

益阳大通湖生态因子的灰关联分析*

杨品红¹ 徐黎明² 覃忠元² 潘莹³ 湛斌¹ 石彭灵¹
张倩² 王晓艳² 谢春华² 李梦军²

(1. 环洞庭湖水产健康养殖与加工湖南省重点实验室 动物学湖南省高校重点实验室 湖南文理学院生命科学学院 常德 415000; 2. 大湖水殖股份有限公司 常德 415000; 3. 南京市水产科学研究所 南京 210036)

摘要 本文采用灰色系统关联度分析方法,以空间理论数学为基础,依规范性、偶对称性、整体性和接近性原则,计算并分析了益阳大通湖 14 个生态因子的关联度,关联序结果为:亚硝酸氮>氮磷比>氨氮>总氮>硝酸氮>浮游动物>叶绿素 *a*>透明度>总磷>水深>水温>浮游植物>酸碱度>溶解氧。益阳大通湖表现为总氮(包括亚硝酸氮、氨氮和硝酸氮)和氮磷比是优势影响因子。通过灰关联分析发现,大通湖水体水质良好,水体的总氮、氮磷比及总磷都适于浮游生物的生长繁殖,对增加渔产潜力有重要作用。

关键词 益阳大通湖;生态因子;灰关联分析

中图分类号 Q147 doi: 10.11693/hyh20160600130

我国湖泊面积占内陆水域面积的 40%,其中,中、小型湖泊占 50%。湖南境内的中、小型湖泊在洞庭湖区星罗棋布,但由于长期以来利用形式单一和不合理,使稳定多样的湖泊复合生态日趋简化或覆灭,绝大部分湖泊已成为无草湖或寡草湖,并有造成自身污染的趋势(超富营养化)。如何能既保护好湖泊的原有生态,又大幅度地增加湖泊效益,迄今为止,国内外还没有系统的经验借鉴。因此,开发好湖南省第一大内陆湖泊——大通湖,对与此相类似的湖泊开发具有积极而深远的指导意义。

大通湖位于湖南省益阳东南,长江中游荆江段南岸,原为洞庭湖的一大湖域,在历史演变过程中,因泥沙淤塞被支解成东、南洞庭湖间的一大湖湾,清光绪年间,湖面辽阔,可东通东洞庭湖,西抵目平湖,北经藕池河与长江沟通,故称大通湖。湖区属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候,年均气温 16.6,多年平均日照时数 1775.7h,无霜期 266d,降水量 1237.7mm,其中 4—9 月约占年降水总量的 68%。大

通湖湖泊面积 8267 公顷,是湖南省最大的内陆养殖湖泊,水产资源丰富,主要出产有四大家鱼、虾、蟹、莲、菱角等。

灰色系统分析时不需要典型的分布规律,对样本量的大小没有太高要求,且量化结果与定性分析一致,具有广泛的实用性(侯晓亮等,2011;陈娟等,2013)。湖泊环境系统可看作是一个灰色系统,影响湖泊水质变化的参数有不确定性因素(如太阳辐射、气象条件等)和确定性因素(如湖水的生态因子),有已知的,也有未知的,其中的不确定因素还会干扰确定因素,并且在有限的时间和空间范围内监测得到的水环境监测数据,所提供的信息不确切或不完善。杨品红等(2010a, b, 2011, 2014)对津市西湖、澧县王家厂水库、华容东湖围栏进行生态因子的灰关联分析,陈娟等(2013)利用灰关联分析对黄家湖水水质进行评价,陆峰等(2013)对西南水电站建成后底栖动物与环境因子进行灰关联分析,都取得了较好的效果。

* 湖南省水产高效健康生产协同创新中心项目,2014-405A08 号;湖南省水产院士工作站项目,2014RS4072 号;国家淡水渔业工程技术研究中心湖南中心“珍珠与水环境关系研究”项目,201305 号;教育部农科教合作人才培养基地“珍珠养殖示范”项目,20140102 号;湖南省高校科技创新团队“水生生物资源与利用”项目,2011A204 号;湖南省动物学重点建设学科“水生动物资源与利用”项目,2011B0201 号。杨品红,教授, E-mail: yph588@163.com

收稿日期: 2016-06-20, 收修改稿日期: 2016-07-09

为充分利用湖泊进行渔业生产,以获取鱼的高产量,本文使用灰关联分析方法定量描述了益阳大通湖水体的影响因素,找出其主要影响因素,从而为促进鱼类生长提供理论基础和依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析方法

1.1.1 采样频率及采样点 2015年5月中旬到8月底每星期采样1次,对益阳大通湖的蜜蜂夹、尼古湖、大西湖三个区,每个区取四个点进行了13次采样调查。采样点的选取是按照采样方案设计技术规范(HJ495-2009)。

1.1.2 检测项目 总氮(TN)、总磷(TP)、氮磷比(TN/TP)、叶绿素 *a*(Chl *a*)、酸碱度(pH)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸氮(NO₂⁻-N)、溶解氧(DO)、水深(WD)、透明度(SD)、水温(WT)、浮游动物(zooplankton)和浮游植物(phytoplankton)。

1.1.3 水质检测方法 叶绿素 *a*、水温、pH、水深、透明度和溶解氧均在现场测定,其它指标的检测用有机玻璃采水器分底层(距水底0.5m处)、中层(中间水深)和表层(水表以下0.5m)3层采水混匀装瓶带回实验室进行,另取水样加适量鲁哥式碘液予以固定(章宗涉等,1991)用于浮游生物计数。pH用HI9224型酸度测定仪测定,水温和溶解氧用HI9141型溶氧测定仪测定,叶绿素 *a*用叶绿素 *a*测定仪测定(美国安诺实验室),用C200系列多参数台式离子浓度分析仪测定氨氮、硝酸氮、亚硝酸氮、总磷和总氮,以上仪器都是意大利哈纳9804系列产品。在NOVEL XSZ-N107型显微镜下用浮游生物框进行浮游动物和浮游植物的分类统计,以每升水中的浮游生物细胞数表示结果。

1.2 灰关联分析方法(邓聚龙,1985;易德生等,1992)

灰关联分析是有参考系有测度的整体比较,是对一个发展变化的系统进行定量描述和比较的方法,其分析步骤如下:

a. 参考数列和比较数列的选定:某种因素在水环境系统中造成水环境事故最严重的情况是发生的机率为100%,因此把参考数列定义为 $X_0^{(0)} = \{100, 100, \dots, 100\}$ (万星等,2005),将总磷、总氮、氮磷比、叶绿素 *a*、溶解氧、pH、氨氮、硝酸氮、亚硝酸氮、透明度、水温、浮游植物、浮游动物和水深14个指标作为比较序列,故有 $N=14, n=13$ 。

b. 原始数据预处理:为弱化各原始数据的随机

性,消除量纲,合并数量级,使其具有可比性,等效性和同序性,对原始数据进行预处理-无量纲化(刘燕东等,2005)。

对于空间序列(或指标序列)的原始数据预处理的主要方法有:

效果测度变换:

对于越小越好的指标(如总磷、总氮),采用下限测度:

$$X_i(k) = X_i^{(0)}(k) / \min \{X_i^{(0)}(k)\} \quad (1)$$

对于取中间值较优指标(如氮磷比和pH等),采用平均值测度:

$$X_i(k) = X_i^{(0)}(k) / \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i^{(0)}(k) \quad (2)$$

对于越大越好的指标(如本研究中的溶解氧、透明度),采用上限测度:

$$X_i(k) = X_i^{(0)}(k) / \max \{X_i^{(0)}(k)\} \quad (3)$$

对于时间序列(或经济序列)原始数据预处理的主要方法有:

(1) 均值化变换:

$$X_i(k) = X_i^{(0)}(k) / \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i^{(0)}(k) \quad (4)$$

(2) 初值化变换:

$$X_i(k) = X_i^{(0)}(k) / X_i^{(0)}(1) \quad (5)$$

c. 关联系数:当 $t = k$ 时, $\bar{x}_0(k)$ 与 $\bar{x}_i(k)$ 的关联系数为 $\zeta_{0i}(k)$ ($i = 1, 2, \dots, 13$):

$$\zeta_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (6)$$

以上式中, ρ 为分辨系数(作用在于提高关联系数之间的差异显著性),取值准则为(吕峰,1997;申卯兴等,2003),此处 ρ 取1.7; Δ_{\max} , Δ_{\min} 分别为各个时刻绝对差中的最大值和最小值,即 $\Delta_{\max} = \max \{|\bar{x}_0(k) - \bar{x}_i(k)|\}$, $\Delta_{\min} = \min \{|\bar{x}_0(k) - \bar{x}_i(k)|\}$; $\Delta_{0i}(k)$ 为 k 时刻两个序列的绝对差,即 $\Delta_{0i}(k) = |\bar{x}_0(k) - \bar{x}_i(k)|$ 。

d. 关联度及关联序

比较数列对参考数列的关联系数有多个,因信息过于分散而难以比较,故把各个时刻的关联系数集中处理后所得的平均值,作为比较数列对参考数列的关联度(γ_{0i})(侯晓亮等,2011):

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_{0i}(k) \quad (\text{各符号意义同前}) \quad (7)$$

关联序是根据关联度大小的排序得出的。但因为

初值化、均值化处理以及分辨系数的变动都不具有序数效应(水乃翔等, 1992), 故不能仅对某一特定的 ρ 值、某种特定的无量纲处理方式而求得关联度序集就匆忙下结论。本文对益阳大通湖水体水环境影响因素检测结果用效果测度变换、初值化和均值化三种方法

进行分析。

2 结果

2.1 益阳大通湖水体生态因子检测结果 益阳大通湖生态因子检测结果见表 1。

表 1 益阳大通湖生态因子检测结果
Tab.1 The test results of ecological factor in Datong Lake in Yiyang City

	DO (mg/L)	pH	Chl <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	WT ()	SD (cm)	WD (m)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Phyt. (10^4ind./L)	Zoop. (ind./L)	TN/TP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NO}_4^-\text{-N}$ (mg/L)
最大值	12.48	9.15	52.26	32.4	120	2.6	8.83	0.53	6458	58500	95.2	0.915	8.6	0.008
最小值	4.66	7.64	1.86	23.2	25	1.4	0.55	0.068	270	2500	1.8	0.005	0.53	0
平均值	7.30	8.26	21.95	28.6	46	2.0	2.08	0.24	1319	17974	10.6	0.189	1.89	0.001

注: Zoop.示浮游动物, Phyt.示浮游植物

2.2 益阳大通湖生态因子关联度及关联序

益阳大通湖生态因子关联度及关联序见表 2。初值化关联度在 0.957683—0.960456 之间, 关联序: 浮游动物>叶绿素 *a* >亚硝酸氮>氨氮>水深>氮磷比>总氮>透明度>硝酸氮>水温>浮游植物>总磷>溶解氧>酸碱度; 均值化关联度在 0.9700312—0.9701155 之

间, 关联序: 亚硝酸氮>氮磷比>氨氮>硝酸氮>总氮>浮游植物>叶绿素 *a*>浮游动物>透明度>溶解氧>水温>酸碱度>水深>总磷; 效果测度变换关联度在 0.941390—0.954137 之间, 关联序: 总氮>总磷>亚硝酸氮>氮磷比>氨氮>硝酸氮>透明度>酸碱度>水温>水深>溶解氧>浮游动物>叶绿素 *a* >浮游植物。

表 2 益阳大通湖生态因子关联度及关联序
Tab.2 The correlative degree and the correlation order of ecological factor in Datong Lake in Yiyang City

生态因子	初值化		均值化		效果测度变换	
	关联度	关联序	关联度	关联序	关联度	关联序
DO	0.957934	13	0.9700380	10	0.942729	11
pH	0.957683	14	0.9700373	12	0.944195	8
Chl <i>a</i>	0.960114	2	0.9700446	7	0.941659	13
WT	0.958348	10	0.9700375	11	0.943783	9
SD	0.958682	8	0.9700403	9	0.944198	7
WD	0.959149	5	0.9700372	13	0.943402	10
TN	0.958685	7	0.9700466	5	0.954137	1
TP	0.958081	12	0.9700312	14	0.953004	2
Phyt	0.958086	11	0.9700461	6	0.941390	14
Zoop	0.960456	1	0.9700444	8	0.941752	12
TN/TP	0.958949	6	0.9700610	2	0.944218	4
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.959917	4	0.9700532	3	0.944210	5
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.958593	9	0.9700479	4	0.944205	6
$\text{NO}_4^-\text{-N}$	0.959952	3	0.9701155	1	0.944271	3

3 讨论

3.1 益阳大通湖生态因子的关联序及优势影响因子

水质理化因子是决定水环境质量的内在因素, 但要直接分析水质理化指标与水环境质量的关系却非常困难。关联度分析是进行因素间时间序列的比较

来确定哪些是影响大的主导因素, 是基于灰色系统的灰色过程, 是一种动态过程的研究。它以发展态势为立足点, 揭示了事物动态关联的特征与程度, 具有关联度量化结果与定性分析一致的特点, 实用性更广泛(张绍良等, 1996)。

综合考虑初值化、均值化和效果测度变换的关联

序得: 亚硝酸氮>氮磷比>氨氮>总氮>硝酸氮>浮游动物>叶绿素 *a* >透明度>总磷>水深>水温>浮游植物>酸碱度>溶解氧。益阳大通湖表现为总氮(包括亚硝酸氮、氨氮和硝酸氮)和氮磷比是优势影响因子, 溶解氧、酸碱度则是相对次要的影响因子。

3.2 优势影响因子与浮游植物

氮和磷是浮游植物生长最重要的营养物质, 又是常见的限制营养元素(Reynolds, 1984; Gurbuz *et al.*, 2002; Vadas *et al.*, 2005), 因此氮和磷对浮游植物的生长具有主导作用。

浮游植物的不同种类最适氮磷比值不同, 而且会相差很大(从 4:1 到 40:1)(吴世凯等, 2005; 陈文煊等, 2008; 丰茂武等, 2008), 此外, 因浮游植物的优势种类不同, 不同的水域和同一水域的不同时间, 对氮磷比值也有不同的要求。许多专家学者通过研究发现在水生植物生长过程中, 最常缺的是磷, 其次是氮(裘松, 1981; 樊启学, 1991)。Redfield 定律认为, 藻类细胞组成的原子比率 $N:P=16:1$, 当氮磷比小于 10:1 时, 氮通常被考虑为限制性因素; 当氮磷比超过 16:1, 磷被认为是限制性因素; 而当氮磷比在 10—20 之间时, 限制性因素则变得不确定(Li *et al.*, 2001)。湖泊等淡水中浮游植物的生长一般适合此规律(Schanz *et al.*, 1983)。益阳大通湖是人工养殖高产湖泊, 每年可产鲜鱼 1.2 万吨, 且投饵养殖与施肥并重。每年向大通湖人工投入的饲料在 1.4 万吨左右、肥料在 1.2 万吨左右。虽然每年投入了大量的饵料, 但没有产生过有害“水华”, 且水质一直保持稳定(表 1)。益阳大通湖氮磷比平均值为 10.6:1(表 1), 根据上述规律可判断益阳大通湖水体中氮和磷的限制性并不确定, 说明大通湖水体中的氮磷比较适合浮游植物的生长繁殖。

3.3 大通湖自净能力强

浮游植物的大量繁殖促进浮游动物的生长繁殖, 水体中的鱼类和底栖动物有充足的饵料和浮游生物作为食物, 实现了人工养殖高产的目的。大通湖养殖的品种以鳙、草、鲢鱼为主, 适当搭配鲤鱼、鲫鱼、鳊鱼、青鱼等十余个品种, 并人工放养大闸蟹, 取得了不错的社会效益和经济效益, 尤其是大通湖大闸蟹, 已成为湖南省的著名品牌。通过这种渔业方式, 达到能效渔业“越加越少”的目标(杨品红等, 2010a, b)。

大通湖底栖动物量大, 产量每年在 3.5 万吨以上。丰富的底栖动物可为河蟹、甲鱼、青鱼等提供丰富的生物饵料, 特别底栖动物在生长过程中吸收利

用了大量的氮、磷、碳等元素, 据测定: 每 1000kg 底栖动物可降二氧化碳达 274kg, 即每年产 1 万吨底栖动物, 可降二氧化碳高达 0.3 万吨。是降碳、减排、防治水体富营养化的最佳降碳减排能效渔业模式。

3.4 发展碳汇渔业

一般情况下, 人们认为往水中投肥就是污染水体。实际上, 适当投肥能够促进水中浮游生物生长, 提高浮游生物对水体中的氮、磷和空气中的二氧化碳的吸收转化率。若湖泊放养一定密度的鲢、鳙等滤食性鱼类, 通过食物链作用, 最终氮、磷、碳等都能通过渔获物离开水体。既增加了渔业产量, 又消除了水体污染, 同时还直接或间接消耗了大气中的二氧化碳, 实现了“碳汇渔业”的目标。这与杨品红等(2010a, b)的观点一致: 适量投肥能促进水体中浮游生物生长, 浮游生物通过鱼类摄食, 经食物链进入鱼体, 最后经渔获而离开水体, 由此来消除投肥引起的水体污染, 既改善了水质, 又增加了鱼产量, 同时还提高了水库和湖泊等大水面的综合效益, 实现水体营养盐能效渔业达到“越加越少”的目标。益阳大通湖的这种渔业方式, 对净化渔业水质、缓解全球气候变暖趋势、减少二氧化碳等温室气体的排放、发展低碳经济都具有非常重要的现实意义。

参 考 文 献

- 万 星, 丁 晶, 张少文等, 2005. 基于灰色理论的水环境影响因素分析. 人民黄河, 27(5): 37—38, 41
- 丰茂武, 吴云海, 冯仕训等, 2008. 不同氮磷比对藻类生长的影响. 生态环境, 17(5): 1759—1763
- 水乃翔, 董太亨, 沙 震, 1992. 关于灰关联度的一些理论问题. 系统工程, 10(6): 23—26
- 邓聚龙, 1985. 灰色控制系统. 武汉: 华中理工大学出版社, 1—235
- 申卯兴, 薛西锋, 张小水, 2003. 灰色关联分析中分辨系数的选取. 空军工程大学学报(自然科学版), 4(1): 68—70
- 吕 峰, 1997. 灰色系统关联度之分辨系数的研究. 系统工程理论与实践, 17(6): 49—54
- 刘燕东, 黄川友, 张金燕, 2005. 地表水主要指标与水环境质量的灰色关联分析. 东北水利水电, 23(2): 40—41
- 杨品红, 王志陶, 徐黎明, 2010a. 人工控制条件下津市西湖生态因子的灰关联分析. 水生态学杂志, 3(1): 7—13
- 杨品红, 王志陶, 徐黎明, 2010b. 能效渔业状态下津市西湖生态因子与浮游植物密度的灰关联模型 {GM(I, N)}. 海洋与湖沼, 41(3): 403—409
- 杨品红, 徐黎明, 覃忠元等, 2014. 华容东湖围栏生态因子的灰关联分析. 海洋与湖沼, 45(4): 823—827
- 杨品红, 覃忠元, 徐黎明等, 2011. 澧县王家厂水库生态因子的灰关联分析. 水生态学杂志, 32(4): 18—23
- 吴世凯, 谢 平, 王松波等, 2005. 长江中下游地区浅水湖泊

- 群中无机氮和 TN/TP 变化的模式及生物调控机制. 中国科学 D 辑: 地球科学, 35(S2): 111—120
- 张绍良, 张国良, 1996. 灰色关联度计算方法比较及其存在问题分析. 系统工程, 14(3): 45—49
- 陆 峰, 葛怀凤, 吴赛男等, 2013. 西南水电站建成后底栖动物与环境因子的灰关联分析. 中国水能及电气化, (3): 1—4
- 陈 娟, 杨象梁, 2013. 灰关联分析法在黄家湖水质评价的应用. 环境科学与管理, 38(4): 76—78
- 陈文煊, 王志红, 2008. 不同形态氮对富营养化水源藻华暴发的潜在影响. 给水排水, 34(9): 22—27
- 易德生, 郭 萍, 1992. 灰色理论与方法. 北京: 石油工业出版社, 1—224
- 侯晓亮, 谭晓慧, 2011. 灰色关联理论在边坡稳定性分析中的应用. 路基工程, (3): 16—18, 22
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 64—66
- 裘 松, 1981. 湖泊富营养化调查和监测的若干问题. 环境科学丛刊, 2(5): 8—18
- 樊启学, 1991. 水库施肥养鱼(一). 水利渔业, (2): 47—50
- Gurbuz H, Kivrak E, 2002. Use of epilithic diatoms to evaluate water quality in the Karasu River of Turkey. Journal of Environmental Biology, 23(3): 239—246
- Li R X, Zhu M Y, Chen S *et al.*, 2001. Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms. Acta Ecologica Sinica, 21(4): 603—607
- Reynolds C S, 1984. The Ecology of Freshwater Phytoplankton (Cambridge Studies in Ecology). Cambridge: Cambridge University Press, 157—183
- Schanz F, Juon H, 1983. Two different methods of evaluating nutrient limitations of periphyton bioassays, using water from the river Rhine and eight of its tributaries. Hydrobiologia, 102(3): 187—195
- Vadas P A, Kleinman P J A, Sharpley A N *et al.*, 2005. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: a single extraction coefficient for water quality modeling. Journal of Environmental Quality, 34(2): 572—580

GRAY CORRELATION ANALYSIS ON ECOLOGICAL FACTORS IN DATONG LAKE IN YIYANG CITY

YANG Pin-Hong¹, XU Li-Ming², QIN Zhong-Yuan², PAN Ying³, ZHAN Jian¹, SHI Peng-Ling¹,
ZHANG Qian², WANG Xiao-Yan², XIE Chun-Hua², LI Meng-Jun²

(1. Dongting Lake Aquatic Healthy Farming and Processing Hunan Provincial Key Laboratory, Zoology Key Laboratory in University of Hunan Province, College of Life Sciences, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China; 2. Dahu Aquaculture Co. Ltd., Changde 415000, China; 3. Nanjing Fishery Science Research Institute, Nanjing 210036, China)

Abstract Based on space mathematical theory, the principles of normalization, symplectic symmetry, integrality, and accessibility etc., we applied gray system correlation method, with which the correlation degree of 14 ecological factors were calculated for Datong Lake in Yiyang, Hunan. The descending order of correlation was nitrous nitrogen > phosphorus-nitrogen ratio > ammonia nitrogen > total nitrogen > nitrate nitrogen > zooplankton > Chl *a* > transparency > total phosphorus > water depth > water temperature > phytoplankton > pH value > dissolved oxygen. It shows that total nitrogen (including nitrous nitrogen, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen) and phosphorus/nitrogen ratio were the advantage factors. The gray correlation analysis showed that the lake water quality was good, and total nitrogen, phosphorus/nitrogen ratio, and total phosphorus were suitable for plankton growth and proliferation, which is very important to fishery production potential improvement.

Key words Datong Lake in Yiyang City; ecological factors; gray correlation analysis