

富营养化水体的营养盐限制性研究综述

孔范龙, 郝敏, 徐丽华, 李悦, 秦培瑞

(青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

摘要: 水体富营养化是全球目前以及今后相当一段时期内的重大水环境问题。氮、磷作为浮游植物生长所必需的营养盐, 是水体富营养化的主要限制因子。通过对近年来水体富营养化受氮、磷营养盐限制的研究进行综述, 研究了营养盐来源及其对浮游植物生长的影响, 总结了营养盐限制性差异的影响因素, 分析了缓解富营养化的营养盐主控因子。分析表明: 营养盐的来源主要分为外源和内源, 受外界环境及人类活动影响显著; 浮游植物的生长受 N/P 比值及其绝对浓度的共同作用; 在不同的水文、气候和人类活动强度下, 水体富营养化主要营养盐限制因子存在差异, 并且存在限制性转换和共同限制的情况; 缓解水体富营养化措施的提出应在综合考虑多种因素的前提下进行。

关键词: 富营养化; 营养盐限制因子; N/P 比值; 浮游生物

Review of studies on the limitation of nutrients in the eutrophic water

KONG Fanlong, XI Min, XU Lihua, LI Yue, QIN Peirui

(School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Background, aim, and scope As a global environmental issue, eutrophication has been recognized as the most common and severe problem, which originated from the excessive input of nutrients from agricultural run-off, untreated industrial and urban discharges. The primary symptom of eutrophication is excessive production of phytoplankton and other microorganisms. Two elements, nitrogen (N) and phosphorus (P), explain most of the experimentally diagnosed nutrient limitation of algal growth in inland waters under natural or human-modified conditions. Therefore, in recent years, a variety of studies focused on the interactions between cyanobacterial proliferation and nutrient limitation has been investigated and many valuable results were obtained. However, there is a strong controversy now to the alternative possibilities for controlling one nutrient preferentially (P) or two nutrients with equal emphasis (N, P). And the short of systematic summaries about them exists. This paper sums up the experience centring on nutrient limitation problems in order to provide a reference of eutrophication control. **Materials and methods** A lot of literatures were retrieved around nutrient limitation of eutrophication; based on this, we made a systematic analysis from some aspects, including the sources of nutrients in water bodies, the growth restriction of phytoplankton by nutrients, the influence of nutrient limitation, and the nutrients control measures for

收稿日期: 2015-11-18; 录用日期: 2015-12-10

Received Date: 2015-11-18; Accepted Date: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101080); 山东省自然科学基金项目(ZR2015DM004, ZR2014DQ028, ZR2011DQ009); 青岛市公共领域科技支撑计划资助项目(12-1-3-71-nsh)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China(41101080); Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2015DM004, ZR2014DQ028, ZR2011DQ009); Sci-Tech Support Program of Qingdao(12-1-3-71-nsh)

通信作者: 孔范龙, E-mail: kongfanlong@126.com

Corresponding Author: KONG Fanlong, E-mail: kongfanlong@126.com

eutrophication relieving. **Results** The results show that exogenous nutrients of contaminated lakes and rivers mainly come from agricultural activities, industrial production, and domestic wastewater; endogenous pollutions were basically due to the release of sediment nutrients. The limiting nutrient concept holds that nutrient deficiency at any given time in a photosynthetic organism can be traced to a single element, which is the element available in the least amount relative to the needs of the organism. Therefore, in order to control the excessive algal growth, it is important to know which element limits the expansion of algal populations when their growth stops because of nutrient depletion. The growth restriction of phytoplankton influenced by nutrients reflected in two aspects: (1) the absolute concentration of nutrients; (2) the relative ratio of nutrients (N, P), the concentrations of which jointly affected the growth of algae. However, there exists difference of nutrient limiting factor of eutrophication, which was affected by hydrology, weather and the intensity of human activities. The limiting nutrient concept is more complex for an entire community or ecosystem than it is for a single organism. For example, species may differ, even among organisms of similar type (e.g., algae), in their optimal internal N: P ratios, and their ability to store critical nutrients or to take up a nutrient at low concentrations. Thus, it is possible in a mixed community of algae for some species to be limited by phosphorus and others to be limited by nitrogen. In addition, it is possible for an environment to be very near the nutrient limitation thresholds for N and P simultaneously. Thus, a slight enrichment with one element could cause the other element to become limiting. A third possibility is that seasonal or spatially heterogeneous changes may occur in the relative availability of potentially limiting nutrients. All of these circumstances have been documented experimentally and in nature. Finally, we suggest that the controlling of N and P loadings could be considered to relieve the eutrophication, and, P inputs should be primary controlled in comparison with N. Much more attention has been given to P limitation than to N limitation in inland waters for three reasons: (1) control of total phosphorus in effluents is feasible and is increasingly being required by regulations; (2) N_2 fixation by cyanobacteria (also known as blue-green algae) has been assumed to make N control ineffective, but could be made more feasible by recognition that a substantial portion of dissolved organic nitrogen is not bioavailable; (3) the correlation between chlorophyll (an index of algal abundance) and total P among lakes is stronger than the correlation between chlorophyll and total N.

Discussion The results also show that the sources of nutrients include exogenous and endogenous pollutions. The nutrient limitation factor was unlike under different nutrient conditions. The concentrations of N and P as well as their ratio could be an alternative reason that influences the proliferation of algae. In addition, external conditions such as climate, environment, hydrology as well as the intensity of human activities would affect the concentrations and their ratios. In order to control eutrophication, the concentration difference should be considered to relieve the degree of pollution. Moreover, the nutrient limitation factor of eutrophication should be determined for taking appropriate control methods. **Conclusions** Comprehensive studies show that the endogenous and exogenous sources of nutrients which are remarkable influenced by human activities and external environment. The growth of plankton is influenced both by the ratio of nitrogen and phosphorus and their absolute concentrations. The main limiting factors of nutrients that lead to eutrophication are different with different climate, hydrology and human activity intensity of water area.

Recommendations and perspectives In the future study, mechanism discussions should be emphasized to do in-depth analysis on nutrient restriction of eutrophication. At the same time, the response relationships between nutrients (N, P) and algae proliferation should be clarified in the future, in order to complete the forecasting and forewarning model of eutrophication. Additionally, the joint of a variety of biotechnologies need to be improved to explore the interactions among different species and ecological security.

Key words: eutrophication; limiting nutritional factors; N/P ratio; plankton

水体富营养化是当今世界面临的重大水环境问题之一。研究表明,营养盐可以影响藻类的生长、生物量以及种群结构(Caron et al, 2000; 李明等, 2013)。其中,氮、磷作为浮游植物生长所必需的营养元素,对藻类的生长影响作用显著,是造成富营养化的主要限制因子(赵永宏等, 2010)。

传统的富营养化评价方法有单因子指数法、综合指数法和模糊数学综合评价方法,但这些方法不能直接揭示营养盐限制对富营养化的影响。根据我国天然水体普遍受营养盐限制的特征,营养盐限制与潜在性富营养化评价模式被提出(郭卫东等, 1998)。为深入研究富营养化水体的营养盐限制性机理,国内外学者开展了相关的研究。部分学者研究认为,内陆水体以湖泊的富营养化最为常见,通常表现为磷限制(蔡龙炎等, 2010);而外源开放性水体,如河流、沟渠、海湾等的富营养化一般受到氮的限制(郭蔚华等, 2006; 陈晓玲等, 2013)。然而,也有研究表明水体富营养化营养盐限制因子并不是绝对的,在受到环境条件和人类活动的影响时,限制因子会在氮、磷之间进行转换,并且还可能存在共同限制的情况(Howarth and Marino, 2006; 陈晨等, 2012; 张丽玉, 2013)。总体而言,由于研究区域和研究角度等条件的不同,当前所开展的富营养化水体营养盐限制因子及其影响因素研究结果存在差异,且缺乏系统性总结。

鉴于此,本文就目前有关富营养化水体营养盐限制的相关研究进行综述,主要包括: i) 分析氮、磷营养盐的来源; ii) 分析营养盐对浮游植物生长的限制性; iii) 分析营养盐限制性的影响因素; iv) 总结缓解水体富营养化的营养盐控制措施,以期为解决水体的富营养化问题提供一定的参考依据。

1 营养盐来源分析

水体中营养盐的来源按进入途径可分为外源和内源。

外源包括非点源和点源。非点源的营养盐主要来自农业活动,包括种植业、畜禽养殖业和水产养殖业。近年来的大量研究表明,种植过程中化肥和农药的过量使用是造成非点源氮、磷营养盐浓度升高的主要原因(Kim and Gilley, 2008)。不同的耕作方式地表径流的富营养化风险存在差异,且随降雨强度不同而发生变化(于兴修等,

2011)。农田径流中各种溶解态氮、磷营养盐直接影响了受纳水体的环境质量(付登高等, 2015),并且作为农业非点源输出的最主要方式,土壤侵蚀与非点源污染密切相关(张玉斌等, 2007)。畜禽养殖业产生的畜禽尿液、冲洗场地以及加工过程的水也是重要的氮、磷来源,这些污水中氮、磷浓度高,排入水体后造成水质的不断恶化和水体的富营养化(刘建昌等, 2008);另外,随着水产养殖业的迅速发展,高密度、高产量的养殖模式产生了大量有机和无机污染物,对池塘及外环境水体造成较大氮、磷营养压力(朱鹏和陈红菊, 2014)。此外,作为点源氮、磷的主要来源,工业生产及生活过程产生的废水也对水体富营养化产生了显著的影响(王辉等, 2012)。

内源主要来自底泥的释放作用。在对湖泊氮、磷平衡的研究中发现,氮、磷截留总量中除少部分溶解态进入水体,增加了水体的营养盐浓度以及被水生生物利用外,大部分氮、磷会以颗粒物吸附态的形式沉积于水底。当水体中氧气、pH 和温度等环境条件发生变化时,会导致沉积物中氮、磷营养盐向上输送并释放于水体中,从而影响水体中营养盐的浓度,这也成为内源的主要来源(柏祥等, 2011)。各环境条件对于营养盐的输送和释放过程作用机理不同,其变化对营养盐的影响程度差异较大。研究表明,水体中溶解氧的影响主要在于厌氧状态能促进水体中氮、磷的释放,好氧状态则反之,甚至会发生磷的吸附过程(刘静静, 2006); pH 的变化对内源氮、磷的释放主要表现在影响其物理吸附和化学反应, pH 值升高会造成磷释放速率迅速增加,尤其是在富营养化比较严重的水域(Schmidt et al, 2004);温度的影响在于,随着温度的上升和上覆水体 NH_4^+ 浓度的降低,沉积物中 NH_4^+ 的释放量显著增加(钟继承等, 2009)。此外,上覆水体的交换周期也会影响沉积物中氮、磷的释放,周期延长将会严重增加水体的营养盐负荷,从而增加水体内源释放风险(高振美等, 2012)。

2 营养盐限制性的分析

Liebig J 在最小因子定律中指出:植物的生长取决于处在最小量状况下的必需物质,这种物质就是限制因子。氮、磷作为构成水体初级生产力的主要生源要素,直接影响了浮游植物的生产力水平(吴丰昌等, 2010),是水体富营养化的

关键限制因子。Redfield 定律认为,藻类细胞组成的原子比率 C:N:P=106:16:1,如果氮磷比超过 16:1,磷被认为是限制性因素;反之,当氮磷比小于 10:1 时,氮通常被考虑为限制性因素;而当氮磷比在 10—20 时,限制性因素则变得不确定(龙天渝等,2007)。该定律对一般水体中浮游生物的生长都是适用的,但由于不同的藻类对营养盐的吸收率存在差异,氮磷比对藻类生长的影响也没有确定的值。而且,当环境中氮或磷元素浓度较高时,Redfield 定律就失去了其应用范围(丰茂武等,2008)。

已有研究表明,营养盐对浮游植物生长的限制主要表现在两个方面,一是营养盐绝对浓度;二是营养盐相对比值。

2.1 营养盐绝对浓度的影响

2.1.1 磷浓度的影响

根据我国天然水体普遍受到磷限制的情况,相关学者开展了大量的研究。磷在细胞碳氮代谢中起着非常重要的作用,在不同磷浓度条件下,藻类细胞密度有明显的差异(丁飞飞等,2010)。在磷充足的条件下,藻类细胞生长良好,而当磷浓度不足时,磷元素成为水体富营养化的限制因子,藻类的生长速率受到磷的限制,光合作用直接产物碳水化合物含量相对减少,不健康的细胞释放到环境中的产物较多。一般来说,藻类细胞的生长通常分为四个阶段,即迟缓期、对数期、稳定期和衰亡期。在无磷条件下,藻类的生长受到明显的影响,藻细胞数量仅在开始的几天内有小幅增长,随后一直呈下降趋势,直至藻细胞逐渐死亡,藻类的生长曲线趋于直线;然而在磷浓度比较高的情况下,整个生长期藻细胞的生长趋势相近,稳定期时的藻细胞密度达到最大值(文世勇,2012)。

研究发现,在不同的磷浓度下,藻类之间存在竞争。在水体富营养化之前,以甲藻和绿藻居多,水体发生富营养化后,蓝藻的数量急剧增多,但是在水体磷浓度进一步升高以后,原先具有竞争优势的蓝藻等会逐渐失去优势(秦伯强,2002)。另外,在对铜绿囊藻和斜生栅藻的研究中发现,磷浓度小于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,两种藻类的生长速率均较低,藻类的生长普遍受磷营养盐的限制;当磷浓度高于 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,两种藻类的生长速率均达到最大值;而当磷浓度介于 $0.02—2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,

由于两种藻类营养盐结构的差异,藻类的优势种出现竞争的现象(许海等,2011)。

2.1.2 氮浓度的影响

与磷相比,氮浓度对水体富营养化影响的研究相对较少。根据 Liebig J 最小因子定律,在充足磷源供应的条件下,外部营养元素供应超过了藻类生长所需的条件,Redfield 定律便不再适用。此时,浮游藻类的生长会受到氮浓度的影响(文世勇等,2012)。

一般来说,在无氮源的情况下,藻类生长缓慢,生物量始终维持在较低的水平,说明此时的藻类生长受单一氮元素的限制。随着氮浓度的增加,藻类细胞数量逐渐增加,最后稳定在一定水平。这是因为充足的氮源有利于提高无机碳浓缩机制的效率,提高细胞对无机碳的利用效率,使藻类在低 CO_2 环境下维持光合机构的正常运行(易能等,2015)。而在低氮和中氮的条件下,由于藻类细胞中叶绿素含量下降,导致单位细胞光合能力降低,实际光合固碳量减少,藻类细胞密度降低。研究发现,中肋骨条藻细胞在高氮条件下的叶绿素含量要明显高于中氮和低氮条件下,并且在中氮和低氮环境下的叶绿素含量差别不大。另外,藻类的生物量与氮的形态有关(胡晗华等,2005;Xin et al, 2010)。

在不同的氮浓度条件下,藻类之间也存在竞争的情况(王菁等,2013)。在低氮浓度下,不同藻类的生长可能产生相互促进作用;而随着氮浓度的升高,藻类之间通常表现为相互抑制作用,即出现藻类之间的生长竞争,产生优势种。此外,不同藻类之间的生长竞争情况也与无机氮供给方式有关(万蕾等,2007)。

2.2 营养盐相对比值的影响

研究普遍认为,相对于利用单一的氮或磷绝对浓度来衡量水体中藻类生物的生产力水平即水体的富营养化程度而言,采用氮磷比这一指标则更具说服力(于兴修等,2011)。根据 Liebig J 最小因子定律,当水体中的 $\text{N/P} \gg (\text{N/P})_{\text{最佳}}$ 时,磷营养盐的浓度小于浮游植物生长所需的最小值,就会出现磷限制;而当水体中的 $\text{N/P} \ll (\text{N/P})_{\text{最佳}}$ 时,氮营养盐的浓度小于浮游植物生长所需的最小值,就会出现氮限制。通常情况下,海洋、湖泊和河流等水体中浮游植物生长的最佳氮磷比为 16:1,这遵循了 Redfield 定律;而浅海或近海海域,由于其

自身生态系统的复杂性及其高营养盐浓度的环境,浮游植物生长的最佳氮磷比往往不遵循 Redfield 定律(沈志良,2002)。

由于不同种类藻类细胞的元素组成存在差异,对营养物质的需求也不尽相同,因此当某种营养盐缺乏而限制浮游植物的生长时,便可能会促进对该营养盐要求较低的浮游植物的繁殖,从而形成优势种。特殊的营养源输入形式会导致不平衡的氮磷比和不同的营养压力,过大或过小的氮磷比都容易造成浮游植物的生长限制(徐艳东等,2015)。不同营养水平下藻类的竞争实验结果表明,在贫营养水平下,随着 N/P 值的增大,单独培养的藻类的最大现存量都有所增加,而不同的藻类增加的幅度存在一定的差异;共同培养的藻类,在 N/P 值增加至 20 时,藻类之间才发生竞争抑制作用,这与藻类之间通过寄生、互相依存提高营养物质的利用率有一定的关系。在富营养和超富营养水平下,随着 N/P 值增大,单独培养的藻类最大现存量也呈增加趋势,但变化不明显;共同培养时,低 N/P 时便出现藻类的生长抑制,且随着 N/P 比值的增加,相互抑制作用逐渐加强(万蕾等,2007)。

分析表明,水体中氮、磷浓度较低或者氮、磷的浓度比较高但仍处于 Redfield 定律的适用范围之内时,可根据 Redfield 定律来判断水体富营养化的限制因子或潜在限制因子。而随着氮、磷浓度的升高,Redfield 定律对其不再适用时,则应结合水体中氮、磷的浓度进行具体分析。通过分析不同氮、磷浓度下藻类的生长情况,以及藻类在不同氮、磷浓度及氮磷比下的竞争情况,以确定水体富营养化的限制因子。

3 营养盐限制的影响因素

氮、磷营养盐的限制性通常受多种因素的影响,研究者从不同的角度进行了研究,具体可总结为:人类活动强度,水体类型,季节和水文条件等。

分析现已开展的相关研究工作,人类活动的影响程度会导致水体富营养化的限制因子存在差异,其限制因子之间不仅会发生氮和磷的相互竞争,也会发生氮和磷之间的相互转化。营养程度较低的胶州湾等水域,由于其营养盐来源主要以工业和生活污水为主,径流供给少,水体富营养化主要受到氮的限制(陈晨等,2012);然而,长

江、黄河等受河流径流注入影响比较大的部分沿海区域,其无机氮含量比较高,导致其呈现磷限制的特征(曲丽梅等,2006;王奎等,2013)。此外,三江平原沟渠系统的研究表明由于湿地和农田排水中磷含量较高,沟渠往往呈现氮限制的特征(Conley et al, 2009; 郝敏等, 2014)。

水体类型的不同也会对营养盐的限制性造成影响。一般认为,海洋、河口等环境中的初级生产力受氮的限制,而在封闭性淡水环境中则受磷的限制(王保栋,2003)。在大洋和深海区,氮的供应相对不足,往往成为限制因子,如在南太平洋,初级生产者通常被认为是氮限制因子;在对北卡罗莱纳州的河口研究中发现,氮是该州河口系统的主要限制因子,磷偶尔发生协同限制。我国湖泊富营养化样本的统计分析表明,磷元素是富营养化的主要限制因子(蔡龙炎等,2010)。也有研究表明,在某些海洋生态系统中,如东西地中海,磷元素也作为其最主要的限制因子(Diaz et al, 2001)。

此外,氮、磷营养盐的限制性,受水文条件和季节变化的影响也较为显著,通常表现为营养盐浓度的差异。一般来说,枯水期的营养程度总体高于丰水期,这主要是因为丰水期的水流量比较大,对水中的各类离子浓度起到了较大的稀释作用,水体的自净能力比较强(刘浩和潘伟然,2008)。春夏两季,水体中氮营养盐的浓度相对较高,虽然浮游植物的生长需要消耗氮,但由于其再生循环速度比较快,使得这种影响比较有限,对水体中总氮的浓度往往影响不大。相反,磷元素相对缺乏,春夏季浮游植物和藻类对磷的消耗作用比较明显,导致磷浓度降低明显,从而导致 N/P 比值的季节变化比较明显,使氮、磷的限制性出现明显的季节性差异(毛成责等,2010)。

因此,随着人类活动强度、水体类型、季节和水文条件的变化,营养盐的限制因子往往会随之发生变化。

4 富营养化的控制因子分析

富营养化治理的关键是控制营养盐的输入。氮、磷营养盐与浮游生物生长具有明显的响应关系,是控制水体富营养化的关键因素。因此,对水体中氮磷营养盐的控制,是解决富营养化主要途径。

近年来的研究多数表明:富营养化治理的关

键是控磷,对氮的控制可以忽略(Schindler et al, 2008)。这主要是因为,首先氮限制具有局限性,在自然条件下这种氮限制往往不能长期存在,或经常发生由氮限制向磷限制的转换。加拿大和美国的科学家对安大略湖的施肥实验表明,在磷肥施加量不变的情况下,不断减少氮肥的施加量直至为零,湖泊一直处于富营养化状态,且水华现象持续发生,这说明氮限制未能对富营养化产生抑制作用;其次,水体自身的固氮作用,会使控氮失去意义。已有研究发现,美国Mize湖的自然固氮速度为 $7\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相当于每年向每公顷湖泊免费施用330 kg的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Keirn and Brezonik, 1971)。因此,即使有效地控制了人为氮输入,水体自身的固氮作用使其不会因缺氮而抑制富营养化过程;再次,考虑到与同时脱氮除磷相比,单独控磷来控制浮游藻类生物量具有明显的经济优势,可大幅降低运行成本(Wang and Wang, 2009)。因为在污水处理过程中,脱氮和除磷对工艺参数的要求往往相互矛盾,氮磷兼顾必然会降低处理效率、增加成本。目前单独除磷工艺中污泥泥龄(SRT)低于6天时,除磷效率也可达80%以上,而在氮磷共同去除的 A^2/O 工艺中, SRT一般应控制在8—15天,但除磷效率可能降至50%。目前,采取集中控磷方法缓解水体富营养化这一措施已得以应用并取得了较好的成效,如德国特弗维伦斯湖的治理实行集中控磷,有效地控制了藻类水华富营养化现象(Mehner et al, 2008)。此外,杭州西湖引配水工程中也开展了控磷不控氮实验,仅对水体中磷和悬浮物进行了处理,藻类也得以有效控制(王海军和王洪铸, 2009)。

然而部分学者认为,除控磷外水体富营养化治理还需严格控制氮的排放。这是因为氮对浮游生物以及水生生态系统其他方面有一定的影响,且随着氮不同形态的变化,这种影响也会发生变化。而且,当水体中的氮营养盐浓度过高时,会对人类和生物造成直接毒害。例如美国中西部玉米的种植造成了该盆地高氮的输入,并造成下游数百公里的藻类水华和渔业损失的案例充分说明了这一点(Baulch, 2013)。因此,对氮的控制也不容忽视。

综上分析表明,对水体富营养化的缓解,应以控磷为主,控氮为辅的处理措施为主。同时,应综合考虑多种因素,根据水体中营养盐状态,结合周围的环境条件采取针对性的控制方式。

5 结论和展望

水体富营养化导致浮游生物的大量繁殖,而氮、磷作为浮游植物生长的主要营养盐,是富营养化的主要限制因子。营养盐的来源主要分为外源和内源。在外源控制上,关键是控制非点源营养盐的输入,即控制以农业活动为主的营养盐来源;其次应加强对来自工业及生活污水的点源营养盐输入。营养盐的内源主要是由底泥中的氮、磷营养盐通过释放作用进入到水体中,及时清淤是减少内源氮、磷的关键。

在不同的氮、磷浓度及相对比值的条件下,藻类的优势种不同,富营养化的主要限制因子也存在差异。受气候、环境、水文及人类活动的综合影响,水体中氮、磷的浓度及相对比值具有差异性。因此,缓解水体的富营养化应根据水体中营养盐浓度差异,科学判断水体富营养化的限制因子,并结合周围环境条件采取合适的控制方式。

近年来,随着限制性富营养化研究的进一步深入,国内外对水体中营养盐,特别是氮、磷的研究也在逐渐加强完善。富营养化作为世界性水环境问题,对人们生产和生活产生了严重威胁。因此,将来在防治水体富营养化方面建议加强以下方面的研究:首先进一步强化机理研究,深入分析水体富营养化受氮、磷等营养盐限制的作用机理;其次进一步明确氮、磷等营养盐与富营养化藻类之间的响应关系,完善水体富营养化预测预警模型,提高短期预测精度;再次,在当前具有运行费用低、运用灵活、对环境友好等优势生态修复技术成为水体富营养化防治研究热点的形势下,应进一步强化多种生物技术之间的联合、物种之间的相互影响和生态安全方面的研究。

参考文献

- 柏 祥,陈开宁,任奎晓,等. 2011. 不同水深条件下狐尾藻生长对沉积物氮磷的影响[J]. 生态环境学报, 20(6): 1086–1091. [Bo X, Chen K N, Ren K X, et al. 2011. Influence of *Myriophyllum spicatum*'s growth on nitrogen and phosphorus in sediment in different water depth [J]. Ecology and Environment, 20(6): 1086–1091.]
- 蔡龙炎,李 颖,郑子航. 2010. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究[J]. 地球与环境, 38(2): 235–241. [Cai L Y, Li Y, Zhang Z Y. 2010. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus of lake systems in China and their impact on eutrophication [J].

- Earth and Environment*, 38(2): 235–241.]
- 陈晓玲, 张媛, 张琨, 等. 2013. 丰水期鄱阳湖水体中氮磷含量分布特征 [J]. *湖泊科学*, 25(5): 643–648. [Chen X L, Zhang Y, Zhang L, et al. 2013. Distribution characteristic of nitrogen and phosphorus in Lake Poyang during high water period [J]. *Journal of Lake Sciences*, 25(5): 643–648.]
- 陈晨, 杨桂朋, 高先池, 等. 2012. 胶州湾微表层和次表层海水中营养盐的分布特征及富营养化研究 [J]. *环境科学学报*, 32(8): 1856–1865. [Chen C, Yang G P, Gao X C, et al. 2012. Nutrients distributional characteristics and eutrophication in the sea-surface microlayer and subsurface water in the Jiaozhou Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(8): 1856–1865.]
- 丁飞飞, 黄鹤忠, 陈金凤, 等. 2010. 不同磷源及其配比对铜绿微囊藻生长和摄磷效应的影响 [J]. *水生态学杂志*, 3(3): 32–36. [Ding F F, Huang H Z, Chen J F, et al. 2010. Studies on the growth and the uptake of phosphorus of *Microcystis aeruginosa* in different ratios of inorganic phosphorous and organic phosphorous forms [J]. *Journal of Hydroecology*, 3(3): 32–36.]
- 付登高, 吴晓妮, 何锋, 等. 2015. 柴河流域不同景观类型径流氮磷含量及其计量比变化特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 5: 671–676. [Fu D G, Wu X N, He F, et al. 2015. Variation of concentrations and stoichiometric proportions of nitrogen and phosphorus in runoff with land use in Chaihe Catchment [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 5: 671–676.]
- 丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等. 2008. 不同氮磷比对藻类生长的影响 [J]. *生态环境*, 17(5): 1759–1763. [Feng M W, Wu Y H, Feng S X, et al. 2008. Effect of different N/P ratios on algal growth [J]. *Ecology and Environment*, 17(5): 1759–1763.]
- 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 1998. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价 [J]. *台湾海峡*, 17(1): 64–70. [Guo W D, Zhang X M, Yang Y P, et al. 1998. Evaluation of the degree of potential eutrophication in the coastal waters of China [J]. *Taiwan Strait*, 17(1): 64–70.]
- 郭蔚华, 罗荣祥, 张智, 等. 2006. 长江和嘉陵江交汇段营养限制因子的试验 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 29(1): 98–101. [Guo W H, Luo R X, Zhang Z, et al. 2006. Experimental study on the nutrition restrictive factors of the Changjiang and Jialing Rivers interjunction [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 29(1): 98–101.]
- 高振美, 张波, 商景阁, 等. 2012. 太湖流域小型水源性湖泊氮磷时空分布及营养状态评价 [J]. *环境污染与防治*, 34(1): 9–14. [Gao Z M, Zhang B, Gao J G, et al. 2012. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus and evaluation of trophic status of a water supply lake in Taihu basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 34(1): 9–14.]
- 胡晗华, 石岩峻, 丛威, 等. 2005. 不同氮磷水平中肋骨条藻对营养盐的吸收及光合特性 [J]. *应用与环境生物学报*, 10(6): 735–739. [Hu H H, Shi Y J, Cong W, et al. 2005. Photosynthetic characteristics and nutrient absorptin of *Skeletonema* at different nitrogen and phosphorus levels [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 10(6): 735–739.]
- 李明, 郭嘉, 刘玉杰, 等. 2013. 青藏高原湖泊细菌种群结构的研究综述 [J]. *地球环境学报*, 4(2): 1287–1300. [Li M, Guo J, Liu Y J, et al. 2013. An review on research of bacteria community structure in lakes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 4(2): 1287–1300.]
- 刘建昌, 严岩, 刘峰, 等. 2008. 基于多因子指数集成的流域面源污染风险研究 [J]. *环境科学*, 29(3): 599–606. [Liu J C, Yan Y, Liu F, et al. 2008. Risk assessment and safety evaluation using system normative indexes integration method for non-point source [J]. *Environmental Science*, 29(3): 599–606.]
- 刘浩, 潘伟然. 2008. 营养盐负荷对浮游植物水华影响的模型研究 [J]. *水科学进展*, 19(3): 345–351. [Liu H, Pan W R. 2008. Model for study on impact of external nutrient sources on the algalbloom [J]. *Advances in Water Science*, 19(3): 345–351.]
- 刘静静. 2006. 巢湖内源氮磷的形态、释放规律及控制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学. [Liu J J. 2006. Study on forms, release rules and control measure of internal phosphorus and nitrogen in Chaohu Lake [D]. Hefei: Hefei University of Technology.]
- 龙天渝, 郑敏, 郭蔚华, 等. 2007. 生态幅在重庆嘉陵江主城段营养盐限制因子中的应用 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 30(2): 81–85. [Long T Y, Zheng M, Guo W H, et al. 2007. Applying the ecological amplitude to nutrition restrictive factors of Jialing River in the city zone of Chongqing [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 30(2): 81–85.]

- 毛成贵, 余雪芳, 邵晓阳. 2010. 杭州西湖总氮、总磷周年变化与水体富营养化研究 [J]. 水生生态学杂志, 3(4): 1–6. [Mao Z C, Yu X F, Shao Z Y. 2010. Study on the annual variations of TN and TP and the eutrophication in Hangzhou West Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 3(4): 1–6.]
- 曲丽梅, 姚德, 丛丕福. 2006. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价 [J]. 环境科学, 27(2): 263–267. [Qu L M, Yao D, Cong P F. 2006. Inorganic nitrogen and phosphate and potential eutrophication assessment in Liaodong Bay [J]. *Environmental Science*, 27(2): 263–267.]
- 秦伯强. 2002. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探 [J]. 湖泊科学, 14(3): 193–202. [Qin B Q. 2002. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 14(3): 193–202.]
- 沈志良. 2002. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响 [J]. 海洋与湖沼, 33(3): 322–331. [Shen Z L. 2002. Long-term changes in nutrient structure and its influences on ecology and environment in Jiaozhou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(3): 322–331.]
- 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 2007. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响 [J]. 环境科学, 28(6): 1230–1235. [Wan L, Zhu W, Zhao L F. 2007. Effect of nitrogen and phosphorus on growth and competition of *M. aeruginosa* and *S. quadricauda* [J]. *Environmental Science*, 28(6): 1230–1235.]
- 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 2010. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性 [J]. 湖泊科学, 22(1): 1–7. [Wu F C, Jin X C, Zhang F Y, et al. 2010. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorus in the lake aquatic environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 22(1): 1–7.]
- 文世勇, 宋琍琍, 龙华, 等. 2012. 不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅 [J]. 生态学报, 32(4): 1133–1141. [Wen S Y, Song L L, Long H, et al. 2012. On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(4): 1133–1141.]
- 王保栋. 2003. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制 [J]. 应用生态学报, 14(7): 1122–1126. [Wang B D. 2003. Nutrient distributions and their limitation on phytoplankton in the Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(7): 1122–1126.]
- 王奎, 陈建芳, 金海燕, 等. 2013. 长江口及邻近海区营养盐结构与限制 [J]. 海洋学报 (中文版), 35(3): 128–136. [Wang K, Chen J F, Jin H Y, et al. 2013. Nutrient structure and limitation in Changjiang River Estuary and adjacent East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(3): 128–136.]
- 王海军, 王洪铸. 2009. 富营养化治理应放宽控氮、集中控磷 [J]. 自然科学进展, 19(6): 599–604. [Wang H J, Wang H Z. 2009. Eutrophication of governance should relax control nitrogen, centralized control phosphorus [J]. *Process in Natural Science*, 19(6): 599–604.]
- 王菁, 陈家长, 孟顺龙. 2013. 环境因素对藻类生长竞争的影响 [J]. 中国农学通报, 29(17): 52–56. [Wang J, Chen J Z, Meng S L. 2013. The effects of environmental factors on the growth and competition of algae [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(17): 52–56.]
- 王辉, 栾维新, 康敏捷, 等. 2012. 辽河流域社会经济活动的环境污染压力研究 — 以氮污染为研究对象 [J]. 生态经济, (8): 152–157. [Wang H, Luan W X, Kang M J, et al. 2012. Nitrogen pollution of social and economic activities in Liao River Basin, China [J]. *Ecological Economy*, (8): 152–157.]
- 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 2011. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响 [J]. 中国环境科学, 31(10): 1676–1683. [Xu H, Zhu G W, Qin B Q, et al. 2011. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) [J]. *China Environmental Science*, 31(10): 1676–1683.]
- 徐艳东, 魏潇, 吴兴伟, 等. 2015. 庙岛群岛南部海域海水营养盐特征和富营养化评价 [J]. 科学技术与工程, (22): 214–219. [Xu Y D, Wei X, Wu X W, et al. 2015. Characteristics of nutrients and eutrophication assessment in the southern waters of Miaodao Archipelago [J]. *Science Technology and Engineering*, (22): 214–219.]
- 郝敏, 孔范龙, 吕宪国, 等. 2014. 三江平原沟渠系统水体和底泥的养分特征及效应 [J]. 地理科学, 34(3): 358–364. [Xi M, Kong F L, Lyu X G, et al. 2014. Sanjiang plain trench system of water and sediment nutrient characteristics and effect [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 34(3): 358–364.]
- 易能, 邸攀攀, 王岩, 等. 2015. 富氧灌溉池塘中反硝化细菌丰度昼夜垂直变化特征分析 [J]. 农业工程学报, 31(15): 86–92. [Yi N, Di P P, Wang Y, et al. 2015. Diel vertical variability analysis of denitrifying bacteria abundance in oxygen-enriched irrigation pond [J]. *Transactions of the*

- Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(15): 86–92.]
- 于兴修, 马 骞, 刘前进, 等. 2011. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究 [J]. *环境科学*, 32(2): 428–436. [Yu X X, Ma Q, Liu Q J, et al. 2011. Comparative study of N, P output and eutrophication risk in runoff water in cross ridge and longitudinal ridge [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 32(2): 428–436.]
- 张丽玉. 2013. 同安湾海域近十年水环境质量状况分析与评价研究 [J]. *环境科学与管理*, 38(6): 70–73. [Zhang L Y. 2013. Analysis and evaluation on water quality of Tong'an Bay in recent decade [J]. *Environmental Science and Management*, 38(6): 70–73.]
- 张玉斌, 郑粉莉, 武 敏. 2007. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展 [J]. *水科学进展*, 18(1): 123–132. [Zhang Y B, Zheng F L, Wu M. 2007. Research progresses in agricultural non-point source pollution caused by soil erosion [J]. *Advance in Water Science*, 18(1): 123–132.]
- 朱 鹏, 陈红菊. 2014. 淡水渔业水域生态环境修复技术研究现状 [J]. *中国水产*, (8): 69–72. [Zhu P, Chen H J. 2014. Research status on environmental remediation in freshwater fishing waters [J]. *China Fisheries*, (8): 69–72.]
- 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 2010. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 33(3): 92–98. [Zhao Y H, Deng X Z, Zhan J Y, et al. 2010. Lake eutrophication control strategy and progress of our country [J]. *Environmental Science & Technology*, 33 (3): 92–98.]
- 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 2009. 湖泊底泥疏浚环境效应: II. 内源氮释放控制作用 [J]. *湖泊科学*, 21(3): 335–344. [Zhong J C, Liu G F, Fan C X, et al. 2009. Environmental effect of sediment dredging in lake: II. the role of sediment dredging in reducing internal nitrogen release [J]. *Journal of Lake Sciences*, 21(3): 335–344.]
- Baulch H M. 2013. Asking the right questions about nutrient control in aquatic ecosystems [J]. *Environmental Science & Technology*, 47(3): 1188–1189.
- Caron D A, Lim E L, Sanders R W, et al. 2000. Responses of bacterioplankton and phytoplankton to organic carbon and inorganic nutrient additions in contrasting oceanic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 22(2): 175–184.
- Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. 2009. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 323(5917): 1014–1015.
- Diaz F, Raimbault P, Boudjellal B, et al. 2001. Early spring phosphorus limitation of primary productivity in a NW Mediterranean coastal zone (Gulf of Lions) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 211: 51–62.
- Howarth R W, Marino R. 2006. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades [J]. *Limnology and Oceanography*, 51(1): 364–376.
- Keirn M A, Brezonik P L. 1971. Nitrogen fixation by bacteria in Lake Mize, Florida, and in some lacustrine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 16: 720–731.
- Kim M, Gilley J E. 2008. Artificial neural network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2): 268–275.
- Mehner T, Diekmann M, Gonsiorczyk T, et al. 2008. Rapid recovery from eutrophication of a stratified lake by disruption of internal nutrient load [J]. *Ecosystems*, 11(7): 1142–1156.
- Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(32): 11254–11258.
- Schmidt I, van Spanning R J M, Jetten M S M. 2004. Denitrification and ammonia oxidation by *Nitrosomonas europaea* wild-type, and NirK- and NirB-deficient mutants [J]. *Microbiology*, 150(12): 4107–4114.
- Xin L, Hong-ying H, Ke G, et al. 2010. Growth and nutrient removal properties of a freshwater microalga *Scenedesmus*. LX1 under different kinds of nitrogen sources [J]. *Ecological Engineering*, 36(4): 379–381.
- Wang H J, Wang H Z. 2009. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement [J]. *Progress in Natural Science*, 19(10): 1445–1451.