

北京市北环水系富营养化因子分析*

曾 勇 杨志峰** 刘静玲

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

【摘要】 以北京市北环水系水体为例, 利用聚类分析将研究区分为河流子系统和湖泊子系统. 因子分析表明, 河流子系统第一主成分富营养元素为总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮(NH₄-N), 第二主成分为温度(T)和溶解氧(DO); 湖泊子系统第一主成分为总氮和氨氮, 第二主成分为总磷、酸碱度(pH)、透明度(SD)和温度, 第三主成分为溶解氧和叶绿素 a(Chla), 表明研究区的水体富营养化主要由富营养盐负荷引起. 结合逐步回归分析方法, 建立富营养水平预测回归模型, 根据模型自变量选择证明河流子系统富营养化特征为磷限制型, 湖泊子系统为氮限制型. 从水量和水质上对营养盐浓度负荷变化分析表明, 研究区年最小生态环境用水为 $4.872 \times 10^4 \text{ m}^3$, 1990~1998年, 除1998年外, 现实的生态环境需水均不能满足需求. 随着流域人口的不断增长, 生活污水、城市径流和固体废弃物淋溶液中营养物质进入水体, 研究区营养盐浓度负荷有随时间不断增长的趋势, 针对这种趋势提出了应对措施.

关键词 城市水系 富营养化 特征 因子分析 逐步回归
文章编号 1001-9332(2005)08-1513-05 **中图分类号** X17 **文献标识码** A

Factor analysis of Beijing north ring water system eutrophication. ZENG Yong, YANG Zhifeng, LIU Jingling (Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(8): 1513~1517.

Eutrophication is caused by hydrological, physical or chemical factors such as temperature, illumination, or shapes of waters. It is very important to identify the main factors to understand and control the process of eutrophication. In this paper, Beijing north circle water system was divided into river subsystem and lake subsystem by cluster analysis. Factor analysis indicated that the main factors of river subsystem eutrophication were TP, TN and NH₄-N, while those for lake subsystem were TN and NH₄-N, which meant that in the study area, the main cause for eutrophication was the overload of nutrients. Stepwise regression was introduced to build forecasting model, and the choice results of independent variables in the regression model inferred that the type of eutrophication in river subsystem was P limited, while that of lake was N limited. Two main causes for nutrient load were found from water quantity and quality analysis of the study area, one was the ecological water demands be not able to satisfy from 1990 to 1998 except 1998, and the other was the increase of nutrient load coming from domestic waste and non-point pollutant, resulting from the rapid population increase and city expansion. The measures to control the eutrophication process were put forward.

Key words Urban water system, Eutrophication, Characteristics, Factor analysis, Stepwise regression.

1 引 言

水体富营养化是在人类活动干扰下多种因素长期作用的结果. 除营养物质外, 其它影响因子还包括气候因子(如光、温和降水等)、地理因子(如湖盆、河底的地质状况等)和生物因子(如鱼的种类和数量等)^[6,7,10]. 在如此多的因素中, 找出主要因子, 分析人为因素和自然因素的影响及规律, 可以更好地理解水体加速富营养化的原因, 抓住富营养化问题的本质, 科学有效调控水体富营养化过程.

因子分析方法将众多的原变量组成少数的独立新变量, 并用较少的具有代表性因子来概括多维变量所包含的信息, 在水资源和水环境研究中得到应用^[11,19]. 本文利用聚类分析将研究区分为不同的子系统类型, 采用因子分析方法对不同子系统的多维水环境监测数据进行分析, 寻找水体富营养化的主

要影响因素; 结合逐步回归分析和其他经验分析结果验证因子分析结果的准确性, 为北环水系富营养化水体的生态恢复提供决策建议.

2 研究区域与研究方法

2.1 自然概况

北环水系主要包括永定河引水系统玉渊潭以上断面、京密引水系统昆玉段和内城河湖水系及北护城河四大水系. 其流域面积内城河湖水系为 16.7 km², 北护城河水系 19.5 km², 永定河引水系统玉渊潭以上 92 km², 京密昆玉段引水系统 23.9 km², 研究区总流域面积为 469.9 km².

研究区年均降水量 562 mm, 平均气温 12.7 ℃, 最大月多年平均气温 18.2 ℃, 最小月多年平均气温 7.8 ℃; 年年

* 国家“863”计划项目(2003AA601010)和国家自然科学基金重点资助项目(50239020).

** 通讯联系人.

2004-10-04 收稿, 2005-03-07 接受.

蒸发量 1 833 mm.主要补水水源来自官厅水库,从 2000 年至今,连续 3 年因水体富营养化爆发水华.根据 OECD 提出的营养类别界定系统^[1],研究区水体富营养化状态如图 1 所示.团城湖、麦钟桥、三家店为中营养断面;高井、南海、中海、筒子河为富营养断面;中海入口、西海、前海、后海、北海、松林闸、罗道庄、亮马河为超营养断面.

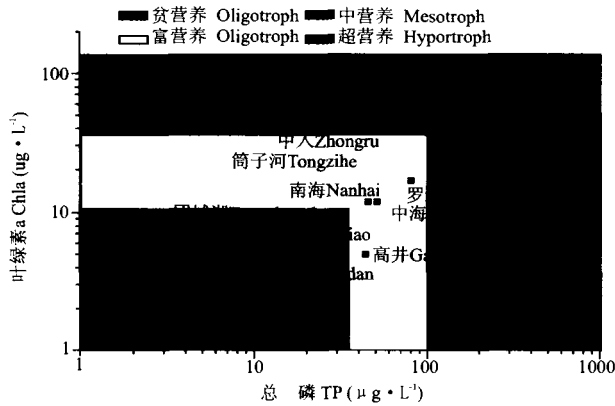


图 1 研究区水体富营养化分类
Fig.1 Classification of eutrophication in studied area.

2.2 研究方法

选用 2002 年各水质监测断面 T, PH, DO, CODMn, TP, NH₄-N, TN, Chla 等指标的年平均数据,运用 SPSS 软件中的系统聚类法 (hierarchical cluster) 中的 Classify 功能对数据进行分析^[9,18].由于指标数据之间方差相差太大,在标准正态变化处理原始数据后,用组间连接法测量各变量之间的距离.

3 结果与讨论

3.1 类型 A 因子分析

据聚类分析结果,将研究区分为两种类型,类型 A 为永定河引水渠和京密引水渠的人工河道系统;类型 B 为北京“六海”人工湖泊系统.

以 2002 年 4 ~ 11 月“永引”和“京密”引水渠 (类型 A) 月水环境监测数据,应用 SPSS 统计软件的 Factor analysis 功能对数据进行分析,经检验,叶绿素 a 含量与 pH 值、COD、总氮、总磷和氨氮极显著相关,如果直接用于分析,可能带来严重的共线性问题.

表 1 为因子累积贡献率表,对于类型 A,旋转后的特征值从大到小的次序排列,第一个主成分的特征根为 3.397,它解释了总变异的 42.5%;第二个主成分特征根为 2.395,它解释了总变异的 29.9%,第三个主成分特征根为 0.891,小于 1,说明该主成分的解释力度不如直接引入原变量大.因此只提取前

两个主成分,经累计贡献率 $\sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{P} \geq 72.4\%$.这样从多维数据中获得了主要信息.

表 1 因子的特征值、贡献率及累积贡献率
Table 1 Latent root, contribution rate and accumulative rate of factors

类型 Types	主成分 Component	旋转前 No rotated			旋转后 Rotated		
		特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution of variance (%)	累积贡献率 Cumulative contribution (%)	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution of variance (%)	累积贡献率 Cumulative contribution (%)
A	1	4.070	50.870	50.870	3.397	42.464	42.464
	2	1.722	21.530	72.400	2.395	29.936	72.400
	3	0.891	11.138	83.538			
B	1	2.842	31.577	31.577	2.624	29.157	29.157
	2	2.488	27.644	59.221	2.267	25.189	54.346
	3	1.362	15.136	74.356	1.801	20.010	74.356
	4	0.819	9.101	83.457			

为了对每个公因子寻找适当的解释,继续采用方差最大化正交旋转放大各因子之间的差异,结果如图 2 所示.第一主成分为营养盐负荷 TP 和 TN, NH₄-N,第二主成分为水体的生态环境特征 T 和 DO;CODMn 和 Chla 则介于两者之间.

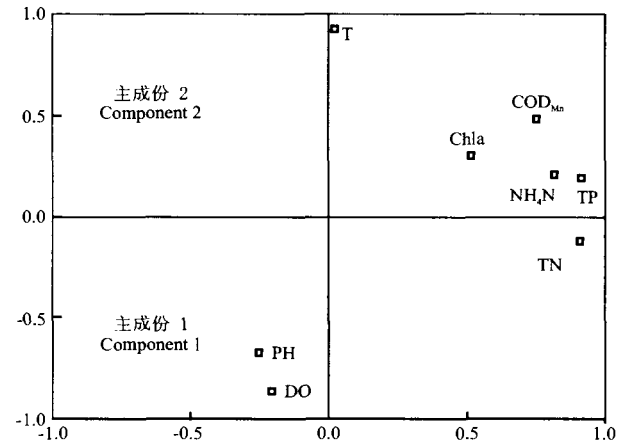


图 2 类型 A 旋转后因子载荷图
Fig.2 Component matrix of type A after rotation.

采用逐步回归方法建立引水渠道的富营养化预测模型,自变量为 TP、TN、COD_{Mn}、T、NH₄-N,因变量为 Chla,采用 SPSS 软件 Regress 分析中的 step-wise 法,模型系数经 T 检验 (表 2),满足统计学检验要求.类型 A 的预测模型为:

$$Chla = 0.004 + 0.05TP \quad (R^2 = 0.399) \quad (1)$$

据 TP 浓度,可用公式 (1) 预测北京北环水系引水渠的富营养化水平;并进一步说明引水河道富营养化状态与 TP 浓度密切相关.

3.2 类型 B 因子分析

“六海”人工湖泊系统水质监测数据经相关系数检验,其叶绿素 a 含量与 DO、COD_{Mn}、总氮、总磷极显著相关,与 pH 值显著相关.按特征根从大到小的次序排列,第一个主成分的特征根为 2.622,它解释

了总变异的 32.8%;第二个主成分特征根为 1.911,它解释了总变异的 23.9%,第三个主成分特征根为 1.634,它解释了总变异的 20.43%;第四个主成分虽然解释了总变异的 8.6%,但它的特征根为 0.69,小于 1,因此只提取前 3 个主成分,经累计贡献率

$$\sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{P} \geq 74\%, \text{结果如表 1 所示.}$$

表 2 回归模型 T 检验

类型 模型 Type Model	未标准化系数 Unstandardized coefficients		标准化系数 Standardized coefficients		T	P
	偏回归系数 B	系数标准误 Std. error	标准化回归系数 β			
A 常数 Constant	0.004	0.002			1.975	0.053
总磷 TP	0.050	0.014	0.399		3.452	0.001
B 常数 Constant	-0.093	0.041			-2.272	0.027
溶解氧 DO	0.010	0.002	0.502		4.680	0.000
透明度 SD	-0.090	0.037	-0.296		-2.472	0.017
总氮 TN	0.039	0.013	0.330		2.945	0.005
温度 T	0.002	0.001	0.258		2.045	0.046

采用方差最大化的正交旋转方法放大各因子之间的差异(图 3).从图 3 可以看出,TN 和 NH₄-N 为第一主成分,TP、pH、SD 和 T 为第二主成分,DO 和 Chla 为第三主成分中的主要因子.TN 和 NH₄-N 为第一主成分,说明 TN 和 NH₄-N 为富营养化的最重要因素,且营养盐除来自外源负荷外,还有一部分来自湖底微生物的厌氧分解,即含氮有机物被反硝化细菌还原而产生的氨态氮.第二主成分为 TP 和外部环境因素,说明对比 TP 负荷和水质环境因子,TN 和 NH₄-N 对类型 B 水体的富营养化影响更为重要.第三主成分表明了富营养化过程中水体的生物学状态.

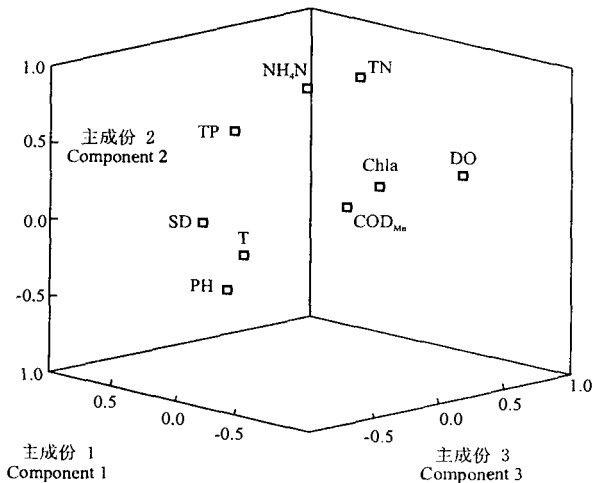


图 3 类型 B 旋转后因子载荷图
Fig.3 Component matrix of type B after rotation.

采用逐步回归方法,以 Chla 为因变量,引入

DO、SD、TN 和 T 4 个变量,类型 B 的回归方程为:

$$\text{Chla} = -0.093 + 0.01\text{DO} - 0.09\text{SD} + 0.039\text{TN} + 0.002\text{T} \quad (R^2 = 0.505) \quad (2)$$

可见,“六海”湖泊富营养状况主要与总氮和透明度有关.

3.3 营养盐负荷变化分析

3.3.1 研究区河湖基础流量分析 城市河流(特别是人工沟渠)在水量方面存在两个问题,一是水流速度低,有些河段基本上是死水;二是在缺水的情况下,河流水位很低,反映在河道断面上的浸润部分占整个断面面积比例较低.而河道最小流量是河流生物存在或河流具有景观功能的前提条件,为使河道中的水流动起来,必须保证一定的流速和流量^[17].对城市河道断面应具有湿润面积比例和流速进行设定,推求出城市河流在水质满足水资源使用情况下具有一定生态、景观能力时断面上应具有的基础流量(表 3).

表 3 城市河湖基础流量等级指标

等级 Ranking	河流 River		湖泊 Lake
	湿润面积比例 Proportion of wettish areas(%)	流速 Velocity (m·s ⁻¹)	换水周期 Renewal time(yr)
最大 Maximum	100	0.02	0.083
较大 Larger	80~100	0.02	0.125
中等 Moderate	60~80	0.02	0.167
较小 Smaller	40~60	0.02	0.250
最小 Minimum	40	0.02	0.500

城市河湖生态基础流量平衡方程为

$$Q_L = Q_Z + Q_S + Q_V \quad (3)$$

其中, Q_L 为河湖基础流量, Q_Z 为河湖蒸发损失量, Q_S 为河湖渗漏损失量, Q_V 为河湖的基础流量(生物栖息地).

根据公式(3)计算所需生态需水量(表 4).

表 4 北环水系生态需水

北环水系 North ring water system	最小 Max.	较小 Smaller	中等 Moderate	较大 Larger	最大 Min.
生态需水 Ecological water demand(10 ⁴ m ³)	4872.1	6090.8	8526.8	10963.4	12181.2

1990~1998 年,研究区的环境用水平均用水量为 4 095 × 10⁴ m³(表 5).除 1998 年能满足最小的生态需水需求外,其余年份均不能满足需求.由于水量

缺乏,水动力条件不足,造成水体自净功能受到抑制.

3.3.2 进入研究区水体污染物量分析 以研究区的“六海”湖泊为例,其总氮和总磷污染物负荷主要来

自4个方面:铁灵闸来水、湖泊周边雨水径流、湖面降水以及湖泊本身的污染负荷,2002年总污染负荷如表6所示.

表5 1990~1998研究区实际环境用水

Table 5 Actual ecological water use in research areas (10^4 m^3)

年份 Year	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
环境用水 Environmental water demand	4047	3946	4145	4232	3815	3493	3835	4226	5122

表6 2002年入湖富营养元素负荷

Table 6 Nutrient load of lake inflow in 2002 (t)

水文年 Hydrologic year	铁灵闸来水 Inflow from Tielingzha gate		雨水径流 Run off		湖面降水 Precipitation in lake		湖泊水体内源 Endogenesis pollutants		合计 Total	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP		
50%	17.923	2.117	0.847	0.346	0.238	0.007	1.197	0.193	20.205	2.663
75%	15.244	1.936	0.625	0.255	0.177	0.005	1.197	0.193	17.243	2.389
95%	13.219	1.561	0.564	0.231	0.160	0.005	1.197	0.193	15.140	1.990

图4为1992~2001年的人口增长情况,10年间研究区人口增长了22%,而流域内的氮、磷负荷与人口密度有明显的相关关系.随城市化和人类活动对湖泊和河流压力的增大,水体营养盐负荷将逐年增加.

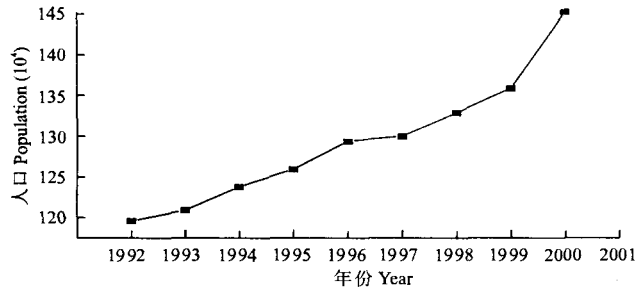


图4 研究区人口变化

Fig.4 Change of population in studied areas.

水体富营养化是一个十分复杂的现象,其影响因素除营养物质外,可能还包括气候因子(如光、温和降水等)、地理因子(如湖盆地质状况等)和生物因子(如鱼的种类和数量).对研究区的营养盐负荷变化趋势分析表明,人为因素为主要影响因素,营养盐负荷有随时间增加的趋势,如不采取有利措施控制营养盐负荷,水体富营养程度将会持续恶化.

4 结 语

北京城市北环水系水体富营养化的主要原因是外源性营养物质(主要是氮磷)负荷过大,造成水生生物大量繁殖,引起水生生态系统失衡.类型A富营养化为磷限制型,类型B为氮限制型.而营养物质浓度升高主要是由于生态需水得不到满足、水体

的流动性和自净能力受到限制及流域人口不断增长所带来的生活污水、城市径流和固体废弃物的淋溶污染不断进入水体所致.

为了控制水体的营养盐负荷,可以采取以下对策:1) 通过水量、水质的联合调度合理配置研究区生产、生活、生态需水.科学计算研究区的最小生态需水对水量和水质的需求,通过闸门的优化调度,污水处理厂脱氮除磷处理后的出水回用等工程措施,优先满足研究区最小生态需水的水量、水质要求.2) 外源污染物的控制.外源污染是研究区主要污染源,点源控制主要是彻底实施截污和雨污分流工程,防止生活污水跟随暴雨径流进入水体.生活污水通过专门管道,集中进入城市污水处理厂进行脱氮除磷处理,使污水处理厂出水水质达到地表三类水体的氮、磷要求.城市非点源负荷管理控制主要通过最佳管理实践(BMP)^[2,3,5,13]在源和迁移两方面减少面源污染物进入水体.3) 在控制外源污染的前提下,针对具体生态环境特征,根据生态工程理论,通过曝气、最低流量保障、人工生态工程技术和底泥生态工程技术等,因地制宜地修复水体生态环境,强化水体的自然净化功能^[4,8,12,14~16].

参考文献

- 1 Biswas AK. 2001. Water Resources Management and Planning. Zhengzhou: Water Conservancy for Yellow River Press. 238~239 (in Chinese)
- 2 Botcher AB, Tremwel TK, Campbell KL. 1995. Best management practices for water quality improvement in the lake Okeechobee watershed. *Ecol Eng*, 5: 341~356
- 3 Endreny TA. 2004. Storm water management for society and nature via service learning, ecological engineering and eco-hydrology. *Water Resour Dev*, 20(3): 445~462

- 4 Gelbrecht J, Tremwel TK, Campbell KL, *et al.* 1996. Diffuse nutrient impact on surface water bodies and its abatement by restoration measures in a small catchment area in Northeast Germany. *Water Sci Technol*, **33**(4~5):167-174
- 5 Han X-D(韩秀娣). 2000. Best management practices for non-point pollution. *Shanghai Environ Sci* (上海环境科学), **19**(3):102~104(in Chinese)
- 6 Hopper SH. 1998. Stable states buffers and switches: An ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in the Netherlands. *Water Sci Technol*, **37**(3):151~164
- 7 Jing X-C(金相灿). 2001. Control and management technique of lake eutrophication. Beijing: Chemical Industry Press. 15~17 (in Chinese)
- 8 Klinge M, Grimm MP, Hopper SH. 1995. Eutrophication and ecological rehabilitation of Dutch lakes: Presentation of a new conceptual framework. *Water Sci Technol*, **31**(8):207~218
- 9 Lu W-D(卢纹岱). 2000. SPSS for Windows Using for Statistical Analyzing. Beijing: Electronic Industry Press. 311~334 (in Chinese)
- 10 Quan W-M(全为民), Shen X-Q(沈新强), Yan L-J(严力蛟). 2003. Advances in research of biological purification of eutrophic water body. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(11):2057~2061(in Chinese)
- 11 Reisenhofer E, Piccotto A, Li D. 1995. A factor analysis approach to the study of the eutrophication of a shallow, temperate lake (San Danicle, Morth Eastern Italy). *Anal Chim Acta*, **306**:99~106
- 12 Sun G(孙刚), Sheng L-X(盛连喜). 2001. Ecological engineering for eutrophication control in lake. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **12**(4):590~592 (in Chinese)
- 13 Wang C(王超), Wang P-F(王沛芳). 2004. Urban Water Ecological System and Management. Beijing: Science Press. 34~35 (in Chinese)
- 14 Wang J(王君), Gu Y-F(顾宇飞), Zhu Z-Y(朱增银), *et al.* 2005. Physiological responses of *Ceratophyllum demersum* under different nutritional conditions. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **16**(2):337~340(in Chinese)
- 15 Webb AA, Erskine WD. 2003. A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia. *J Environ Man*, **68**:329~341
- 16 Wu Z-B(吴振斌), Qiu D-R(邱东茹), He F(贺锋), *et al.* 2003. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(8):1351~1353(in Chinese)
- 17 Yang Z-F(杨志峰), Cui B-S(崔保山), Liu J-L(刘静玲), *et al.* 2003. Ecological Water Demand Theory, Method and Practice. Beijing: Science Press. 74~77 (in Chinese)
- 18 Zhang W-T(张文彤). 2003. The schoolbook of SPSS 11 Using for Statistical Analyzing. Beijing: Hope Electronic Press. 234~235 (in Chinese)
- 19 Zhang Y(张妍), Shang J-C(尚金城), Yu X-Y(于相毅). 2003. Sustainable utilization of water resources in Jilin Province. *Adv Water Sci* (水科学进展), **14**(4):489~493(in Chinese)

作者简介 曾 勇,男,1974年生,博士后.主要从事流域水资源管理、生态环境需水、生态规划等方面研究,发表论文10余篇. Tel:010-80933948; E-mail: yongzeng1974@163.com
