E_h = \sum_{g=1}^q b'_{gh} \ln b'_{gh} / \ln q$ ; ③求指标  $U_h$  的偏差度  $d_h = 1 - E_h$ ;  $\mu_h = d_h / \sum_{h=1}^q d_h$ ; ④确定指标  $U_h$  的信息权重; ⑤将权重分配集合  $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$  修正为  $W' = [\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_n]$ , 计算公式  $W'_h = \mu_h \omega_h / \sum_{h=1}^q \mu_h \omega_h$ 。

综合指数法。本研究运用综合指数法来评价, 综合指标法又叫指数法<sup>[30]</sup>, 通过计算指标体系中的各项因子得到其分指数, 然后再用加权平均法等公式计算出综合指数。

$$I_j = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i$$

5)数据来源。遥感影像数据来源于美国航空航天局(NASA) Landsat-8 OLI 卫星影像; 2015 年 12 月 9 日, 空间分辨率为 30 m 的普者黑流域遥感影像数据。普者黑流域各类文献资料: 人口、单位面积第一产业值、农民人均纯收入、二三产业收入、面积及基础图件(行政区划、交通等), 获取于云南省数字乡

村网 2016 年数据和文山壮族苗族自治州环保局及有关部门和网络。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用数据库

本研究涉及的岩溶湖泊湿地流域指的是普者黑流域, 其位于滇东南丘北县境内 (103°55'~104°13'E, 24°05'~24°12'N), 研究区面积为 331.68 km<sup>2</sup> (图 1)。

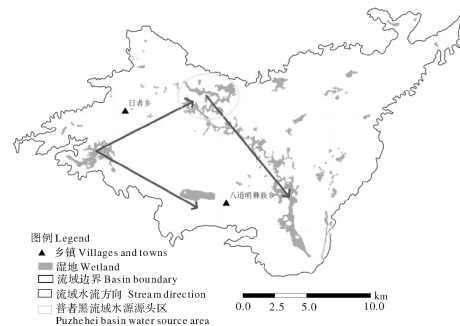


图 1 研究区水源流向分布图

Fig.1 The distribution map of water source flow direction in the research area

依据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2007),普者黑流域土地利用分布图如图 2 所示。由图 2 可知,普者黑流域耕地面积最大,为 201.76 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 60.83%,其次是林地,面积为 91.71 km<sup>2</sup>,占比为 27.65%,湿地面积为 20.41 km<sup>2</sup>,占比为 6.15%,建设用地、未利用地与园地的面积分别为 9.52、3.51、2.52 km<sup>2</sup>,分别占流域总面积的 2.87%、

1.06%与 0.76%,草地面积最小,为 2.25 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 0.68%。其中,人为干扰面积为 217.31 km<sup>2</sup>,占流域面积的 65.52%。

### 2.2 要素评价权重

根据层次分析法以及信息熵的修正,得到指标区划要素指标体系的权重(表 2)。

### 2.3 生态功能分区

图 3 为普者黑流域基于生态环境敏感性评价、生态系统服务功能评价和区域发展优势度评价获得的普者黑流域专题评价图。普者黑流域生态敏感性评价分为:一般敏感区的面积为 13.13 km<sup>2</sup>,主要分布在湖泊与水库区域,占研究区总面积的 3.96%;比较敏感区的面积为 48.72 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 14.70%,中度敏感区的面积最多,面积为 201.63 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 60.82%,主要分布在新寨村、八道哨村、普者黑村与双龙营村。高度敏感区的面积为 68.01 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 20.52%。由评价结果可知,普者黑流域生态敏感性主要以中高

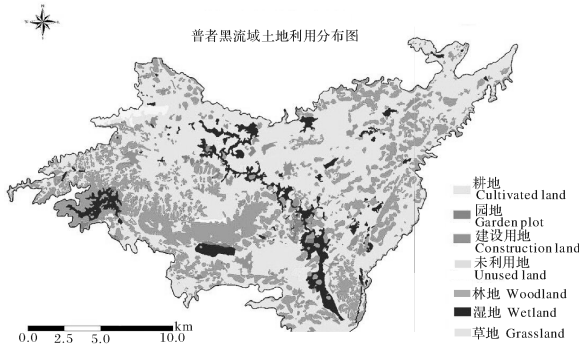


图 2 普者黑流域土地利用分布图  
Fig.2 The land use of Puzhehei basin

表 2 普者黑流域区划要素评价权重

Table 2 The evaluation weights of the elements in Puzhehei basin

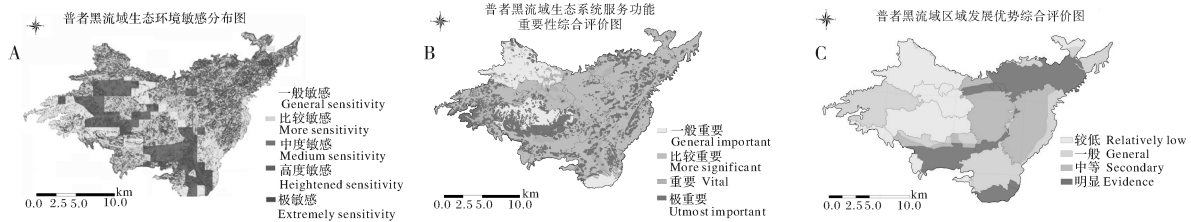
目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	权重 Weight of index	指标层 Marker bed	权重 Weight of index
生态环境敏感性评价 A1 Eco-environmental sensitivity evaluation A1	土壤侵蚀敏感性 B1 Soil erosion sensitivity B1	0.667	地形起伏度 C1 Relief amplitude C1	0.200
			土壤可蚀性 K 值 C2 Soil erodibility (K) C2	0.300
	石漠化敏感性 B2 Desertification sensitivity B2	0.333	植被覆盖度 C3 Vegetation fraction C3	0.070
			坡度 C4 Slope C4	0.107
			植被覆盖度 C5 Vegetation fraction C5	0.323
生态服务功能重要性评价 A2 Evaluation of the importance of ecological services A2	生物多样性 B3 Biological diversity B3	0.140	土地利用类型 C6 Land-use type C6	0.035
	水源涵养 B4 Water conserving capacity B4	0.528	物种保护级别 C7 Species protection level C7	0.105
			植被覆盖类型 C8 Vegetation type C8	0.528
	产品供给 B5 Product supply B5	0.333	单位面积第一产业值 C9 Primary industry value C9	0.333
区域发展优势度 A3 The dominance of regional development A3	经济发展优势度 B6 The preponderance of economic development B6	0.442	二三产业 C10 Secondary and tertiary industries C10	0.163
	区位交通优势度 B7 Location and traffic advantage B7	0.159	乡村人均纯收入 C11 Rural per capita net income C11	0.325
			省道 C12 Provincial road C12	0.179
	人类活动强度 B8 The intensity of human activities B8	0.399	县道 C13 County road C13	0.089
			乡村人口密度 C14 Rural population density C14	0.244

度敏感为主,且生态环境较高敏感度的区域成片成面(图 3A)。以上结果表明,该岩溶湿地流域生态环境的脆弱性已成为区域经济可持续发展的主要制约因素。

区域生态服务功能重要性评价分为:一般重要区集中在该流域西北部和东南部地区,面积为49.94 km<sup>2</sup>,占流域总面积的15.06%,主要分布在水头村、山心村、新寨村、打磨村、马头山村。比较重要区:集中连片分布,面积为 166.09 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 50.09%,主要分布于雄山村、双龙营村、普者黑村、马者龙村、矣堵村、八道哨村、黎家庄村、笼桥村、曰者村、大布红村。重要区:主要集中在省级自然保护区内、水库、普者黑岩溶湖泊以及国家湿地公园,面积为 27.11 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 8.17%,分布于八道哨村、曰者村、矣堵村、下寨村、普者黑村、新沟村。

极重要区:与重要区分布相似,面积为 88.47 km<sup>2</sup>,占流域总面积的26.68%,主要分布于曰者村、打磨村、八道哨存、矣堵村、马者龙村、双龙营村、普者黑村(图 3B)。以上结果表明,该岩溶湿地流域的生态服务功能较重要区域主要分布于水域集中或者国家湿地公园的区域。

普者黑流域区域发展优势明显区域的面积 71.93 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 21.72%,中等优势区面积为 73.61 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 22.23%,而优势度一般和较低的面积分别为 85.83、99.84 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 56.06%。通过上述评价结果可知,普者黑岩溶湿地流域区域经济活动较为集中,经济发展优势区主要位于双龙营、八道哨、马头山、下寨村、丘北县农业局附近区域(图 3C)。



A: 普者黑流域生态环境敏感性评价 Ecological environment sensitivity evaluation of Puzhehei basin; B: 普者黑流域生态系统服务功能重要性评价 Importance evaluation of ecosystem service function of Puzhehei basin; C: 普者黑流域区域发展优势综合评价 Comprehensive evaluation of regional development advantages of Puzhehei basin.

图 3 普者黑流域评价专题图

Fig.3 The map of evaluation thematic in Puzhehei basin

本研究以生物多样性保护、水源涵养、生态系统产品提供等为主要生态系统服务功能特点,以土壤侵蚀和石漠化为主要生态环境敏感性特点,通过各要素综合分析,依据生态功能区划的方法、边界确定

和命名原则,生态功能区划图见图 4。由图 4 可知,分区结果为: I 西部农林生态农业建设功能区; I A 粮食生产生态农业区; I B 饮用水源保护生态功能区; II 东部生态旅游功能区; II A 旅游发展生态功

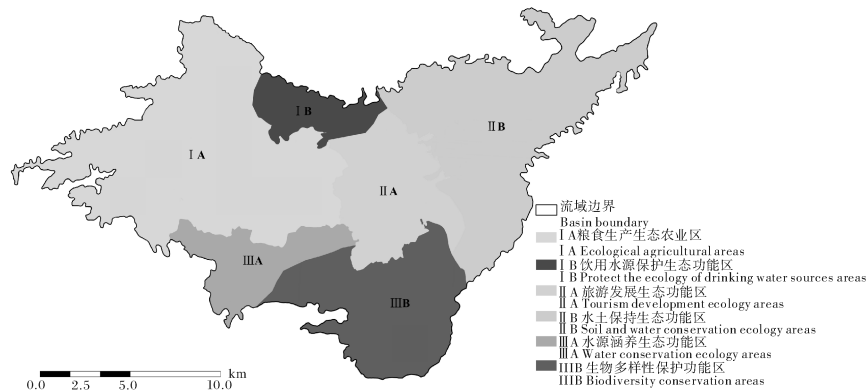


图 4 普者黑流域生态功能区划图

Fig.4 The map of ecological function zoning in Puzhehei basin

能区;ⅡB 水土保持生态功能区;Ⅲ 南部湿地生态保护功能区;ⅢA 水源涵养生态功能区;ⅢB 生物多样性保护生态功能区。

## 2.4 区域问题及发展策略

通过各要素评价结果得出各分区结果,得到各生态功能区划的生态环境特点及主要存在的问题。

I 西部农林生态农业建设功能区:(1) I A 粮食生产生态农业区,生态农业区面积 109.92 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 33.14%。城镇用地与耕地、园地用地和未利用土地面积大,但由于岩溶地貌的特殊性,该区地势平坦,土壤侵蚀敏感性却处于高度敏感。农业生产仍处于低位发展和粗放经营,其污染物占入湖总量近一半;属于高污染、高市场风险的农业产业链,农业效益却较低;(2) I B 饮用水源保护生态功能区,水源保护区面积 15.17 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 4.60%。该区域土地利用类型以湿地和耕地为主,人为因素干扰强烈,生态环境非常敏感,作为普者黑流域重要的上游水源区,该区域水生生态系统敏感程度高,湿生-陆生生态系统外界干扰程度高,生态系统呈现退化趋势。

Ⅱ 东部生态旅游功能区:(1) Ⅱ A 旅游发展生态功能区,旅游发展区面积 30.99 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 9.34%。该区域以旅游服务业为主要生计模式,6 至 10 月,游客量大,污染物产生和排放量大,其主要污染物的产生和排放量均占总入湖量的 35%~40%。目前,流域内旅游主要集中在普者黑景区的水上娱乐、陆地游玩、餐饮和住宿,游客量过于集中,造成交通和人员的分流困难;(2) Ⅱ B 水土保持生态功能区,水土保持区面积 92.94 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 28.02%。该区域坡度敏感性较高,坡度大多大于 25°,土壤侵蚀主要以重力侵蚀和沟蚀为主,比较严重。区域抗干扰能力较差,受人为因素的干扰,石质荒漠景观已经出现或比较容易发生,多陡峭的岩溶峰丛洼地,且植被稀疏,属典型的喀斯特地貌,地表破碎、坡度较大,水土流失较为严重,石漠化面积较多,生态环境处于敏感状态。

Ⅲ 南部湿地生态保护功能区:(1) Ⅲ A 水源涵养生态功能区,水源涵养区面积 28.80 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 8.68%。该区水资源丰富,有增产水库,土地利用类型以林地草地为主,人为干扰因素较弱,具有重要的水源涵养与土壤保持功能;(2) Ⅲ B 生物多样性保护生态功能区,生物多样性保护区 53.86 km<sup>2</sup>,

占流域总面积的 16.24%。该区有国家湿地公园,水源涵养能力较好,植被覆盖密度大,生物种类丰富,生物多样性保护极为重要。但区域内土地土壤可蚀敏感性高,土壤侵蚀严重,且工业污染源严重,为该区主要面临的环境问题,由于产业结构的落后,工业企业普遍小而分散。

针对上述区划区域现阶段存在的问题,提出各区相应的发展方向,在开发与保护过程中,重视各类敏感区,做好相关的预防工作,以防止敏感型的升级。

西部农林生态农业建设区应建设拥有低污染、低风险的农业产业链。积极利用现有资源和当地环境优势,推进岩溶湿地特色农业、生态农业、循环农业、设施农业的建设,提高基础农业效益,增加当地农民收入。结合岩溶地区的湖泊特征,将湖泊水环境及生态修复与流域的经济发展融为一体,保护水源地。

东部生态旅游功能区宜突出乡村旅游、休闲旅游、湿地生态旅游等特色旅游经济,以优化普者黑旅游产业结构。优先发展高产值低排放的旅游行业,运用“大生态旅游”理念统领旅游业发展,突出山水田园风光,开拓自然资源旅游,形成不同产业类型一体化的旅游产业链。针对部分小流域土壤侵蚀及水土流失严重的情况,应采取退耕还林、工程造林、拦砂坝建设、坡田改造等水土保持工程措施,实施水土流失防治及生态修复方案。对旅游宾馆、饭店以及工业企业废水污染源的控制重点在于加强管理、提出指标要求、给予技术支持,使其排放达标。

南部湿地生态保护功能区应积极开展岩溶湿地小流域的综合治理,通过水土保持工程和采取植树造林措施改善环境,控制岩溶湿地条件下的土壤侵蚀速率。对宜林地实施造林绿化,营造水土保持林;对非宜林地实行全面封育治理,最大限度地增加林草地面积,同时还要防止人为活动造成新的水土流失。控制该区域工业污染源,将小而分散的工业企业聚集,集中建立工业区,提高企业内部管理水平,调节区域内产业结构,提高经济效益。

## 3 讨 论

在前人有关生态系统敏感性和生态系统服务功能研究的基础上,本研究对普者黑流域进行了生态功能区划。除生态功能类型、重要性、敏感性等基本指标要素外,本研究还针对研究区的生态特殊性,将

区域发展优势度纳入评价体系中。通过经济发展、区位交通优势度与人力资源优势度评价等反映区域的发展潜力,使生态功能区划更加严谨与全面。结合岩溶湿地流域生态结构的特殊性,在指标体系的构建和建立湿热岩溶地区区划方法上,较其他生态区划对研究区更具较强的针对性和可操作性。

根据研究区不同区域的环境特点,将生态功能分区划分为:西部农林生态农业建设功能区(粮食生产生态农业区、饮用水源保护生态功能区)、东部生态旅游功能区(旅游发展生态功能区、水土保持生态功能区)、南部湿地生态保护功能区(水源涵养生态功能区、生物多样性保护生态功能区)。由于区域异质性差异较大,西部农林生态农业建设功能区现阶段农业生产效力低下,但环境危险性仍然处于较高状态。以保护水源为前提的农业经济发展是该区域进行可持续发展的主要策略。东部生态旅游功能区作为普者黑流域目前经济发展较快区域,由于生计模式搭配不合理、污染物排放方式简陋入湖导致污染物量大、原始区域土地敏感性较高等问题,导致环境敏感性不断提高。为了防止该区域敏感性升级,应当将旅游即该区域的主要经济发展来源与生态环保的理念相结合。南部湿地生态保护功能区承担了整个区域内生态环境的水源涵养和水土保持的功能,由于工业产业结构落后和当地工业管理模式的不成熟,导致工业污染源严重,并成为制约该区域可持续发展的主要问题。为解决该区存在的主要问题,该区域应采取相应的水土保持措施,同时控制区域工业污染。

## 参考文献 References

- [1] 白杨,郑华,欧阳志云,等.海河流域生态功能区划[J].应用生态学报,2011,22(9):2377-2382. BAI Y, ZHENG H, OUYANG Z Y, et al. Ecological function regionalization of Haihe River basin[J]. Chinese journal of applied ecology, 2011, 22(9):2377-2382(in Chinese with English abstract).
- [2] 孙然好,李卓,陈利顶.中国生态区划研究进展:从格局、功能到服务[J].生态学报,2018,38(15):5271-5278. SUN R H, LI Z, CHEN L D. Review of ecological regionalization and classification in China: ecological patterns, functions, and ecosystem services[J]. Acta ecologica sinica, 2018, 38(15): 5271-5278 (in Chinese with English abstract).
- [3] LIANG F, DU Y, GE Y, et al. A quantitative morphometric comparison of cockpit and doline karst landforms[J]. Journal of geographical sciences, 2014, 24(6): 1069-1082.
- [4] 孙京姐.泗河流域生态功能区划研究[D].济南:山东师范大学,2011. SUN J J. Ecological function regionalization for the Sihe River drainage area abstract[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [5] 许心情.泰安市生态功能区划研究[D].北京:北京林业大学,2007. XU X Q. Eco-functional regionalization of Tainan prefecture, Shandong Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [6] 孙然好,程先,陈利顶.基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生态功能分区[J].生态学报,2017,37(24):8445-8455. SUN R H, CHEN X, CHEN L D. Coupling terrestrial and aquatic ecosystems to regionalize eco-regions in the Haihe River Basin [J]. Acta ecologica sinica, 2017, 37(24): 845-855 (in Chinese with English abstract).
- [7] 孙然好,汲玉河,尚林源,等.海河流域水生态功能一级二级分区[J].环境科学,2013,34(2):509-516. SUN R H, JI Y H, SHANG L Y, et al. Regionalization of the freshwater eco-regions in the Haihe River basin of China[J]. Environmental science, 2013, 34(2): 509-516 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王楠,张魁,梁成华,等.县域生态功能区划方法探讨[J].湖北农业科学,2011,50(14):3016-3020. WANG N, ZHANG S, LIANG C H, et al. Study on the methods of county ecological function regionalization[J]. Hubei agricultural sciences, 2011, 50(14): 3016-3020 (in Chinese with English abstract).
- [9] 闻国静,刘云根,王妍,等.普者黑湖流域景观格局及生态风险时空演变[J].浙江农林大学学报,2017,34(6):1095-1103. WEN G J, LIU Y G, WANG Y, et al. Temporal and spatial evolution of landscape patterns and ecological risk in the Puzhehei Lake basin[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(6): 1095-1103 (in Chinese with English abstract).
- [10] 郭玉静,王妍,刘云根,等.普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J].生态学报,2018,38(5):1711-1721. GUO Y J, WANG Y, LIU Y G, et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. Acta ecologica sinica, 2018, 38(5): 1711-1721 (in Chinese with English abstract).
- [11] 梅涵一,刘云根,郑寒,等.普者黑流域畜禽养殖型农村沟渠底泥磷形态分布特征及风险评价[J].土壤通报,2017,48(1):195-201. MEI H Y, LIU Y G, ZHEN H, et al. Distribution characteristics and risk assessment of phosphorus speciation in livestock rural ditch sediments of Puzhehei basin[J]. Chinese journal of soil science, 2017, 48(1): 195-201 (in Chinese with English abstract).
- [12] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999(5):19-25. OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta ecologica sinica, 1999(5): 19-25 (in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- [13] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的空间尺度特征[J]. 生态学报, 2007, 26(9): 1432-1437. ZHANG H F, OUYANG Z Y, ZHEN H. Spatial scale characteristics of ecosystem services[J]. Chinese journal of ecology, 2007, 26(9): 1432-1437 (in Chinese with English abstract).
- [14] GANGY R, ZHOU D M, NIU Z G, et al. Valuation of lake and marsh wetlands ecosystem services in China[J]. Chinese geographical science, 2014, 24(3): 269-278.
- [15] 赵俊杰. 国家环保总局发布《生态功能区划暂行规程》[J]. 中国经贸导刊, 2002(19): 41. ZHAO J J. Comparative study on nutritious-rumex seed treaded by different methods[J]. China economic & trade herald, 2002(19): 41 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-62. LIU X H, YANG Q K, TANG G A. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2001, 21(1): 57-62 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴兰兰, 熊利荣, 彭辉. 基于 RGB 植被指数的大田油菜图像分割定量评价[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(2): 109-113. WU L L, XIONG L R, PENG H. Quantitative evaluation of in-field rapeseed image segmentation based on RGB vegetation indices[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(2): 109-113 (in Chinese with English abstract).
- [18] 宋阳, 刘连友, 严平, 等. 土壤可蚀性研究述评[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 124-130. SONG Y, LIU L Y, YAN P, et al. A review of soil erodibility research[J]. Arid land geography, 2006, 29(1): 124-130 (in Chinese with English abstract).
- [19] 贾冰. 基于 GIS 和 RS 的晋城市生态环境敏感性评价研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008. JIA B. Study on GIS & RS based evaluation of ego-environmental sensitivity in Jincheng[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李荣彪, 洪汉烈, 殷科. 喀斯特生态环境敏感性评价—以都匀市为例[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 300-306. LI R B, HONG H L, YING K. Evaluation on karst eco-environment sensitivity: A case study in Duyun City[J]. Carsologica sinica, 2009, 28(3): 300-306 (in Chinese with English abstract).
- [21] 安裕伦, 蔡广鹏, 熊书益. 贵州高原水土流失及其影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 47-52. AN Y L, CAI G P, XIONG S Y. Soil erosion and its affective factors in Guizhou upland[J]. Bulletin of soil and water conservation, 1999, 19(3): 47-52 (in Chinese with English abstract).
- [22] 吕祥. 基于 RS、GIS 的县域生态功能分析及区划研究—以四川省犍为县为例[D]. 重庆: 西南大学, 2015. LYU X. Analysis on ecological function of county territory and study on regionalization based on RS and GIS—taking Qianwei county as the example[D]. Chongqing: Southwest University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [23] 余丽燕. 基于综合指标评价模型的泸溪生态县建设研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. YU L Y. The research on ecosystem county construction of Luxi based on integrated assessment models[D]. Changsha: Hunan University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [24] 韦红波, 李锐, 杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 489-496. WEI H B, LI R, YANG Q K. Research advances of vegetation effect on soil and water conservation in china[J]. Chinese journal of plant ecology, 2002, 26(4): 489-496 (in Chinese with English abstract).
- [25] 师江澜. 黄河源区环境地域分异规律与生态功能分区研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. SHI J L. Research on environmental discrepancy laws and ecological function regionalization in source regions of Yangtze, Yellow and Lancang rivers[D]. Yanglin: Northwest A & F University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [26] 贾良清, 欧阳志云, 张之源. 生态功能区划及其在生态安徽建设中的作用[J]. 安徽农业大学学报, 2005(1): 113-116. JIA L Q, OUYANG Z Y, ZHANG Z Y. Regionalization of ecological function and its effect on the development of eco-Anhui[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2005(1): 113-116 (in Chinese with English abstract).
- [27] 陶星名. 生态功能区划方法学研究—以杭州市为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. TAO X M. Ecological function regionalization for hangzhou city[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [28] 胡安焱, 郭生练, 刘燕, 等. 干旱区内陆河流域生态环境质量模糊综合评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(2): 69-73. HU A Y, GUO S L, LIU Y, et al. Ecologic environment quality fuzzy comprehensive evaluation in the inland river basin[J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2006, 17(2): 69-73 (in Chinese with English abstract).
- [29] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. XU J H. Mathematical methods in modern geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004 (in Chinese).
- [30] 吴亚妮. 车尔臣河中下游流域生态环境敏感性评价及其空间分布研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2008. WU Y N. The study on evaluation and distribution of eco-environmental sensitivity in the middle and lower reaches of Che'erchen river[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [31] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of natural resources, 2015, 30(8): 1243-1254 (in Chinese with English abstract).
- [32] 燕乃玲, 虞孝感. 我国生态功能区划的目标、原则与体系[J]. 长



江流域资源与环境,2003(6):579-585.YAN N L, YU X G.  
Goals,principles,and systems of eco-functional regionalization

in China[J].Resources and environment in the Yangtze basin,  
2003(6):579-585(in Chinese with English abstract).

## Research on ecological function regionalization of typical karst wetland watershed ——take Puzhehei basin as an example

XIAO Yuxin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Yungen<sup>1</sup>, GUO Yujing<sup>1</sup>,  
ZHANG Zixia<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>

1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University,  
Kunming 650224, China;

2.Institute of Karst Studies, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

**Abstract** In southeast Yunnan typical karst wetland's black river basin as the research object, under the precondition of regionalization goal set, based on the regional ecological environment survey combined with geographic information system and remote sensing tools, from the importance of the ecological environment sensitivity and ecological service function and advantage of area development degree of three aspects, the importance of the ecological environment sensitivity and ecological service function, regional differentiation rules, the study area is divided into three district six subregion (specific), and based on this division, the black river basin ecological function areas, clear the area of the main ecological problems, points out its developing direction. (1) agricultural and forestry ecological agriculture construction function zone in western China; low agricultural production structure, regional economic development needs to be based on water protection; (2) the eastern eco-tourism functional zone; the livelihood mode is not properly matched, and the region should combine the ecological and environmental protection concept with the economic development structure; (3) ecological protection function area of the southern wetland; water conservation and water and soil conservation are prominent, but industrial pollution is serious, so relevant water and soil conservation measures should be taken to control industrial pollution in the region.

**Keywords** karst wetland; ecological function regionalization; ecological sensitivity; analytic hierarchy process; information entropy; eco-environmental sensitivity; regional development; Puzhehei basin

(责任编辑:陆文昌)