

# 水库鱼产力评价标准与模式的研究\*

焦 念 志<sup>†</sup> 李 德 尚

(青岛海洋大学水产学院, 266003)

**提要** 本文在总结国内外已有成果的基础上,运用专家系统和灰色统计方法,初步建立了一套水库鱼产力评价的指标体系、指标权重体系和指标标准体系,首次给出了比较系统和具有普适意义的评价方案;并运用模糊数学方法建立了综合定量评价模式,从而在很大程度上解决了以往评价中由于多指标重迭、交错造成的难判、误判问题,为水库渔业资源的合理开发利用提供了比较科学的依据。

**关键词** 水库鱼产力 模式 指标 评价

水库鱼产力评价,历来是水库渔业科学的中心理论课题,国内外已有不少学者从不同角度和侧面予以探讨(李德尚,1980;陈敬存,1982;何志辉,1987;秋凌等,1963;Brylinsky,1973;Gerking,1978;Leach et al.,1987;LcCren et al.,1980;Schindler,1978)。但迄今所使用的指标、方法尚未统一,这就使得评价结果缺乏可比性,同时也难以保证可靠性。本文在综合前人研究结果的基础上,进一步对国内有关专家进行了 Delphi(德尔菲)调查,李业,1988,并结合对山东省 39 座大中型水库的实际调查资料和作者以往的经验,针对水质为正常淡水的调和型水库,提出了鱼产力评价的标准和模式。

## 1 评价指标体系

文献中提到的指标不下 50 种(文献同上),概括起来,可分为地理位置与气候条件、水库形态、集雨区性状、水化学性状、生物学性状(包括鱼类种类组成)等方面。考虑到水库鱼产力研究的主要任务,这里只讨论区域性鱼产力评价的指标问题,因此,地理与气候因素可以略去。同时,由于我国水库主养鱼为鲢、鳙,鱼类群落结构简单而均一,故指标中也不考虑鱼类组成。

根据各指标的基本性质及其相互关系,可将全部鱼产力评价指标区分为三个不同层次。

第一层次为决定水库鱼产力水平的基础因素。包括集雨区性状、水库形态和水文状况。这类因素规定了水库生产性能的基本范围。

第二层次为水化学因素,包括表征水质、营养盐状况的各项指标。它是第一层次各方面因素在特定条件下综合作用的具体结果,又是下一层次的直接前提。

第三层次为生物学因素,包括水库中生物的组成、生物量和生产效率等指标。它是能量因素和水化学因素在特定条件下综合作用的具体结果,能最终说明供饵力的高低。因此,又是水域生产性能的直接体现。

\* 高校博士学科点专项科研基金(87)教科管字 014 号,及山东省自然科学基金资助项目,89 D0612 号。

<sup>†</sup> 现在中国科学院海洋研究所博士后流动站,266071。

收稿日期:1991年8月8日;接受日期:1992年6月22日。

这三个层次是各自独立的,它们分别从生态系物质循环和能量流动的不同阶段反映物质的多少和能量的大小。理论上三者所指示的鱼产力水平应当是一致的和可以相互印证的。

根据各指标的实用价值和易得性加以筛选后,提出了如下的评价指标体系:

第一层次	}	集雨区性状(土壤类型与肥力、植被状况、人口密度、耕作水平等)
		平均水深
		水交换率
第二层次	}	总磷
		总氮
		化学耗氧量
		总溶解固形物或电导率
第三层次	}	浮游植物生物量,或叶绿素 <i>a</i> , 或初级生产力
		浮游动物生物量

## 2 指标标准体系

本文在总结国内外有关资料(中国内陆水域渔业资源编写组,1990;何志辉,1987;秋凌等,1963;Gerking,1978;Wetzel,1983)的基础上,将水库鱼产力划分为高、较高、中等、较低和低5种类型,并针对各指标对应于鱼产力类型的取值范围对国内14名专家进行了Delphi调查。综合专家意见和我们观测的数据资料,拟定评价指标标准体系见表1。

表1 指标标准体系

Tab. 1 The index criterion system

指 标	类 别				
	低	较低	中	较高	高
集雨区性状(打分)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
平均水深(m)	<3 或 >15		5—15	3—5	
水交换率 <sup>a)</sup> (倍数)	<0.5 或 >7		0.5—2 5—7	2—5	
总磷(mg/L)	<0.005	0.005—0.01	0.01—0.03	0.03—0.1	>0.1
总氮(mg/L)	<0.25	0.25—0.5	0.5—1.1	1.1—2.5	>2.5
化学耗氧量 Mn(mg/L)	<1	1—3	3—10	10—20	>20
总溶解固形物(mg/L)	<50	50—100	100—200	200—500	>500
电导率( $\mu\Omega/cm$ )	<100	100—130	130—180	180—350	>350
浮游植物生物量(mg/L)	<0.5	0.5—1.5	1.5—5	5—10	>10
浮游动物生物量(mg/L)	<0.3	0.3—1	1—3	3—8	>8
叶绿素 <i>a</i> ( $\mu g/L$ )	<1	1—3	3—10	10—25	>25
初级生产力(产氧量) [ $g/(m^2 \cdot d)$ ]	<0.1	0.1—1	1—3	3—7	>7

a) 水交换率=断面径流量/实有年均库容。

### 3 指标权重体系

各项指标在说明鱼产力上重要程度是不一样的,因而在采用多项指标评价水库鱼产力时,各指标应赋予不同的权值。运用 Delphi 调查和灰色统计方法(邓聚龙,1985)确立指标权重体系<sup>1)</sup>见表 2。表 2 中三个层次是相互独立的,因而分别计百分值。

表 2 指标权重体系  
Tab. 2 The index weight system

层次	一			二				三	
指 标	集雨区性状	平均水深	水交换率	总磷	总氮	化学耗氧量	总或电导率 或溶解固形物	浮游植物生物量 或初级生产力	浮游动物生物量
权重	0.50	0.20	0.30	0.35	0.30	0.15	0.20	0.60	0.40

### 4 综合评价模式

基于鱼产力高、低概念本身的模糊性和评价过程的模糊性,采用模糊数学方法建立综合定量评价模式。

**4.1 单项指标的鱼产力隶属函数** 根据确定隶属函数的原则和经验(贺仲雄,1985)构造如下覆盖指标所有取值范围的单一隶属函数:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ [f(x)]^k & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases}$$

式中,  $a, b$  分别为指标  $x$  对应于低、高鱼产力型的下、上边界值;  $f(x)$  为待定线性函数;  $k$  为待定常数。

设表 1 中,中等鱼产力类型对应的指标  $x$  取值之中值  $x^*$  的隶属度为 0.5,即  $\mu(x^*) = 0.5$ ,且  $\mu(a) = 0, \mu(b) = 1$ ,则由线性插值法可确定  $k$  及  $f(x)$ 。

对于取值非单调的水深、水交换率两项指标,分别根据实际情况确定离散型的隶属函数。所有指标的隶属函数见表 3。

**4.2 鱼产力分指数** 由表 3 中各隶属函数可求出各指标取值对应的鱼产力隶属度,它给出了一个可供比较的统一尺度,可作为各项指标表征鱼产力水平的分指数 (specific fish productivity index, 简记为 FPI<sub>i</sub>)。各指标不同取值对应的鱼产力分指数见表 4。

**4.3 鱼产力综合指数** 定义鱼产力综合指数(Comprehensive fish productivity index, 简记为 FPI<sub>c</sub>)

1) 焦念志,1991,运用 Delphi 调查——灰色统计方法确定水库鱼产力综合评价中指标的权重体系。待发表。

表 3 各指标隶属函数  
Tab. 3 The fuzzy membership function of each index

指 标	隶 属 函 数	指 标	隶 属 函 数
集雨区性状	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0.9 \\ (1.2x - 0.06)^{1.1} & 0.05 < x < 0.9 \\ 0 & x \leq 0.05 \end{cases}$	总溶解固形物 (mg/L)	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 500 \\ (0.002x - 0.042)^{0.53} & 20 < x < 500 \\ 0 & x \leq 20 \end{cases}$
平均水深 (m)	$\mu(x) = \begin{cases} 0.7 & 3 \leq x < 5 \\ 0.5 & 5 \leq x < 15 \\ 0.3 & x < 3 \text{ 或 } x > 15 \end{cases}$	电导率 ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 350 \\ (0.0033x - 0.167)^{0.689} & 50 < x < 350 \\ 0 & x \leq 50 \end{cases}$
水交换率	$\mu(x) = \begin{cases} 0.7 & 2 \leq x < 5 \\ 0.5 & 0.5 \leq x < 2 \text{ 或 } 5 \leq x < 7 \\ 0.3 & x \leq 0.5 \text{ 或 } x \geq 7 \end{cases}$	浮游植物生物量 (mg/L)	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 10 \\ (0.1x)^{0.66} & 0.1 < x < 10 \\ 0 & x \leq 0.1 \end{cases}$
总 磷 (mg/L)	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0.1 \\ (10.1x - 0.01)^{0.42} & 0.001 < x < 0.1 \\ 0 & x \leq 0.001 \end{cases}$	浮游动物生物量 (mg/L)	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 8 \\ (0.127x - 0.0127)^{0.486} & 0.1 < x < 8 \\ 0 & x \leq 0.1 \end{cases}$
总 氮 (mg/L)	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 2.5 \\ (0.4x)^{0.61} & 0.02 < x < 2.5 \\ 0 & x \leq 0.02 \end{cases}$	叶绿素 <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ )	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 25 \\ (0.04x)^{0.3} & 0.1 < x < 25 \\ 0 & x \leq 0.1 \end{cases}$
化学耗氧量 (Mn 法) (mg/L)	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 20 \\ (0.05x)^{0.5} & 0.1 < x < 20 \\ 0 & x \leq 0.1 \end{cases}$	初级生产力 (产氧量) [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 7 \\ (0.144x - 0.0072)^{0.35} & 0.05 < x < 7 \\ 0 & x \leq 0.05 \end{cases}$

表 4 各指标与鱼产力分指数的对应值

Tab. 4 Corresponding values of indices to FPI<sub>i</sub> on different levels

鱼产力分指数	集雨区性状(打分)	平均水深(m)	水交换率(倍数)	总磷(mg/L)	总氮(mg/L)	化学耗氧量(Mn法)(mg/L)	总溶解固形物(mg/L)	导电率(μΩ/cm)	浮游植物量(mg/L)	浮游动物量(mg/L)	叶绿素a(μg/L)	初级生产力(产氧量)[g/(m <sup>2</sup> ·d)]
0.0	0.05			0.0010	0.020	0.1	20.0	50.0	0.10	0.10	0.10	0.05
0.1	0.15			0.0014	0.057	0.2	27.5	61.4	0.30	0.17	0.25	0.16
0.2	0.24			0.0031	0.178	0.8	45.0	80.0	0.87	0.39	1.00	0.42
0.3	0.33	<3或>15	<0.5或>7	0.0066	0.347	1.8	72.6	103.5	1.61	0.76	2.25	0.83
0.4	0.41			0.0122	0.557	3.2	109.7	130.9	2.50	1.29	4.00	1.36
0.5	0.50	5—15	0.5—2,5—7	0.020	0.80	5.0	156.0	160.0	3.50	2.00	6.25	2.00
0.6	0.57			0.030	1.08	7.2	211.7	195.1	4.60	2.85	9.00	2.79
0.7	0.65	3—5	2—5	0.043	1.39	9.8	276.1	231.3	5.80	3.88	12.25	3.68
0.8	0.73			0.059	1.73	12.8	349.2	269.9	7.10	5.07	16.00	4.68
0.9	0.81			0.078	2.10	16.2	430.8	310.7	8.50	6.44	20.25	5.78
1.0	0.90			0.100	2.50	20.0	500.0	350.0	10.00	8.00	25.00	7.00

为:

$$FPI_c = \sum_{i=1}^n \omega_i FPI_i$$

式中,  $\omega_i$  为第  $i$  个指标的权重(由表 2 给出);  $n$  为层次中指标的个数。

由上式计算求得的各层次的  $FPI_c$  与鱼产力类型的对应关系见表 5。表 5 中的对应关系,是按照表 1 中各指标对应于各鱼产力类型的分界值,求得相应的  $FPI_i$ ,再由上式求得  $FPI_c$  而确定的。但对于“较高”和“高”两类型的分界线,按如下原则确定:当  $FPI_i$  为 1 的各项指标总权超过 0.5,而其余各项指标取值平均超过“较高”、“高”对应的  $FPI_c$  之中值,即可判定待判水库为“高”鱼产力型。例如,第一层次(0.67,1.00)的中值为 0.835,则“较高”、“高”分界线应大于  $1 \times 0.5 + 0.835 \times 0.5 = 0.917$ 。同理,第二层次为 0.900,第三层次为 0.905。故表 5 中三者依次定为 0.92,0.90,0.91。

表 5 各层次  $FPI_c$  与鱼产力类型的对应关系Tab. 5 Corresponding values of  $FPI_c$  to different fish-productivity types

层 次	鱼 产 力 类 型				
	低	较 低	中	较 高	高
第一层次	<0.15	0.15—0.35	0.35—0.67	0.67—0.92	>0.92
第二层次	<0.25	0.25—0.38	0.38—0.61	0.61—0.90	>0.90
第三层次	<0.15	0.15—0.34	0.34—0.62	0.62—0.91	>0.91

**4.4 确定评价结论** 理论上,三个层次的  $FPI_c$  结论应当是一致的,但实际应用中可能会出现三个层次的  $FPI_c$  在相邻类型之间交错的现象(如果三个层次的  $FPI_c$  落在相间类型中,则说明数据可靠程度不够或有其他原因,如污染等)。对此,可采用两种办法作出定

论。

(1) 三层次等权平均法 三个层次是各自独立的,其结论可以相互补充和印证。因而可将三个层次的  $FPI_c$  等权平均作出定论,见表 6。

表 6  $\overline{FPI}_c$  与鱼产力类型的对应关系

Tab. 6 Corresponding values of  $\overline{FPI}_c$  to different fish-productivity types

鱼产力类型	低	较低	中	较高	高
三层次平均 $\overline{FPI}_c$	<0.18	0.18—0.36	0.36—0.63	0.63—0.91	>0.91

(2) 类型加细法 设 I, II, III, IV, V 分别代表高、较高、中、较低和低 5 种鱼产力类型,若三个层次中有两个层次结论为 I, 一个层次结论为 II, 则用  $I^-$  表示该水库属于第一类型,但为其中较差者;若有两个层次结论为 II, 一个层次结论为 I, 则用  $II^+$  表示该水库属于第 II 类型,但为其中较好者。其余类推。如此,可将原分类加细为  $I, I^-, II^+, II, II^-, III^+, III, III^-, IV^+, IV, IV^-, V^+, V$  等 13 种类型。

## 5 讨 论

5.1 关于指标体系 以往的水库鱼产力评价中,来自不同层次的指标常被混在一起使用。由于这些指标之间存在着错综复杂的关系(如相关关系、因果关系等),使人们难于进行机理性分析,有时甚至导致片面认识。本文将区域性鱼产力评价指标划分为三个层次,理顺了指标间的关系,体现了水库生态系能流、物流的客观规律。首先从不同层次独立分析,而后综合各层次的分析结果得出最后结论,保证了评价结果的可靠性。

5.2 关于指标标准体系 建立指标标准体系是一项难度极大的工作,加之水库渔业资料相对匮乏,至今尚未见这方面的专门研究报道。然而,随着渔业生产的迅猛发展,水库渔业的振兴和开发迫切需要进行鱼产力评估和可行性论证,解决评价标准的问题势在必行。本文运用总结实地观测数据、参考国内外已有资料和对著名专家 Delphi 调查三结合的方法对这一问题进行了一次经济而有效的探讨,提出了一个初步方案。这只是一个基本框架,有不少细节有待进一步充实和完善。如集雨区性状涉及土壤(类型、肥力、淋失率等)、植被(质量、覆盖率)、人口、工农业生产等许多方面,本文暂时采用了综合打分的办法以解决定量上的困难<sup>1)</sup>。只有掌握了全国范围内的大量有关资料之后,才有可能建立起统一的定量标准。此外,各种鱼产力类型的鱼产量标准,不同地区因能量可得性不同而应有所不同,本文限于资料和篇幅暂不作讨论。

5.3 关于指标权重体系 指标权重的分配是综合评价的关键,也是尚未定论的又一难题。本文仍然发挥了专家系统的优势,运用 Delphi 调查方式,反复征求、反馈、再集中专家意见,并采用灰色统计方法归纳这类不确定的信息,从而使较分散的意见形成为统一的结论。

1) 我们在对山东省水库评价时,定量考察了土壤肥力、植被覆盖率、相对于水库面积的人口数量,农作物单产等指标。

**5.4 关于综合评价方法** 以往的综合评价之所以停留在定性、半定量水平上,是因为没有找到合适的方法。最近几年兴起的模糊数学方法兼有定性、定量的特点,适合于水库鱼产力的综合评价。但通常的模糊评判不仅步骤较繁,而且模糊关系合成中丧失不少信息,有时造成误判。本文采用了全覆盖型隶属函数,由此建立的  $FPI_i$ 、 $FPI_c$  简单易行,一目了然。表 4 还列出了各指标取值与  $FPI_i$  的对应关系,通过查表即可求得  $FPI_i$ ,便于实用。本文提供的两种决策方法,使评价者有了选择的余地,拓宽了标准的应用范围,提高了方法的分辨率。

**5.5 评价模式的应用效果** 应用本文建立的标准体系和模式,对山东省 39 座代表性的大、中型水库的综合评价结果表明,大多数水库属于中等和较高鱼产力型。例如,里店水库  $\overline{FPI_c} = 0.64$ , 光明水库  $\overline{FPI_c} = 0.67$ , 雪野水库  $\overline{FPI_c} = 0.73$ , 后龙河水库  $\overline{FPI_c} = 0.65$ , 该 4 水库均属 II 型,即较高鱼产力型;龙门口水库  $\overline{FPI_c} = 0.51$ , 龙泉水库  $\overline{FPI_c} = 0.42$ , 金斗水库  $\overline{FPI_c} = 0.59$ , 大关水库  $\overline{FPI_c} = 0.43$ , 该 4 水库均属 III 型,即中等鱼产力型。进一步采用类型加细法划分上列各水库,依次为 II<sup>-</sup>, II<sup>-</sup>, II, II, III<sup>+</sup>, III<sup>-</sup>, III<sup>+</sup>, III<sup>-</sup> 型。上述结论是与实际情况相符的。

## 参 考 文 献

- 中国内陆水域渔业资源编写组,1990,中国内陆水域渔业资源,农业出版社,288—292。  
 邓聚龙,1985,灰色系统(社会与经济),国防工业出版社,93—103。  
 李业,1988,预测学,华南工学院出版社,61—79。  
 李德尚,1980,关于水库鱼产力的研究,海洋湖沼通报,3: 76—80。  
 何志辉,1987,中国湖泊水库的营养分类,大连水产学院学报,6: 1—10。  
 陈敬存,1982,关于水库渔业生产性能的评价问题,水库渔业,1: 9—19。  
 贺仲雄,1985,模糊数学及其应用,天津科学技术出版社,52—61。  
 II.B. 秋凌等,1963,水库渔业分类及鱼产力估计方法,太西渔委会第四次全会论文集,科学出版社,106—115。  
 Brylinsky, M., 1973, An analysis of factors governing productivity in lakes and reservoirs, *Limnol. Oceanogr.*, 18 (1): 1—14。  
 Gerking, S. D., 1978, *Ecology of Freshwater Production*, Blackwell Scientific Publications, pp. 403—423。  
 Leach, J. H. et al., 1987, A review of methods for prediction of potential fish production with application to the Great Lake and Lake Winnipeg, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, suppl., 44(2): 471—485。  
 LeCren, E. D. & Lowe-McConnell, R. H., 1980, *The functioning of Freshwater Ecosystems*, Cambridge University Press, pp. 411—447。  
 Schindler, D. W., 1978, Factors regulating photoplankton production and standing crop in the world's freshwaters, *Limnol. Oceanogr.*, 23(3): 478—486。  
 Wetzel, R. G., 1983, *Limnology*, 2nd ed., CBS College Publishing, pp. 292—295。

## A STUDY ON STANDARDS AND MODELS OF RESERVOIR FISH PRODUCTIVITY ASSESSMENT

Jiao Nianzhi<sup>†</sup> and Li Deshang

(Ocean University of Qingdao, 266003)

### ABSTRACT

In order to assess fish productivity of reservoirs on a local scale, a system of indices, a system of index criteria, and a system of index weight were proposed, on these bases, an overall assessment method was established.

By arranging the assessment indices into three independent levels, i.e., the level of basic factors, including the characteristics of the drainage area, the reservoir morphology and the hydrological features, the level of hydrochemical factors, and the level of biological factors, and determining the effective indices in each level through a Delphi investigation, the system of indices, complete and simple, was established.

Reservoirs were classified into five ranks according to their fish productivity (from high level to low level). On the basis of the results of the Delphi investigation, the criterion of every index corresponding to each rank was determined. Thereby, the system of index criterion was worked out.

The importance of different indices in indicating fish productivity is quite different, so, a different weight should be given to each of them. The index weight system was established by Delphi investigation and Grey Statistical Method.

In view of the fuzziness of the distinction between high and low fish productivity, Fuzzy Method was used to establish a comprehensive assessment model. First, Fuzzy Membership Function of each index to fish productivity was determined according to the index criterion system, which was comparable to each other on a same scale and can be used as a specific fish productivity index (FPI<sub>i</sub>). Then all the FPI<sub>i</sub> in the same level was added up according to the index weight system, thus a comprehensive fish productivity index (FPI<sub>c</sub>) for each level was obtained. Finally, an overall conclusion of reservoir fish productivity was drawn by means of averaging FPI<sub>c</sub> of all three levels, or by refined classification.

**Key words** Reservoir fish productivity Model Index Assessment/evaluation

<sup>†</sup> Present address: Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao, China, 266071.