

环境因素对浮游植物生长及群落结构的影响

马腾龙, 万 亿, 吴萍娟, 王健军

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年1月30日; 录用日期: 2024年3月15日; 发布日期: 2024年6月14日

摘 要

浮游植物作为水生生态系统重要的初级生产者, 承担着水生生态系统的物质循环、能量流动和信息传递等功能, 对水体中的营养循环、生物多样性和生态平衡有着重要的影响。文章基于国内外研究现状从物理、化学、生物三方面, 详述了水温、光照、透明度、水动力、气候变化、pH、营养盐、生物竞争与捕食等因素对浮游植物生长及群落结构的影响过程和机理, 并在此基础上提出了该领域当前研究存在的一些问题以及未来的研究前景。探讨环境因子对浮游植物生长及群落结构的影响, 有助于为水生态环境保护提供新思路, 同时对水体环境中物质循环、生物多样性和生态平衡具有重要意义。

关键词

水温, 光照, 营养盐, 浮游植物

Effects of Environmental Factors on Phytoplankton Growth and Community Structure

Tenglong Ma, Yi Wan, Pingjuan Wu, Jianjun Wang

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Jan. 30th, 2024; accepted: Mar. 15th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

As an important primary producer in aquatic ecosystems, phytoplankton assumes the functions of the material cycle, energy flow, and information transfer in aquatic ecosystems, and has an important impact on the nutrient cycle, biodiversity, and ecological balance in water bodies. Based on the current research situation at home and abroad, the article describes in detail the process and mechanism of the influence of water temperature, light, transparency, hydrodynamics, cli-

mate change, pH, nutrient salts, biological competition, and predation on the phytoplankton growth and community structure in terms of physical, chemical and biological aspects. And based on this, it puts forward some problems in the current research in this field as well as the prospect of the future research. Exploring the effects of environmental factors on phytoplankton growth and community structure can help to provide new ideas for water ecological protection, and at the same time, it is of great significance to the material cycle, biodiversity and ecological balance in the water environment.

Keywords

Water Temperature, Light, Nutrients, Phytoplankton

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

浮游植物是指水中浮游生活的微小植物，作为水生生态系统重要的初级生产者，是水生食物网的基本环节，是水生生态系统中水生生物的重要组成成分，可为其他水生生物提供溶解氧，也是浮游动物重要的食物来源，承担着水生生态系统的物质循环、能量流动和信息传递等功能[1]。

同时学者们还发现，浮游植物对外界的物理、化学环境变化非常敏感，易受到环境因素的影响[2]，包括水温、光照、水体透明度、水动力、气候变化、pH、营养盐和生物因素等。与其他水生生物相比，浮游植物结构简单、生命周期更短、生长速度更快，样品易于采集，对环境波动的敏感性更高[3]。因此，浮游植物的变化可以迅速且灵敏地反应出水质的变化，在评价水质和水生生态系统健康等方面具有独特优势和重要应用[4]。

当前，水体富营养化及水环境恶化现象时有发生，如何通过调控相关环境因素，进而影响水环境中浮游植物生长及群落结构，从而改善水体环境，亟待全面、深入研究。因此，本文总结了水温、光照、透明度、水动力、气候、pH、营养盐、生物因素对浮游植物生长特征和群落结构的影响过程和机理。综述有利于了解相关环境因子的变化对浮游植物生长及群落结构的影响，有助于为水生态环境保护提供新思路，对水体中的营养循环、生物多样性和生态平衡有着重要意义。

2. 物理因素

2.1. 水温

温度是酶促反应的主控因素，在酶促反应中，温度的变化往往影响着酶的活性，进而影响反应速率[5]。因此，在水生生态系统中，水温通过影响浮游植物的呼吸作用和光合作用等酶促反应强度，进而影响浮游植物的生长以及群落结构的变化[6]。研究发现，浮游植物生长过程中，在适宜温度范围内，有利于其生长，然而，当水温过高或过低时，均会抑制浮游植物的生长。这是因为当水温升高或降低到一定阈值后，酶的活性将会受到抑制，光合作用减弱，从而影响浮游植物的生长[7]。根据 Vant'Hoff 定律，在一定温度范围内，水温每上升 10℃，代谢作用速率增加 2~3 倍，可知水温升高的同时也会导致代谢速度加快，呼吸作用增加，而水温较低则会减缓代谢和呼吸作用[8]。因此，只有在适宜的水温才能够维持浮游植物正常的生长代谢活动。

水温对浮游植物的物种组成和群落多样性有着重要影响,不同种类的浮游植物对水温的适应能力不同[9]。例如,在 40℃ 的高水温下,其他种类的浮游植物可能受到抑制,而蓝藻却能生长。硅藻则属于耐低温藻种,在其他环境条件适宜的情况下,即使水温仅有 10℃ 也能正常生长[10]。因此,水温变化可能导致某些种类的增加或减少,进而对浮游植物的物种组成和群落结构产生影响。水温对浮游植物的群落结构和相对丰度也有影响。一些种类的浮游植物可能在适宜的水温下占据优势地位,形成较高的相对丰度。而在极端的水温条件下,某些种类可能会减少或消失,导致群落结构的改变。如相关研究发现,水温较低时,浮游植物群落中种类数量占比最大的往往是硅藻门,而水温升高后,往往为绿藻门和蓝藻门的藻类占主导优势[11]。与此同时,水温是季节变化的一个重要驱动因素。季节变化会导致水温上升或下降,进而影响浮游植物的生长和群落结构。春季和夏季水温升高通常会促进浮游植物的生长和繁殖,而秋季和冬季水温下降则可能导致浮游植物的减少或休眠[12]。

2.2. 光照

浮游植物对光照有着必不可少的依赖,主要表现在需利用光能进行光合作用,将二氧化碳和水转化为有机物质和氧气,合成生命活动所必需的相关元素,影响浮游植物的生长与繁殖。在水体中,光照的强度、光照周期和光质以及蕴藏的热能都会影响浮游植物的生长与群落结构的变化。

光照强度的变化会直接影响浮游植物的生长速率。在光照充足的条件下,浮游植物能够进行充分的光合作用,从而促进其生长和繁殖。然而,过高或过低的光照强度都会对浮游植物的生长产生负面影响。在一定的光照条件下,光照强度越强,藻类的光合速率进行越快,从而可以积累更多用于生长与繁殖的营养物质,但这个光照强度存在一个饱和范围,即光饱和强度,若超过这个饱和值,继续增大光照强度,藻类的光合作用并不会再加快,甚至出现下降以及停止,即光抑制现象[13]。其原因是由于过高的光照强度会导致光合作用速率超过消耗速率,产生过多的能量,这会导致光合产物的积累,造成氧化损伤和生理损害。同时,在低光照强度下,浮游植物的光合作用速率会受到限制,生长速率较低。研究还发现,不同的藻类对光照的适应强度不同,相同光照条件下不同藻类之间的竞争能力也有所差异。例如,小球藻属于低光强耐受藻,栅藻、色球藻和隐藻则属于高光强耐受藻[14]。蓝藻可以利用其它藻类所不能利用的绿、黄和橙色部分的(500~600 nm),从而比其它藻类具有更宽的光吸收波段,能更有效地利用水下光的有效光辐射并可以生长在仅有绿光的环境中[15]。

光照周期是指光照和黑暗交替的时间间隔,对浮游植物的生理过程和生物节律具有重要影响。光照周期的改变会影响浮游植物的生长、代谢和繁殖。光照提供了浮游植物进行光合作用的条件,而黑暗期则是进行呼吸作用的时间。光照周期的改变会影响光合作用和呼吸作用的比例,从而影响浮游植物的生长和能量代谢。已有研究表明,改变微藻的光照周期,将会导致微藻的叶绿素和多糖产量不同[16]。光照周期的变化还可以影响浮游植物在生态位上的分配。在不同光照周期下,浮游植物的生长速率和光合效率可能会有差异,导致不同物种在光照条件下的竞争关系发生变化。这可能导致物种组成和丰度的变化,最终影响群落的结构[17]。

光质对浮游植物的光能利用效率起着重要影响。不同波长的光对浮游植物的光合作用效果不同。研究发现,蓝光和红光对浮游植物的光合作用效率较高,而绿光的利用效率较低[18]。光质对浮游植物的生理和行为过程起着调节作用。例如,蓝光调节绿藻的叶绿素合成的步骤,在相同光照强度下,红光下生长的绿藻与蓝光下生长的同种绿藻相比,蓝光下绿藻的叶绿素含量更多。在红光下伞藻细胞的光合速率逐渐降低,而加入一些蓝光或转到蓝光下后光合速率便会迅速恢复[19]。这些变化均表明光质会影响浮游植物的生长速率和营养吸收能力,进而影响群落的结构和物种丰度。

光照不仅是浮游植物的能量来源,还是水体蕴藏热能。研究发现,水温相对光照的变化具有一定滞

后性和周期性, 往往光照升高或降低, 两个月后水温也会出现相同的变化趋势, 相关学者采用光照-水温的动态模型验证了这一发现[20]。因此, 光照可通过提高水温的因素, 进而间接对浮游植物生长及群落结构产生影响。

2.3. 透明度

水体的透明度是指水中物质的浊度和悬浮颗粒物(SS)的含量, 水体的透明度直接影响光线的穿透深度和强度, 当水体透明度很低, 间接导致浮游植物的光合作用受阻, 不利于藻类生长。相反, 透明度的升高, 能够使更多的光线透过水体到达较深的水层, 提供充足的光能供浮游植物进行光合作用, 从而有利于浮游植物的生长, 浮游植物丰度也随之上升[21]。同时, 已有研究发现透明度与浮游植物及其分泌物关系密切, 当水体中浮游植物的增多时, 水体的透明度会因为浮游植物的增多, 导致透明度的下降。因此, 一般认为浮游植物密度越大, 水体SD就越低, 在 $10^6 \sim 10^7$ 数量级范围内透明度一般大于1 m。在 $10^8 \sim 10^9$ 数量级范围内, 透明度一般小于1.5 m。在 10^{10} 这一数量级, 透明度绝大多数都小于1 m [22]。

然而, 溶解性有机物、悬浮物和浮游植物都可以影响水体透明度[23]。从水体中的悬浮颗粒物和溶解有机物可以为浮游植物提供养分的角度来看, 透明度高的水体通常意味着少量的悬浮颗粒物和溶解有机物, 这可能导致养分限制, 影响浮游植物的生长。相反, 透明度低的水体意味着较高的悬浮颗粒物和溶解有机物含量, 高营养盐浓度水平, 这可能为浮游植物提供更多的养分, 促进其生长。

透明度对浮游植物之间的竞争关系和生境选择起到重要作用。透明度高的水体有利于光线的穿透和均匀分布, 使得浮游植物能够在较深的水层进行生长。这可能导致浮游植物之间的竞争增加, 尤其是在养分有限的情况下。透明度低的水体则可能导致浮游植物在较浅的水层聚集, 形成浮游植物的聚集区或藻华, 这可能促进某些浮游植物物种的生长和优势。

综上所述, 水体的透明度对浮游植物的生长和群落结构产生重要影响。透明度高的水体有利于光合作用和养分利用, 但也可能增加浮游植物之间的竞争。透明度低的水体可能导致光能不足和养分过剩, 影响浮游植物的生长和群落结构。

2.4. 水动力

水动力是影响浮游植物生长和群落结构的重要因素。水动力指的是水体中的流动和运动, 水动力可以直接或间接地影响浮游植物的分布、生长速率和物种组成, 从而塑造浮游植物群落结构。

研究发现, 水动力对浮游植物生长具有重要作用, 直接作用是由于风浪和潮流的运动将水面内的藻吹向岸边, 在水岸边形成水华现象。而间接作用, 是由于水动力的作用, 导致养分从深层沉积物中向上输送到水体表层, 提供养分供浮游植物生长[24]。同时也可以减少养分的局部积累, 防止养分过度浓缩导致的生物富营养化问题。其次, 水体运动可以改变光照的强度和分布。水体运动可以使光线更加均匀地分布在水体中, 避免光线的局部聚集或阻塞, 有利于浮游植物的光合作用和生长。水动力还可以改变浮游植物的生境条件。例如, 水体流动可以改变水温、溶解氧和pH值等环境因素, 对浮游植物的生长和代谢活动产生影响。与此同时, 流动的水体还可以改变浮游植物的微观环境, 例如悬浮颗粒物的浓度和大小, 影响浮游植物的营养吸收和生理过程。

2.5. 气候变化

气候变化多指气温的升高导致水温的升高, 阴天所带来的光照不足, 以及雨天对水域的营养盐的增加、风力变化和海洋酸化等, 这些变化直接或间接地影响浮游植物的分布、生长速率和物种组成[25] [26]。

全球变暖导致水温升高, 对浮游植物的生长产生直接影响是温度升高可以促进浮游植物的代谢和生长速率, 加快养分吸收和生物化学反应速率, 从而增加生物量。间接影响是气候变暖导致沉积物附近的

溶解氧降低促使沉积物中营养盐释放到水体中,进而促进浮游植物的生长。然而,过高的温度可能会损害浮游植物的生理功能,甚至导致死亡。此外,全球变暖还可能导致云量和大气透明度的变化,影响光照的强度和质量。过强或过弱的光照都可能对浮游植物的光合作用产生负面影响,影响其生长和群落结构。例如太阳辐射的减弱,将会导致水下光照减少,进而加速沉水植物的死亡,从而导致水下营养物质向上释放,导致浮游植物进一步生长,而浮游植物的生长则会进一步减弱水下光照,加剧这种现象的恶化[27]。气候变化还包括降水对浮游植物生长的影响。适度的降水可以提供养分供浮游植物利用,促进其生长。然而,过多或过少的降水都可能对浮游植物产生负面影响。过多的降水可能导致水体混浊、光照不足和养分稀释,抑制浮游植物的生长。而过少的降水可能导致水体营养浓度过高,引发富营养化问题。风力的变化对浮游植物的生长同样起着重要作用,如风对浮游植物运输的影响,包括垂直迁移和水平漂移。风速降低会延长水体分层时间,提高水体稳定性,造成底层缺氧,加大沉积物营养盐的释放,促进上层浮游植物的生长。与此同时,台风可以影响沉积物的再悬浮,并导致养分释放到上覆水中,成为浮游植物生长和繁殖的养分来源[28]。全球变暖大气中二氧化碳浓度升高,一部分二氧化碳被吸收到海水中形成碳酸,导致海洋酸化。海水酸化不仅会导致钙化生物合成碳酸钙外壳受阻,还会加速已生成外壳的溶解。因此,对于壳类浮游植物,海洋酸化可能导致其骨骼矿化困难,影响其生存和繁殖[29]。由于浮游植物是海洋食物链的基础,气候变化对浮游植物的影响将直接或间接传导至浮游动物、鱼类等其他海洋生物[30],从而对生态系统引起连锁反应。

3. 化学因素

3.1. pH

水体中 pH 主要从两方面对浮游植物的生长产生影响,一方面是因为在水体的酸碱性与水中 CO_2 的溶解量以及碳酸盐的平衡密切相关[31]。在碱性环境下,水体中 CO_2 的溶解量增加,进而影响浮游植物生长所需碳物质,因此这使得藻在弱碱性的水域中往往比弱酸性条件下生长的较好。另一方面是因为水体酸碱环境的不同,对藻细胞产生的影响。绝大部分藻,无法在酸性较强或碱性较强的环境下生长,只有在适宜的 pH 环境下,藻细胞才能正常的进行生长繁殖。同时,不同种类的藻对水中 CO_2 的吸收速率不同,适宜的 pH 环境范围也不同。这便导致不同的藻类有着自己所特有的最佳酸碱环境[32]。

3.2. 营养盐

营养盐是浮游植物生长繁殖所必需的营养元素。氮、磷作为浮游植物最重要的营养元素,对浮游植物的生长和代谢具有关键作用[33]。氮源通常以无机形式存在,如硝酸盐(NO_3^-)和铵盐(NH_4^+),磷源通常以无机磷酸盐的形式存在,如磷酸二氢根离子(H_2PO_4^-)。研究发现,氮磷形态影响藻类对氮、磷的吸收利用速率,与此同时,即使是相同营养元素在相同形态、浓度下,不同种类的藻类对氮磷的吸收利用速率也有所不同。一般认为,相较于 NO_3^- -N,浮游植物优先利用 NH_4^+ -N,且 NH_4^+ -N 存在时可能会抑制浮游植物吸 NO_3^- -N。水体 NH_4^+ -N 浓度的增加有利于无固氮能力蓝藻的增殖,而 NO_3^- -N 浓度的增加会促进硅藻的生长。高浓度 NH_4^+ -N 对某些藻类具有毒害作用[34]。磷对 DNA、RNA 和 ATP 等生物分子的合成至关重要,因此,磷源的浓度和比例也会影响浮游植物的繁殖能力和物种组成[35]。其次,浮游植物不仅仅是受氮、磷等大量元素的影响,微量营养元素如钾、钙、镁等微量元素对浮游植物的生长和代谢也具有重要作用。钾(K^+)参与调节细胞内电解质平衡,钙(Ca^{2+})和镁(Mg^{2+})参与叶绿素的合成和光合作用过程。

已有学者对限制浮游植物生长营养盐进行探究,研究发现,限制浮游植物生长的主要为氮、磷两大元素,其中淡水湖泊水域多数限制因素主要为磷,而在海洋水域中多数限制因素主要为氮。但同时也发现,氮、磷的限制性是有空间变化的,甚至在同一海区也有氮、磷营养盐限制的季节性交替变化[36]。如

研究发现舟山渔场海域的浮游植物呈现同一海域不同空间下氮、磷的不同限制因素, 以及香港近岸海域的浮游植物生长呈现春季氮、磷协同限制、夏季磷限制、秋季氮限制的季节性交替变化[37] [38]。

4. 生物因素

生物因素对浮游植物的生长和群落结构产生重要影响。浮游植物群落是由多个物种组成的复杂生态系统, 生物因素主要包括竞争、摄食等相互作用。这些因素可以直接或间接地影响浮游植物的生长、物种组成和群落结构[39]。

从种间竞争的角度来看, 当光线有限时, 浮游植物之间会发生光合竞争, 导致一些物种在光照较强的表层水体中占据优势地位, 而其他物种则在较深的水体中生长。其次, 不同种类的浮游植物对营养盐的偏好性不同, 而水体中的营养盐资源是有限的, 因此会发生营养竞争。一些浮游植物对特定营养盐具有较高的亲和力, 例如以颤藻为代表的多数蓝藻种均具有一定的固氮能力, 故而在水体氮素浓度较低时, 仍能够正常生长, 从而占据竞争优势, 形成相对丰度较高的群落[40]。同时, 浮游植物在水体中需要合适的空间生长, 当浮游植物的生长过程中产生较多的细胞和胞外物质时, 会形成团块或胶状物, 占据一定的空间。这种空间竞争可能导致其他物种被排除在外, 影响群落的物种组成。从食物链的角度来看, 浮游植物作为水生生态中的生产者, 浮游动物、浮游动物幼体和某些鱼类对浮游植物的摄食作用, 势必会影响浮游植物的生长, 从而影响浮游植物多样性。因此, 一定数量浮游动物的存在。浮游动物的存在可以限制浮游植物的生长和数量, 形成捕食压力, 对于富营养化的控制十分有效。同时研究发现, 浮游动物对浮游植物的摄食具有选择性, 其选择性受到浮游植物的种类、密度、粒径大小等其他因素的影响, 正因为浮游动物对浮游植物的选择性摄食改变了浮游植物的种类组成和群落结构, 进而改变了整个生态系统的物质循环和能量流动[41]。

5. 结论与展望

5.1. 结论

本文从物理、化学、生物三个方面探讨环境因素对浮游植物生长及群落结构的影响。结果表明, 水温通过控制浮游植物中酶促反应的发生速率, 光照影响浮游植物的光合作用, 水体透明度影响光线的穿透深度和强度, 水体动力影响浮游植物及营养盐的分布, 气候变化所带来的水温、营养盐、风力和海洋酸化等变化, 水体 pH 环境通过影响浮游植物的生长繁殖, 营养盐为浮游植物提供其生命活动所必需的营养元素以及浮游生物之间的竞争与捕食关系等因素, 均会直接或间接对浮游植物的生长及群落结构产生影响。

5.2. 展望

当前, 如何区分各个影响因子之间的净作用十分重要。与此同时, 往往对浮游植物的影响绝不仅仅是单一因素的作用, 很可能是多个因素共同作用的结果。然而, 已有的研究多侧重于水温、光照、pH、氮、磷等单一影响因素的研究, 未充分考虑到, 各环境因素之间的相互作用。因此, 在今后的研究中, 我们不仅要区分单个环境因子的作用, 更要关注多环境因子之间对浮游植物生长及群落结构影响的关联性。

参考文献

- [1] 刘晓真, 李园园, 马甜莹. 丹江口水库浮游植物群落结构特征的研究进展[J]. 黑龙江水产, 2023, 42(5): 327-330.
- [2] Huang, G.J., Li, Q.H., Chen, C., et al. (2015) Phytoplankton Functional Groups and Their Spatial and Temporal Distribution Characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 5573-5584. <https://doi.org/10.5846/stxb201312253027>

- [3] 张玮, 王为东, 王丽卿, 等. 嘉兴石臼漾湿地冬季浮游植物群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2431-2437.
- [4] 王远飞, 周存通, 赵增辉, 等. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4010-4022.
- [5] 杨东方, 陈生涛, 胡均, 等. 光照、水温 and 营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. 海洋环境科学, 2007(3): 201-207.
- [6] 李伟, 李鲁丹, 李欢, 等. 长江三源浮游植物群落特征差异与环境因子关系[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 39-45.
- [7] 张辉, 彭宇琼, 邹贤妮, 等. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 380-392.
- [8] Zhang, Z.Y., Zheng, D.W., Pan, Y.Y., et al. (2021) The Scientific Problem and Improvement of the Concepts of Accumulated Temperature and Heat Resource. *Chinese Journal of Agrometeorology*, **42**, 686-692.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.10.011>
- [9] 赵秀侠, 卢文轩, 李静, 等. 青龙湖冬季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(2): 83-90.
- [10] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 45-50.
- [11] 田永强, 俞超超, 王磊, 等. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2559-2565.
- [12] 胡胜华, 高云霓, 张世羊, 等. 武汉月湖水体营养物质的分布与硅藻的生态指示[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 856-864.
- [13] 王菁, 陈家长, 孟顺龙. 环境因素对藻类生长竞争的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 52-56.
- [14] 龚川, 贡丹丹, 刘德富, 等. 不同光照强度下香溪河浮游植物演替过程研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1214-1224.
- [15] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005(3): 589-595.
- [16] 俞秋燕, 钱俊霖, 刘青, 等. 光周期对微绿球藻生长和物质生产的影响[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(3): 56-64.
- [17] Shatwell, T., Nicklisch, A. and Köhler, J. (2012) Temperature and Photoperiod Effects on Phytoplankton Growing under Simulated Mixed Layer Light Fluctuations. *Limnology and Oceanography*, **57**, 541-553.
<https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.2.0541>
- [18] 刘晶, 刘文清, 赵南京, 等. 浮游植物在不同光质和光强激发下的叶绿素荧光特性[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 290-297.
- [19] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1217-1234.
- [20] 杨东方, 高振会, 王培刚, 等. 光照时间和水温对浮游植物生长影响的初步剖析——以胶州湾为例[J]. 海洋科学, 2002(12): 18-22.
- [21] 王晓臣, 杨兴中, 吕彬彬, 等. 黄河下游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9819-9821.
- [22] 矫晓阳. 透明度作为赤潮预警监测参数的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2001(1): 27-31.
- [23] 张兰婷. 富营养化蓝藻水华发生的主要成因与机制研究综述[J]. 水利发展研究, 2019, 19(5): 28-33.
- [24] Hu, Y., Zhang, Y., Peng, Z., et al. (2023) Hydrodynamic Effects on the Ability of Bottom Traps to Capture Nutrient-Rich Sediments in Shallow Eutrophic Lakes. *Journal of Hydrology*, **618**, Article ID: 129245.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129245>
- [25] 刘雪梅, 章光新. 气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 316-326.
- [26] Hyun, B., Kim, J.M., Jang, P.G., et al. (2020) The Effects of Ocean Acidification and Warming on Growth of a Natural Community of Coastal Phytoplankton. *Journal of Marine Science and Engineering*, **8**, 821.
<https://doi.org/10.3390/jmse8100821>
- [27] 王锦旗, 宋玉芝, 薛艳. 气候变化诱导水体富营养化研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 145-155.
- [28] 施文卿, 秦伯强. 气候变化下湖库蓝藻水华发展趋势及防控对策[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 987-996.
- [29] 郭子豪, 李灿苹, 陈凤英, 等. 天然气水合物分解的甲烷对海洋生物的影响[J]. 现代地质, 2023, 37(1): 138-152.
- [30] 田洪阵, 刘沁萍, 杨萌萌. 基于 2002-2018 年 MODIS 数据的黄海叶绿素 a 时空变化研究[J]. 海洋通报, 2020,

- 39(1): 101-110.
- [31] 韦丽琼, 郭芳, 姜光辉. 广西武鸣盆地岩溶泉口浮游生物群落对水环境变化的响应[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 777-790.
- [32] 苏发文, 高鹏程, 来琦芳, 等. 铜绿微囊藻和小球藻对水环境 pH 的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(6): 1380-1388.
- [33] 徐进, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3049-3057.
- [34] 许海, 陈丹, 陈洁, 等. 氮磷形态与浓度对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2560-2567.
- [35] 金杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(2): 253-261.
- [36] 王保栋, 战闰, 藏家业. 黄海、东海浮游植物生长的营养盐限制性因素初探[J]. 海洋学报(中文版), 2003(S2): 190-195.
- [37] 张宾, 章飞军, 郭远明, 等. 舟山渔场海域春夏季氮磷分布及其对浮游植物的限制[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, 30(3): 185-189.
- [38] 宋秀贤, 俞志明, 殷克东, 等. 香港近岸海域营养盐结构特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 846-852.
- [39] 白海锋, 王怡睿, 宋进喜, 等. 渭河陕西段浮游植物群落结构时空变化与影响因子分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 3290-3301.
- [40] 李伟. 养分资源脉冲供给对几种微藻种间竞争的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2290-2296.
- [41] 王小冬, 孙军, 刘东艳, 等. 海洋中型浮游动物的选择性摄食对浮游植物群落控制[J]. 海洋科学进展, 2005(4): 524-535.