

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.03

北京市凉水河物理栖息地完整性评价

孙 斌^{1,2}, 刘静玲^{1,2}, 孟 博^{1,2}, 包 坤^{1,2}, 史 璇^{1,2}, 尤晓光^{1,2}

(1. 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要:针对城市河流强人为干扰特征,从横向完整性、纵向完整性和垂向完整性3个维度选择了10个评价指标,引入信息熵对传统的灰色聚类评价方法进行改进,构建城市河流物理完整性评价指标体系。利用该方法对北京市凉水河物理栖息地完整性开展了评价,结果表明在监测的21个采样点中评价结果为好、较好、一般和较差的比例分别为19.1%、23.8%、33.3%和23.8%,造成凉水河物理栖息地完整性较差的指标依次为生态流量满足率、纵向连通性指数和河流蜿蜒度。导致凉水河物理栖息地完整性较差的突出原因为生态流量满足率低、闸坝较多及土地利用不合理,其中闸坝出现的周期性与物理栖息地变差的周期性相一致。

关键词:物理栖息地完整性;信息熵;灰色聚类;凉水河

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)06-0020-07

Evaluation of physical habitat integrity of Liangshui River in Beijing

SUN Bin^{1,2}, LIU Jingling^{1,2}, MENG Bo^{1,2}, BAO Kun^{1,2}, SHI Xuan^{1,2}, YOU Xiaoguang^{1,2}

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Considering the strong human disturbances of urban rivers, 10 evaluation indexes from three dimensions of horizontal integrity, longitudinal integrity and vertical integrity were selected. The traditional grey clustering evaluation method was improved by introducing information entropy to construct the urban river physical integrity evaluation index system. This method was used to evaluate the physical habitat integrity of Liangshui River in Beijing. The results show that: among the 21 monitoring sites under the evaluation of physical habitat integrity, evaluation results were defined to be four grades of good, better, medium and poor, accounting for 19.1%, 23.8%, 33.3% and 23.8%, respectively. The indicators leading to poor physical habitat integrity of Liangshui River are the low ecological flow (EF), longitudinal connectivity (LC), and river meandering (RM) in sequence. The prominent reasons that cause poor physical habitat integrity of Liangshui River attribute to low ecological flow, more dams and unreasonable land use. The periodicity of the emerging dam is consistent with the same of the physical habitat deterioration.

Key words: physical habitat integrity; information entropy; gray clustering; Liangshui River

河流与城市的发展息息相关,受人类活动的影响目前城市河流生态系统普遍退化严重^[1-2]。通常导致河流生态系统退化的原因包括土地利用变化、水质污染、水量不足等,其中河流水文地貌条件的改变是根本原因之一^[3]。对河流水文地貌条件进行

评价,尤其是对河流的物理栖息地评价是河流管理和河流修复的中心环节^[4]。

Platts等^[5]利用MESC(methods for evaluating stream conditions)对河流、河岸带和生物多样性三者之间的关系开展了研究,在随后不到20年的时间里

基金项目:国家自然科学基金(41271496);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006)

作者简介:孙斌(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水生态系统管理。E-mail:Eco-bin@mail.bnu.edu.cn

通信作者:刘静玲,教授。E-mail:jingling@bnu.edu.cn

关于河流物理栖息地评价方法不断涌现,其中应用比较广泛的有 QHEI (qualitative habitat evaluation index)、CEM (channel evolution models) 和 RHS (river habitat survey) 等方法^[6]。1999 年美国环保署建立了河流物理栖息地评价体系^[7],从河岸带、河道宽深比、河床条件、水生动植物等方面对河流的物理栖息地进行评价;欧盟于 2000 年发布水框架指令^[8],要求从河流的河床、河岸带、水文等方面对欧盟境内的所有河流的水文地貌进行监测。评价体系和指令的出台,使得河流物理栖息地评价方法得到了进一步的发展^[9]。

结合 Belletti 等^[9-11]在河流栖息地评价方面的综述,以及截止到 2016 年 12 月在 web of science 数据库和知网中所能检索到国内外关于河流物理栖息地评价的方法一共有 101 种,这些方法均直接从河流水文地貌出发对河流物理栖息地进行评价,不包括河流生物完整性评价和物理栖息地模拟等其他河流栖息地评价方法。通过对这 101 种河流物理栖息地评价方法进行分析发现,当前国内外学者在进行河流物理栖息地评价时,多使用综合指数方法,较少使用综合评价法;在空间尺度方面主要是从横向和纵向两个维度对河流物理栖息地进行评价,关于河流物理栖息地垂向完整性方面较少考虑;在时间尺度方面当前研究多集中在分析近 1 年的数据,缺乏在较大时间尺度下河流物理栖息地完整性变化研究;在指标选择方面,不同类型的指标使用比例大都集中在 40% ~75% (表 1)。

表 1 河流栖息地评价方法综合信息

指标类型	指标名称	编号	使用比例/%
渠道形态	渠道特征	CP	48
	渠道组成	CF	67
	水流形态	FT	31
	基质	SB	75
	水生植物	IV	55
	木质碎片	WD	51
	人类活动	CAF	68
河岸带特征	河岸形态	BP	57
	河岸材料	BM	30
	河岸植被结构	VS	74
	河岸植被连续性	VC	54
	河岸植被带宽度	VW	41
	人类活动影响	BAF	69
	土地利用类型	LU	61
河流连续性	纵向连通性	LC	47
	横向连通性	TC	47
	堤岸稳定性	BE	51
	垂向连通性	GW	4

针对我国具有强人为干扰特征的城市河流物理栖息地开展的评价较少^[9,12]。本研究将河流栖息地完整性分为物理完整性、化学完整性和生物完整性

3 个方面,从横向完整性、纵向完整性和垂向完整性 3 方面构建城市河流物理栖息地完整性评价指标体系,利用信息熵权计算各指标的权重,最后利用灰色聚类评价模型对其物理栖息地完整性开展评价。

1 研究区概况

海河流域位于北纬 35° ~43°,东经 112° ~120°,流域大部分位于河北省境内,总面积 3.18 万 km²,占国土面积 3.31%,而流域内人口占到全国人口的 10%,水资源利用率超过 100%^[13]。经济的快速增长及不断持续的城镇化进程,导致大量的污染物排入河流中,使该区域成为全国水污染最严重、水资源最短缺的流域之一。凉水河发源于石景山区人民渠,流经海淀、宣武、丰台、朝阳等区(县),最终由通州区榆林庄闸汇入北运河,全长约 53 km,总流域面积约 815.39 km²^[14-15],是北京市重要的非常规水源补给。凉水河是典型的平原河网城市河流,具有流速慢、水深浅等特点,河流的自净能力差、底泥容易沉积^[16]。在实地调研的基础上,结合河流两岸的人类活动情况、土地利用类型以及河道中闸坝情况,沿河流走向布设了 21 个采样点,见图 1。

2 河流物理栖息地完整性评价方法

2.1 评价指标的选择

基于海河流域城市河流强人为干扰的特征,结合海河流域的自然特征,参照 Tavzes 等的研究成果,选取了 10 个指标,其特征与计算方法见表 2^[17-21]。将这 10 个指标归为横向完整性、纵向完整性和垂向完整性 3 个维度,其中横向完整性包括横向连通性 (lateral continuity, TC)、河岸植被覆盖率 (river vegetation coverage, RVC)、河岸带植被缓冲带宽度 (riparian vegetation width, RVW)、河岸带人类活动强度指数 (artificial features index, AFI) 以及河岸带土地利用类型指数 (land use index, LUI);纵向完整性包括河流生态流量满足率 (ecological flow, EF)、纵向连通性 (longitudinal continuity, LC) 以及河流蜿蜒度 (river meandering, RM);垂向完整性包括底质构成指数 (substrate composition index, SCI) 和栖息复杂性指数 (habitat complexity index, HCI)。

从表 2 可以看出,除 RM 外各指标的取值范围均在 0 和 1 之间,且越接近于 1,越有利于保证河流物理栖息地完整性^[22]。借鉴 An 等^[23]对栖息地质量分级时所采用的分级方法,各指标的得分小于所有点中该指标最高得分的 20% 为差等级,20% ~40% 为较差等级,40% ~60% 为一般等级,60% ~80% 为较好等级,大于等于 80% 为好的等级。

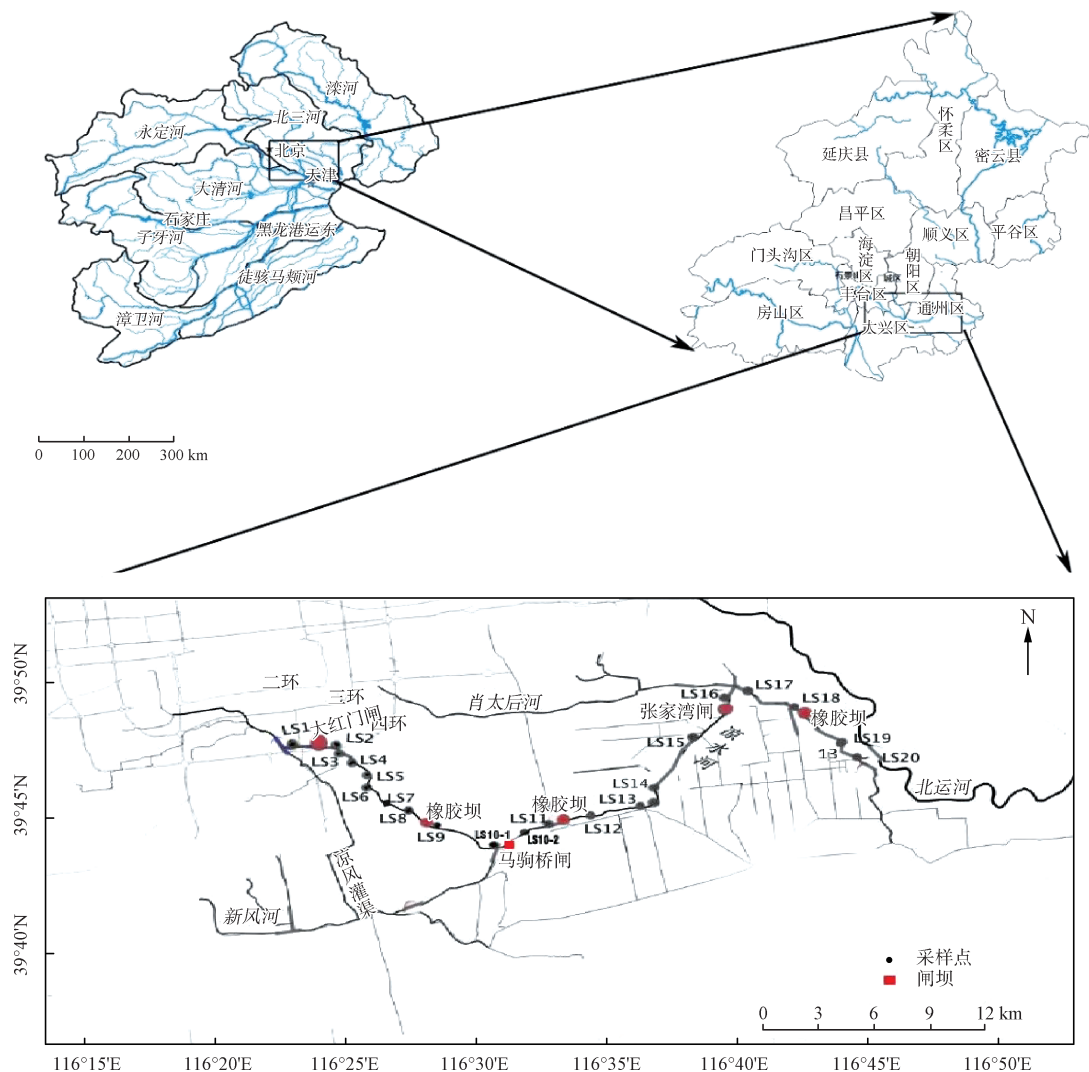


图 1 研究区及采样点位置

表 2 城市河流物理栖息地完整性评价指标及计算方法

指标名称	指标含义	计算方法
TC	河流两岸的硬化会阻碍河流横向连通性,影响河流正常的水力交换	河流两岸的硬化面积除以两岸总面积
RVC	河流两岸的植被可为河流两栖生物提供良好的栖息环境,是河流物理栖息地横向完整性的桥梁部分	河岸植被覆盖面积除以河岸总面积
RVW	河岸植被缓冲带不仅可以滞纳污染物,还为陆生生物,水生生物和两栖生物提供丰富的栖息地以及为人类提供景观、文化休闲和娱乐等生态服务功能	监测点河岸两侧各 50 m 范围内河岸带植被缓冲带宽度除以 50 m
AFI	反映河岸带两侧人类干扰活动的强度,如河岸带被开发为道路等人为干扰活动	监测点两侧 50 m 范围内大、中型机动车行使、河岸带采砂的距离除以 50 m
LUI	反映农业生产、居民生活和工业开发活动等对河岸带的破坏和不利影响,造成河岸带生物多样性降低、侵蚀度增加、河道堤岸稳定性下降,河道沉积物增加等	监测点两侧河岸带 50 m 范围内非天然土地利用类型数除以总土地利用类型数
EF	生态流量指提供给自然生态系统的一定质量和数量的水,以求最小改变自然生态系统的过程,并保证物种多样性和生态整合性	现状流量除以生态需水量
LC	反映河流连续体天然流态过程的持续性和连续性,是河流水生态系统发挥正常结构和功能的必要条件,同时也是水生生物正常生存和发展的根本条件	监测点上下游 10 km 内距离监测点最近的闸坝与监测点的距离除以 10 km
RM	河道被人为裁弯取值,河道边坡人为固化,极大降低了河道天然形态的多样性,浅滩、深塘等天然栖境的丰富度降低,不利于物种多样性的形成	沿河流中线两点间的实际长度除以该两点间直线距离后减去 1
SCI	河流底质为底栖生物、沉水植物、挺水植物、浮游动物、浮游植物和鱼类提供了最直接的栖息环境	监测点河道 4 m ² 范围内沙砾底质分布面积除以 4 m ²
HCI	反映河流生物栖息地类型及多样性程度,栖境复杂性越高,生物栖息地可提供适宜生物生存的空间越多	监测点河道 25 m ² 范围内复杂栖境数量除以 25 m ² 栖境总数量

2.2 计算方法

灰色聚类评价过程中的主要步骤^[24]如下：
步骤1:假设有 m 个监测点,每个监测点有 n 个监测指标,则构成 $C = m \times n$ 的白化矩阵,矩阵中元素 c_{kj} 为第 k 个监测点第 j 个聚类指标的白化值。

步骤2:数据的标准化处理。监测指标的白化值的标准化处理：

$$d_{kj} = \frac{c_{kj}}{c_{0j}} \quad k=1,2,\cdots,m \quad j=1,2,\cdots,n \quad (1)$$

式中: d_{kj} 为第 k 个监测点第 j 个监测指标的标准化值; c_{0j} 为第 j 个监测指标的参考标准。

灰类的标准化处理：

$$r_{ji} = \frac{s_{ji}}{c_{0j}} \quad j=1,2,\cdots,n \quad i=1,2,\cdots,h \quad (2)$$

式中: r_{ji} 为第 j 个监测指标第 i 个灰类的标准化处理值; s_{ji} 为第 j 个监测指标的第 i 个灰类值; h 为总的灰类数。

步骤3:确定白化函数。白化函数反映聚类指标对灰类的亲疏关系。第 j 个监测指标的灰类 1 的白化函数为

$$f_{ji}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq x_{j1} \\ \frac{x_{j2} - x}{x_{j2} - x_{j1}} & x_{j1} < x < x_{j2} \\ 0 & x \geq x_{j2} \end{cases} \quad (3)$$

第 j 个监测指标的灰类 i 的白化函数为

$$f_{ji}(x) = \begin{cases} 1 & x = x_{ji} \\ \frac{x - x_{j,i-1}}{x_{j,i} - x_{j,i-1}} & x_{j,i-1} < x < x_{ji} \\ \frac{x_{j,i+1} - x}{x_{j,i+1} - x_{ji}} & x_{ji} < x < x_{j,i+1} \\ 0 & x \leq x_{j,i-1}, x \geq x_{j,i+1} \end{cases} \quad (4)$$

第 j 个监测指标的灰类 h 的白化函数为

$$f_{jh}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_{jh} \\ \frac{x - x_{j,h-1}}{x_{j2} - x_{j1}} & x_{j,h-1} < x < x_{jh} \\ 0 & x \leq x_{j,h-1} \end{cases} \quad (5)$$

步骤4:求算聚类权。聚类权是衡量各个监测指标对同一灰类的权重,考虑到各监测指标对评价结果的贡献不同,借鉴信息熵的思想,计算各指标的信息熵权,用传统的聚类权与信息熵权的乘积作为最终的聚类权。首先计算信息熵,计算公式为

$$E_j = -a \sum_{k=1}^m (p_{kj} \ln p_{kj}) \quad (6)$$

其中, $a = \frac{1}{\ln m}$

式中: E_j 为指标信息熵值; p_{kj} 为 c_{kj} 归一化处理后的结果,即 $p_{kj} = \frac{c_{kj}}{\sum_{k=1}^m c_{kj}}$ 。监测指标的信息熵越小,表明其

变异程度越大,其在决策中起到的作用越大。利用监测指标信息熵值计算信息熵权 φ_j ,计算公式为

$$\varphi_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (7)$$

聚类权值 ω_{ji} 的计算公式为

$$\omega_{ji} = \varphi_i \frac{r_{ji}}{\sum_{j=1}^n r_{ji}} \quad j=1,2,\cdots,n \quad i=1,2,\cdots,h \quad (8)$$

步骤5:求算聚类系数。聚类系数反映了各监测点对灰类的亲疏程度。第 k 个监测点第 i 个灰类的聚类系数 ε_{ki} 计算公式为

$$\varepsilon_{ki} = \sum_{j=1}^n f_{ji}(d_{kj}) \omega_{ji} \quad (9)$$

式中, $f_{ji}(d_{kj})$ 为第 k 个监测点第 j 个监测指标的第 i 个灰类的白化函数。将每个监测点对各个灰类的聚类系数组成聚类行向量,在行向量中最大聚类系数所对应的灰类即为该监测点所属的类别。

3 结果与分析

3.1 凉水河物理栖息地完整性灰色聚类分析结果

根据野外调查结果,利用各监测指标的最高得分可以分别计算得到凉水河物理栖息地完整性评价各指标的具体分级标准,见表3。根据引入信息熵的灰色聚类评价方法,计算得到各监测点聚类系数及所属类型,见表4。

表3 凉水河物理栖息地完整性评价指标分级标准

指标	好	较好	一般	较差	差
TC	≥ 0.68	[0.51,0.68)	[0.34,0.51)	[0.17,0.34)	< 0.17
RVC	≥ 0.44	[0.33,0.44)	[0.22,0.33)	[0.11,0.22)	< 0.11
RVW	≥ 0.56	[0.42,0.56)	[0.28,0.42)	[0.14,0.28)	< 0.14
AFI	≥ 0.68	[0.51,0.68)	[0.34,0.51)	[0.17,0.34)	< 0.17
LUI	≥ 0.31	[0.25,0.31)	[0.19,0.25)	[0.12,0.19)	< 0.12
EF	≥ 0.56	[0.42,0.56)	[0.28,0.42)	[0.14,0.28)	< 0.14
LC	≥ 0.37	[0.28,0.37)	[0.18,0.28)	[0.09,0.18)	< 0.09
RM	≥ 0.22	[0.17,0.22)	[0.11,0.17)	[0.06,0.11)	< 0.06
SCI	≥ 0.48	[0.36,0.48)	[0.24,0.36)	[0.12,0.24)	< 0.12
HCI	≥ 0.28	[0.21,0.28)	[0.14,0.21)	[0.07,0.14)	< 0.07

3.2 凉水河物理栖息地完整性评价结果分析

从图2中可以看出对凉水河物理栖息地完整性影响较大的5个指标依次为:LUI、LC、EF、RVC和RM。

监测点	差	较差	一般	较好	好	所属类型
LS2	0.0329	0.0188	0.0218	0.0162	0.0583	好
LS10	0.0189	0.0177	0.0236	0.0441	0.0934	好
LS14	0.0205	0.0232	0.0383	0.0797	0.0868	好
LS17	0.0139	0.0470	0.0336	0.0149	0.0655	好
LS5	0.0067	0.0154	0.0343	0.1559	0.0015	较好
LS6	0.0090	0.0526	0.0040	0.0678	0.0597	较好
LS13	0.0128	0.0409	0.0461	0.0502	0.0337	较好
LS16	0.0318	0.0215	0.0164	0.0530	0.0198	较好
LS20	0.0088	0.0590	0.0209	0.0672	0.0169	较好
LS4	0.0192	0.0429	0.0660	0.0096	0.0018	一般
LS7	0.0067	0.0201	0.1227	0.0170	0.0174	一般
LS9	0.0146	0.0425	0.0819	0.0085	0.0005	一般
LS10-1	0.0201	0.0239	0.0844	0.0206	0.0000	一般
LS15	0.0268	0.0308	0.0425	0.0313	0.0072	一般
LS18	0.0122	0.0513	0.0518	0.0401	0.0018	一般
LS19	0.0000	0.0480	0.0980	0.0271	0.0107	一般
LS1	0.0070	0.0847	0.0403	0.0090	0.0000	较差
LS3	0.0052	0.1004	0.0283	0.0021	0.0018	较差
LS8	0.0138	0.0737	0.0118	0.0263	0.0221	较差
LS11	0.0189	0.0607	0.0339	0.0087	0.0135	较差
LS12	0.0126	0.0602	0.0510	0.0208	0.0031	较差

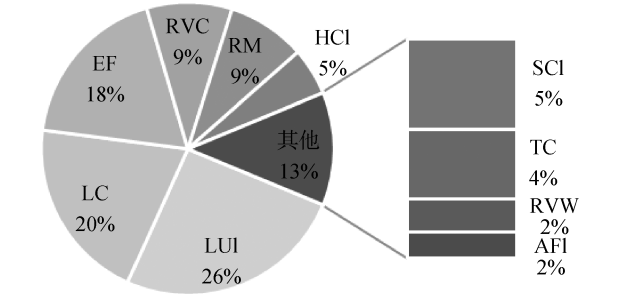


图 2 各监测指标的信息熵权

评价结果表明凉水河物理栖息地物理完整性可以分为 4 个等级,在 21 个监测点中评价结果为好、较好、一般和较差的监测点分别为 19.1%、23.8%、33.3% 和 23.8%。其中,评价结果为较差的 5 个监测点分别为 LS1、LS3、LS8、LS11 和 LS12。通过图 3 可以看出,5 个监测点所在河流断面的 EF、LC、RM 的灰类等级均较差。除此之外监测点 LS1 的 TC、RVC、LUI 也较差,这主要是由于监测点 LS1 监测点位于城市核心区,住宅和路网较密集,同时监测点附近的大红门闸阻断了河流的纵向连通性。监测点 LS3、LS8 和 LS12 的纵向完整性和垂向完整性均较差,其中监测点 LS3 的上游为小红门处理厂的卵形硝化池出水,水质较差,水体呈青灰色,同时河床底部有较多淤泥,SCI 和 HCl 值较低;监测点 LS8 的河床底部同样为淤泥,且水体微臭,水质较差,河岸两侧住宅密集、人口密度大;监测点 LS12 上游为污水处理厂出水口,水质较差,河岸左侧堆放较多垃圾,河岸两侧植被覆盖率较低。监测点 LS11 为通惠河灌渠、灌渠内有污水处理厂,灌渠筑坝取水使得河流

纵向连通性降低、河流水量减少,而灌渠内污水处理厂出水进一步影响 EF。

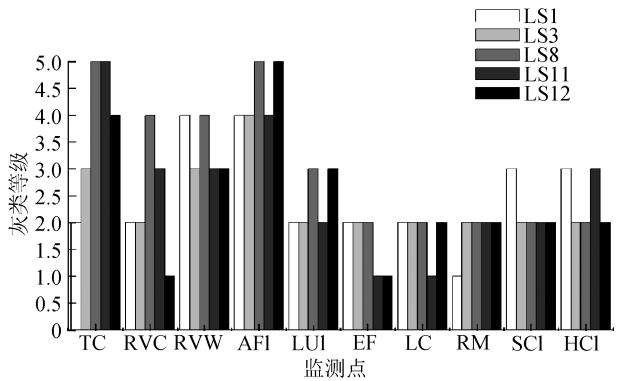


图 3 部分监测点各监测指标的灰类等级

利用 MATLAB 中绘制 21 个监测点各监测指标的热图(图 4),图中颜色越深表明等级越差。从图 4 可以发现当前对凉水河物理栖息地完整性造成较大负面影响的指标主要包括 4 个:EF、LC、LUI、SCI。

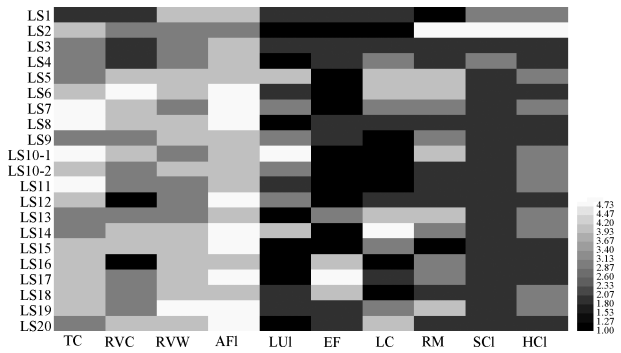


图 4 物理栖息地完整性较差点的各指标聚类结果

EF 包含水量和水质两个方面。在水量方面,凉水河所在的海河流域最突出的矛盾在于水资源的严重短缺^[25],这在客观上限制了凉水河的水量;在水质方面,凉水河接纳了来自首钢污水处理厂、小红门污水处理厂等的出水,同时接纳了河流沿岸部分小区未经处理直接排放的生活污水。高桥幸彦等^[26]的研究表明污水处理厂出水直接排放到小流量河流中会对河流的生态环境造成不利影响。

出于城市景观和防洪的需要,城市河段中修建了大量的闸坝,闸坝不仅对水生生物直接生活的栖息地完整性造成了破坏,也对河岸植被完整性产生不良影响^[27]。在凉水河一共出现 9 个闸坝,把河流分割成系列单独的小单元,对 LC 造成了严重的影响。

由于经济不断发展,城市化进程不断加快,城市土地利用类型处在不断变化之中。河岸带土地利用类型的变化,对河道等产生影响^[28]。从图 4 可以看出凉水河 LUI 较低,且由于 LUI 的权重最大,其对凉水河的物理栖息地完整性产生了较大的负面效应。并且位于城市核心区的 LUI 大于城市周边地区,即

城市核心区的土地利用类型等级稍优于城市周边,这主要是由于城市核心区拥有相对比较合理完善的城市规划,而在城市周边由于缺乏规划其对河流物理栖息地完整性破坏更大。

河流底质为底栖生物、水生动植物等提供了直接的栖息环境。水量不足,加上修建的大量闸坝,影响了河流的对沉积物的输送,并使得沉积物在河道内淤积^[29],在河流底部产生了大量的淤泥,造成了水生生物的栖息地多样性的丧失,SCI 较差。

图 5 为凉水河物理栖息地完整性空间尺度的变化特征。从图 5 可以看出凉水河物理栖息地完整性在空间上呈现出周期性变化特征,且物理栖息地完整性变差的周期性与闸坝出现的周期性相一致(除 LS1—LS3 河段外,其间有污水处理厂出水汇入)。在监测点 LS13 以后河流物理栖息地完整性的波动小于 LS1—LS13 之间的波动,可见自上游到下游物理栖息地完整性在波动中逐渐得到改善,这主要是由于上游河段位于城市核心区,受人为干扰程度大于下游河段。

4 结 论

利用引入信息熵的灰色聚类方法对凉水河物理栖息地完整性进行评价,21 个采样点中评价结果为好、较好、一般和较差的监测点比例分别为 19.1%、23.8%、33.3% 和 23.8%,全河段中最差的 5 个监测点分别为 LS1、LS3、LS8、LS11 和 LS12。

a. LUI、LC 和 EF 3 个评价指标对凉水河物理栖息地完整性评价结果贡献较大,贡献率分别为 26%、20% 和 18%。

b. 在空间上,城市河流物理栖息地完整性的变异性大于自然河流,其中闸坝通过影响纵向连通性和底质完整性,使得凉水河物理栖息地完整性降低;

污水处理厂通过影响 EF 使得 LS3 点的物理栖息地完整性最差。

c. 对评价结果贡献较大的 LUI、LC、EF 指标,其聚类结果为差的比例分别为 38%、33% 和 48%。利用信息熵权对各指标赋予的权重较合理,评价结果对河流物理栖息地完整性修复具有指导意义。

参考文献:

[1] 徐伟,董增川,付晓花,等. 基于 BP 人工神经网络的河流生态健康预警[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43 (1): 54-59. (XU Wei, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Early warning of river ecosystem health based on BP artificial neural networks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (1): 54-59. (in Chinese))

[2] 谈娟娟,董增川,付晓花,等. 流域景观生态健康演变及其驱动因子贡献分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43 (2): 107-113. (TAN Juanjuan, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Analysis of watershed landscape ecological health evolution and contribution of driving factors [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (2): 107-113. (in Chinese))

[3] 刘静玲,尤晓光,史璇,等. 滦河流域大中型闸坝水文生态效应[J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 23-28. (LIU Jingling, YOU Xiaoguang, SHI Xuan, et al. Hydrological and ecological effects of dams in Luanhe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1): 23-28. (in Chinese))

[4] 夏霆,曹方意,龙健,等. 农村河流生态健康与服务功能[J]. 水资源保护, 2015, 31 (1): 30-34. (XIA Ting, CAO Fangyi, LONG Jian, et al. Ecosystem health and service functions of rural river [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (1): 30-34. (in Chinese))

[5] PLATTS W, MEGAHAN W, MINSHALL G. Methods for evaluating stream, riparian, and biotic conditions [J]. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain ----- 闸坝

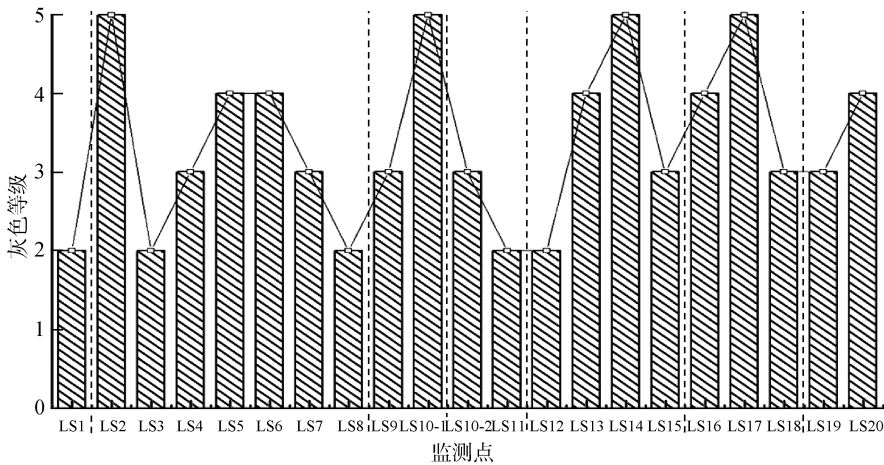


图 5 凉水河物理栖息地完整性空间尺度变化特征

- Forest and Range Experiment Station,1983,9:31-35.
- [6] SIMON A,DOWNS P W. An interdisciplinary approach to evaluation of potential instability in alluvial channels[J]. *Geomorphology*,1995,12(3):215-232.
 - [7] BARBOUS M T, GERRISTEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bio-assessment protocols for use in streams and Wadeable Rivers; periphyton, benthic macro invertebrates, and fish[M]. 2nd ed. Washington D C: USEPA, Office of Water, 1999:2-9.
 - [8] DIRECTIVE W. DIRECTIVE 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23rd october 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy[J]. *Official Journal*,2000,22(22):231-235.
 - [9] BELLETTI B, RINALDI M, BUIJSE A D, et al. A review of assessment methods for river hydromorphology [J]. *Environmental Earth Sciences*,2015,73(5):2079-2100.
 - [10] WEIB A, MATOUSKOVA M, MATSCHULLAT J. Hydromorphological assessment within the EU-water framework directive: trans-boundary cooperation and application to different water basins[J]. *Hydrobiologia*, 2008,603(1):53-72.
 - [11] FEMÁNDEZ D, BARQUÍN J, RAVEN P J. A review of river habitat characterisation methods: indices vs. characterisation protocols[J]. *Limnetica*,2011,30(2):217-234.
 - [12] XIA T, ZHU W, XIN P, et al. Assessment of urban stream morphology: an integrated index and modelling system [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*,2010,167(1/2/3/4):447-460.
 - [13] YANG T, LIU J L, CHEN Q Y, et al. Estimation of environmental flow requirements for the river ecosystem in the Haihe River Basin, China [J]. *Water Science and Technology*,2013,67(4):699-707.
 - [14] 余向勇,王金南,吴舜泽,等. “三水优先”的海河流域“十二五”水污染防治战略研究[J]. *环境科学与管理*, 2013,38(12):191-194. (YU Xiangyong, WANG Jinnan, WU Shunze, et al. Water pollution prevention strategy for Haihe river basin during 12th Five-year plan [J]. *Environmental Science and Management*,2013,38(12):191-194. (in Chinese))
 - [15] CHAUDHURI D, TRIPATHY S, VEERESH H, et al. Mobility and bioavailability of selected heavy metals in coal ash and sewage sludge-amended acid soil [J]. *Environmental Geology*,2003,44(4):419-432.
 - [16] 孟博,刘静玲,史璇,等. 北京市凉水河表层沉积物不同粒径重金属形态分布特征及生态风险[J]. *农业环境科学学报*,2015,34(5):964-972. (MENG Bo, LIU Jingling, SHI Xuan, et al. Speciation and ecological risk assessment of heavy metals in surficial sediments of Liangshui River in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2015,34(5):964-972. (in Chinese))
 - [17] TAVZES B, URBANIČ G. New indices for assessment of hydromorphological alteration of rivers and their evaluation with benthic invertebrate communities: alpine case study [J]. *Review of Hydrobiology*,2009,2(2):133-161.
 - [18] 杨涛. 基于生态完整性恢复的海河流域平原河流生态基流计算[D]. 北京:北京师范大学,2013.
 - [19] PETKOVSKA V, URBANIČ G. The links between river morphological variables and benthic invertebrate assemblages: comparison among three European ecoregions [J]. *Aquatic Ecology*,2015,49(2):159-173.
 - [20] 郑炳辉,张远,李英博,等. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*,2007,27(6):928-936. (ZHENG Binghui, ZHANG Yuan, LI Yingbo, et al. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liaohe River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2007,27(6):928-936. (in Chinese))
 - [21] 夏霆,朱伟,姜谋余,等. 城市河流栖息地评价方法与应用[J]. *环境科学学报*,2007,27(12):2095-2104. (XIA Ting, ZHU Wei, JIANG Mouyu, et al. Assessment of urban river habitats application and methodology [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2007,27(12):2095-2104. (in Chinese))
 - [22] 王建华,田景汉,吕宪国. 挠力河流域河流的 B-IBI 评价[J]. *生态学报*,2009,29(12):6672-6680. (WANG Jianhua, TIAN Jinghan, LV Xianguo. B-IBI assessment of stream in Naoli river watershed China [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29(12):6672-6680. (in Chinese))
 - [23] AN K G, PARK S S, SHIN J Y. An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemical and habitat conditions [J]. *Environment International*,2002,28(5):411-420.
 - [24] 李祚泳. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京:化学工业出版社,2004:118-136.
 - [25] 秦长海,甘泓,汪林,等. 海河流域水资源开发利用阈值研究[J]. *水科学进展*,2013,24(2):220-227. (QIN Changhai, GAN Hong, WANG Lin, et al. Threshold value for water resources exploitation and utilization in Haihe river basin [J]. *Advances in Water Science*,2013,24(2):220-227. (in Chinese))
 - [26] 高桥幸彦,杜茂安,范振强,等. 污水处理排放水对小流量流水体生态的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006,38(2):212-215. (TAKAHASHI Y, DU Maoan, FAN Zhenqiang, et al. Effects on ecologic situation of small flow water by discharge of two-stage treated wastewater [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006,38(2):212-215. (in Chinese))
 - [27] HUNT S D, GUZY J C, PRICE S J, et al. Responses of riparian reptile communities to damming and urbanization [J]. *Biological Conservation*,2013,157(2):277-284.
 - [28] PANDER J, GEIST J. Ecological indicators for stream restoration success [J]. *Ecological Indicators*, 2013,30(5):106-118.
 - [29] HUANG F, XIA Z, LI F, et al. Assessing sediment regime alteration of the upper Yangtze River [J]. *Environmental Earth Sciences*,2013,70(5):2349-2357.

(收稿日期:2017-05-06 编辑:王 芳)