

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

水藻暴发的影响因素定量化研究初步

张卓^{1,2}, 宋志尧^{1,2}, 黄昌春¹, 俞肇元¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要: 采用数值和理论相结合的方法, 通过水藻扩散模型定量研究了沉降、扩散、生长、死亡、水深等因素对水藻生长状态的影响, 提出初步判断水藻生长状态的判别标准. 针对以往研究中对于水藻生长率、垂向紊动扩散系数垂向均匀假设过于简化, 与实际情况不符的问题, 本文分别研究了考虑光照条件下、营养盐限制条件下以及垂向扩散系数非均匀条件下, 对于水藻生长状态以及水藻暴发判别标准的影响, 结果发现光照引起的“遮蔽效应”, 营养盐的“通量限制”都会促使水藻由暴发或衰减状态向平衡状态发展. 垂向扩散系数的分布形态对水藻生长状态影响大小受 l/H (真光层深度和水深比) 的影响, 只有当水深较大时, 即 l/H 较小时, 应考虑垂直扩散系数垂向分布不均的影响. 因此对于水深较小的宽浅湖泊, 垂直扩散系数的形态变化对水藻生长状态的影响不明显.

关键词: 水藻暴发; 水藻扩散模型; 垂向紊动扩散系数; 水藻数量; 真光层

中图分类号: X524; X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)07-2603-08

Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom

ZHANG Zhuo^{1,2}, SONG Zhi-yao^{1,2}, HUANG Chang-chun¹, YU Zhao-yuan¹

(1. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: This study investigated the effect quantitatively on phytoplankton population by various factors such as sinking velocity, diffusivity, growth, mortality and water depth, through both numerically and theoretical methods, then proposed an initial judgment criterion for estimating phytoplankton population development. To the conventional simplification about even growth rate and vertical turbulent diffusivity, which is not consistent with the fact, this study investigated the influence by the asymmetric growth rate, as a result of light attenuation and nutrient limit, and uneven vertical turbulent diffusivity. It was shown that the ‘shade effect’ by light attenuation and nutrient flux limit both led. phytoplankton population from blooming or collapsing to quasi-steady condition. The uneven vertical turbulent diffusivity influenced the phytoplankton population by l/H which is upper euphotic layer depth by water depth. The influence is not apparent only if the water depth is large enough while l/H is small. Hence even vertical turbulent diffusivity can be utilized approximately in very shallow lakes.

Key words: algae blooms; algae diffusion model; vertical turbulent diffusivity; phytoplankton population; euphotic layer

在过去 20 多年中, 由于产业结构不合理, 水体环境污染造成的水体富营养化日益严重^[1]. 由富营养化引起的蓝藻水华现已成为国内外普遍关注的环境问题. 此外, 水藻作为水生生态系统中的初级生产力, 对生态系统的影响是巨大的, 研究水藻暴发的影响因素对地区经济发展和环境保护有十分重要的意义.

一般认为, 水藻暴发的影响因素包括两大类: 物理因素和生物因素. 物理因素主要是水动力条件引起的水藻迁移、沉降、扩散、水底深度等, 生物因素主要是影响水藻的生长率和死亡率的因素, 如光照、营养盐、水温等. 此外, 各个因素之间也会相互影响, 比如水体透明度的高低, 影响水藻对阳光的吸收从而影响到生长率, 水体的扩散系数也受到水温、盐度等分层效应的影响^[2~4].

虽然水藻的数量在一段时间内保持相对稳定,

但却是高度动态的^[5]. 当环境条件发生变化时, 原有的动态平衡被打破, 水藻数量会在短时间内迅速增加到很高的值, 这就是水藻暴发. 相比于统计学模型, 动力学模型更能反映水藻对于物理环境变化的生态响应机制, 因此得到了较多的应用. Riley 等^[6]采用垂向输运动力模型研究准平衡态下水藻的分布, Di Toro 等^[7]和 Schnor 等^[8]基于动力学模型, 提出求解这些问题的特征值方法. 基于 Sverdrup 经典临界深度模型, Huisman 等^[9]采用数值方法研究了混合层深度和紊动扩散系数对不同水体环境下水藻暴发起的作用. Wong 等^[10]采用数值模型, 提出了评判水藻暴发条件和类型的指标, 发展预报近海域水

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41201325); 江苏高校优势学科建设工程项目(1411109012)

作者简介: 张卓(1981~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为河口湖泊水动力及生态环境过程, E-mail: mercury1214@126.com

藻暴发的方法,在香港附近海域的应用中取得了很好的效果. 另外,还有[11~15]等文献均采用了数值模拟的方法对水藻的生态过程进行了研究.

目前采用动力学模型研究水藻暴发问题虽然有自己的优势,但还存在一些问题,首先是对水藻暴发多停留在“有哪些影响因素”、“这些因素怎样影响水藻生长”这类定性研究上^[16~19],缺乏类似“这种水体条件到底会不会引起水藻暴发”这类问题的定量研究;其次是有些参数的假设过于简化,如增长率、扩散系数沿水深常数假定,营养盐无限制假定等,这可能会使结果和实际情况产生一定偏差. 本研究针对这两个问题,应用理论解和数值模拟相结合的方法,提出改进后的水藻暴发影响因素和评判方法,随后讨论了三大环境影响因素:光照、营养盐、垂向扩散对水藻生长暴发的影响.

1 研究方法

1.1 垂向扩散动力学模型

本文采用 Riley 提出的 2 层模型来作为研究工具. 该模型将一段水柱内水藻含量作为研究对象,包含了扩散、沉降等物理作用和生长、死亡等生物生理机制,具体形式如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} + pc \quad (1)$$

$$p = \mu \quad (0 \leq z \leq l)$$

和

$$p = -d \quad (l < z \leq H)$$

式中, c 表示水柱内单位体积的水藻浓度, E 表示垂向紊动扩散系数,简称扩散系数, v 是水藻的沉降速度, l 是真光层深度, H 是总水深.

在水面和水底水藻浓度满足无通量边界条件:

$$vc - E \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (z = H, z = 0) \quad (2)$$

1.2 垂向扩散动力学模型的理论解

Di Toro 等^[7]曾给出式(1)和式(2)这个定解问题在水深无穷大即 $H \rightarrow \infty$ 时的渐近解. Wong 等^[10]采用同样的方法得到有限水深情况下的解,但他假定底面边界水藻浓度为 0,在 H 较小时不符合实际,因此本研究对此进行了改进,最终得到下面渐近解:

$$c = Ke^{az}(\beta \cos \beta z + a \sin \beta z) \cdot e^{kt} \quad z \leq l \quad (3)$$

$$c = \frac{Ke^{az}}{2b} \{ [(a+b)\beta \cos \beta l + (ab-\beta^2)\sin \beta l]e^{b(z-l)} + [(b-a)\beta \cos \beta l + (ab+\beta^2)\sin \beta l]e^{-b(z-l)} \} e^{kt}$$

$$l < z \leq H$$

及本征条件:

$$\tan \beta l = \frac{\beta(a+b) + \phi \beta(b-a)e^{-2b(H-l)}}{(\beta^2 - ab) - \phi(\beta^2 + ab)e^{-2b(H-l)}},$$

$$\phi = \frac{a-b}{a+b} \quad (4)$$

式中, k 是净增长率, K 是由水藻初始含量决定的常数.

$$a = \frac{v}{2E}, \quad b = \sqrt{\frac{v^2}{4E} + \frac{(d+k)}{E}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{(\mu-k)}{E} - \frac{v^2}{4E^2}}$$

使用该理论解的关键就是通过本征条件[式(4)]求得净增长率 k , 当 $k > 0$ 时候, 水藻含量呈增长趋势, 当 $k < 0$ 时, 水藻含量呈减少趋势, 当 $k = 0$ 时, 水藻含量趋于稳定, 处于平衡状态. 可以看到, k 的值取决于 E 、 v 、 μ 、 d 以及 l 、 H , 因此在一定的环境条件下, 水藻的生长状况: 增长, 衰减, 稳定, 应该是可以确定的. 但式(4)确定的 k 值并非唯一, 在实际情况下, k 只可能有一个, 因此采用该理论解需要对解进行筛选, 找到有唯一具有物理意义的解. 为了验证该理论解的准确性, 选取 Di Toro 等^[7]曾采用的较浅湖泊 Onondaga 湖(最深 20 m)中不同深度(分别是水面, 水下 3、6、12 m)300 d 内水藻含量随时间变化和文中公式计算结果对比如图 1 所示, 可以看到文中公式能正确反映水藻生长暴发过程. 因此文中公式可以为下面的数值解提供分析验证.

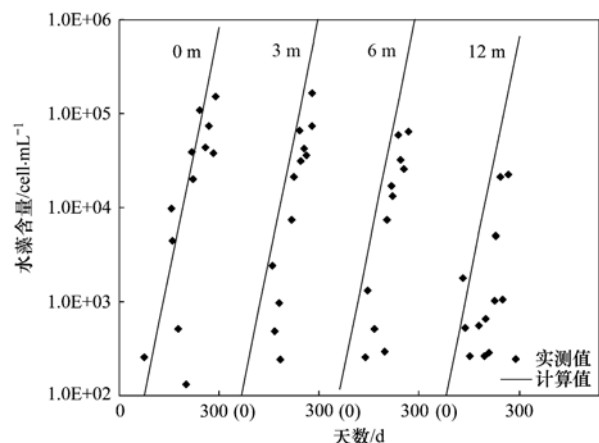


图 1 Onondaga 湖的实测结果和公式(3)计算值比较

Fig. 1 Onondaga Lake phytoplankton biomass measurements and computed result from formula (3)

1.3 垂向扩散动力学模型的数值求解方法

对方程(1)进行离散, 即:

$$\frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} = E \frac{c_{i+1}^{n+1} - 2c_i^{n+1} + c_{i-1}^{n+1}}{\Delta z^2} -$$

$$v \frac{c_i^{n+1} - c_{i-1}^{n+1}}{\Delta z} + p c_i^n \quad (5)$$

式中, Δt 和 Δz 分别时间步长和空间步长, c_i^n 代表 i 层水第 n 时间步的水藻浓度。

整理后得

$$A \cdot c_{i+1}^{n+1} + B \cdot c_i^{n+1} + C \cdot c_{i-1}^{n+1} = D \quad (6)$$

$$(i = 2, \dots, N-1)$$

式中, $A = \frac{E\Delta t}{\Delta z^2}$, $B = -\frac{2E\Delta t}{\Delta z} - \frac{v\Delta t}{\Delta z} - 1$, $C = \frac{E\Delta t}{\Delta z^2} + \frac{v\Delta t}{\Delta z}$, $D = -1 - p\Delta t$

在某些水层, 进行专门的处理, 在表层 ($i=1$), 离散格式如下:

$$\left(v + \frac{E}{\Delta z}\right)c_1^n - \frac{E}{\Delta z}c_2^n = 0 \quad (7)$$

在底层 ($i=N$)

$$c_{N-1}^n = c_N^n \quad (8)$$

在真光层 ($i=NI$)

$$\frac{E}{\Delta z}c_{NI-1}^n - \frac{2E}{\Delta z}c_{NI}^n + \frac{E}{\Delta z}c_{NI+1}^n = 0 \quad (9)$$

对式(5)采用追赶法求解, 由于采用隐格式, 时间步长不受 CFL 条件限制。

2 结果与分析

从理论解中可以看到, 根据 k 值的正负, 水藻生长可以分成 3 种状态: 增长、消亡、稳定, 下面对这 3 种情况进行数值实验, 分别取参数如下:

(1) $E=0.0002 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\mu=1 \text{ d}^{-1}$, $v=2.592 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, $d=0.1 \text{ d}^{-1}$, 对应于 $k=0.23 \text{ d}^{-1}$ 。

(2) $E=0.0001 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\mu=0.1 \text{ d}^{-1}$, $v=2.16 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, $d=0.01 \text{ d}^{-1}$, 对应于 $k=-0.12 \text{ d}^{-1}$ 。

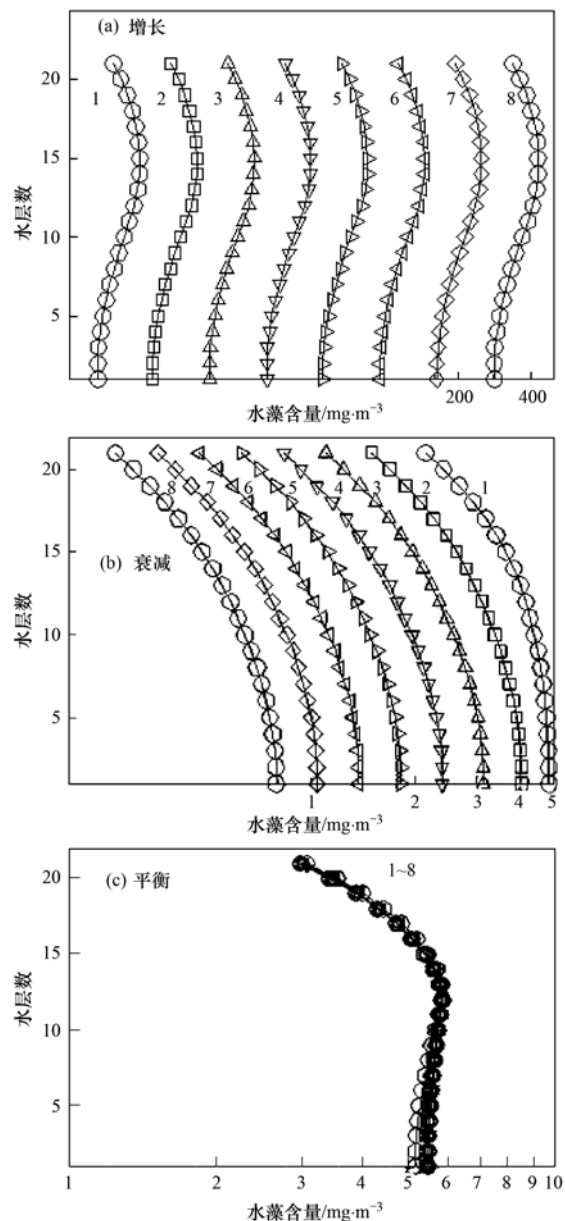
(3) $E=0.0001 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\mu=0.73 \text{ d}^{-1}$, $v=2.592 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, $d=0.073 \text{ d}^{-1}$, 对应于 $k=0.0 \text{ d}^{-1}$ 。

上述所有例子中 $l=5 \text{ m}$, $H=10 \text{ m}$ 。

图 1 中给出水藻从初始值 ($5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 到第 8 d 的水藻垂直分布变化, 垂向从底面到水面共分 21 层, 可以看到本研究建立数值模型能够反映上述 3 种水藻生长状态, 可以看到水藻含量垂直分布受 k 值影响, 当 $k>0$ 时, 水藻含量呈指数型增长, 并且在水面下 3m 附近达到最大; 当 $k<0$ 时, 水藻含量呈指数型减小, 由于沉降作用占优, 上层水体的藻含量小于下层; 当 $k=0$ 时, 水藻含量趋于稳定, 此时沉降、生长、死亡及扩散的效应正好达到平衡, 水藻垂直分布在 5 m 即真光层底部达到最大, 然后逐渐减小。从这个数值实验可以看出, 要得到水藻的生

长状态和垂直分布情况, k 值是求解的关键。

从理论解的本征条件(4)中可以发现, k 的值取决于 E 、 v 、 μ 、 d 以及 l 、 H , 将这些参数无量纲化为 4 个参数: $Pe = \frac{vl}{E}$, $G = \frac{\mu l^2}{E}$, $D = \frac{\mu}{d}$, $L = \frac{l}{H}$ 。 Pe 表示沉降作用, G 表示生长作用, D 表示生长和死亡的相对强弱, L 表示光照和水深的影响。根据以往研究及数值实验发现, 前两个参数即 Pe 和 G 对 k 值影响较显著, 而后两个参数对 k 值的影响要轻微很多。因此, 将 Pe 和 G 作为自变量和应变变量, D 和 L 作为影响参数, 通过数值解得到平衡态下 ($k=0$) 的 Pe - G 曲线。参考了我国淡水湖泊实际情况, 水深 H 为 0



曲线序号代表天数, 下同

图 2 水藻生长的 3 种状态

Fig. 2 Three growth states of algae

~20 m, 真光层深度 l 为 2~8 m, 水藻生长率 μ 为 $0.5 \sim 3 \text{ d}^{-1}$, 水藻沉降速度 v 为 $0.5 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 垂直扩散系数 E 为 $0.0001 \sim 0.002 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 确定每个参数取值范围: $Pe \in [0.1, 3]$, $G \in [0, 10]$, $D \in [1, 100]$, $L \in [0, 1]$.

图 3 给出平衡态时 Pe 、 G 、 D 、 L 之间的关系曲线. 文中采用了数值法和理论解[式(4)]两种方法来得到这些关系曲线, 可以看到, 结果基本一致, 说明文中的数值方法是可靠的, 而理论解可以作为简单条件下分析数值结果的有效工具. 从图 3(a) 曲线上看到随着 Pe 增加, G 的值也随之增加, 这反映了沉降速度的增加, 会使水藻含量下降, 这时候必须提高水藻生长率才能维持水藻含量保持平衡. D 的影响显然要比 Pe 和 G 小很多, 而且它的影响主要集中在小于 10 的时候, 当 D 大于 10 以后, 它的影响就基本可以忽略了. 图 3(b) 表明 L 的影响是 4 个参数中最小的, 几乎可以用 $L=0$ 的 Pe - G 曲线来代替其他所有情况, 这和 Wong 等^[10] 的结论不同, 原因是本文采用了底边界条件与之不同所致.

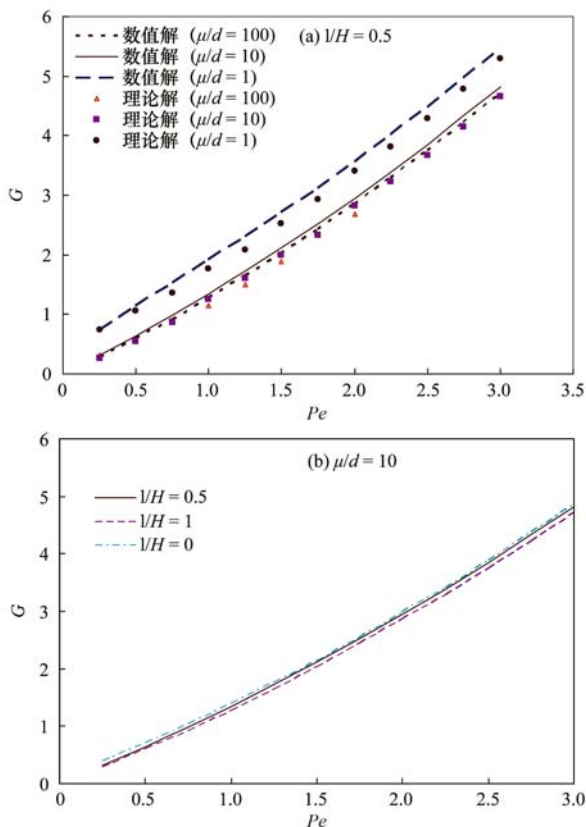


图 3 不同条件影响下水藻含量稳定性曲线

Fig. 3 Stability criterion curve of algae concentration under various factors

在我国现有大型湖泊的水藻暴发期前期, 水藻的生长率一般都要远超过死亡率, 在这个时候可认

为 $D \gg 10$, 此时 D 和 L 的影响基本都可以忽略掉, 从而将 Pe 和 G 之间的关系表达出来.

若 $\frac{l}{H} \rightarrow 0$, 式(4)可以表达为:

$$\tan \beta l = \frac{\beta(a+b)}{(\beta^2 - ab)} \quad (10)$$

$$(\beta l)^2 = \left[\arctan \frac{\beta(a+b)}{(\beta^2 - ab)} \right]^2 \quad (11)$$

$(\beta l)^2$ 可以写成 $G - \frac{Pe^2}{4}$, 代入上式可得:

$$G - \frac{Pe^2}{4} = \left[\arctan \frac{\beta(a+b)}{(\beta^2 - ab)} \right]^2 = F \quad (12)$$

Riley 等^[6]认为 $F \approx 0$ 因此得到 $G = \frac{Pe^2}{4}$.

Wong 等^[10]认为 $F \approx \frac{\pi^2}{4}$, 因此得到 $G = \frac{1}{4}(Pe^2 + \pi^2)$.

本研究认为 F 并非常数, 而应该是关于 Pe 的二次函数, 假设 $F(Pe) = a_1 Pe^2 + a_2 Pe + a_3$

式中 a_1 、 a_2 、 a_3 是待定系数, 因此可得:

$$G = \left(a_1 + \frac{1}{4} \right) Pe^2 + a_2 Pe + a_3 \quad (13)$$

通过与数值结果的拟合可得到本研究公式:

$$G = 0.1430 Pe^2 + 1.1592 Pe + 0.0334 \quad (14)$$

从图 4 中可以看到, 文中公式能比文献[6~10]的公式更接近数值结果, 并可以作为初步判断藻类生长状态的标准. 当已知一个水域内水藻的生长率, 沉降速度, 扩散系数和真光层厚度时, 直接可以计算得到 $G_{\text{实际}}$ 和用式(14)得到的 $G_{\text{平衡}}$, 然后比较两者大小. 当 $G_{\text{实际}}$ 落在曲线上方时即 $G_{\text{实际}} > G_{\text{平衡}}$, 说明藻类的生长率超过了扩散和沉降的作用, 水藻处于增长状态(如数值实验 1); 当 $G_{\text{实际}}$ 落在曲线下方

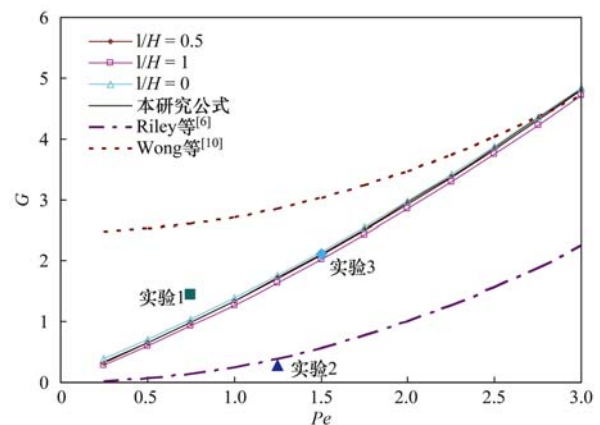


图 4 不同水藻含量稳定性曲线比较及 3 个数值实验点位置

Fig. 4 Comparison of three stability criterion formulae and the numerical cases

方时即 $G_{\text{实际}} < G_{\text{平衡}}$, 水藻的扩散和沉降作用强于生长作用, 水藻处于消亡状态 (如数值实验 2); 当 $G_{\text{实际}}$ 正好在曲线上时即 $G_{\text{实际}} = G_{\text{平衡}}$, 水藻生长处于平衡状态 (如数值实验 3). 除可以判别水藻生长状态外, 本研究公式为量化研究水藻暴发提供了理论依据. 如图 5 绘出文献[8]中的实测资料数据, 区域是美国的 LBJ (Lyndon B. Johnson) 湖泊. 其中同时标出了由 Pe 和 G 确定的 k 等值线, 从中可以看到, 不同藻类的影响区域是不同的, 绿藻沉降速度较大, 影响范围主要在 Pe 较大的区域, 硅藻沉降较小, 影响范围在 Pe 较小的区域, 而水藻总量则分布较为均匀.

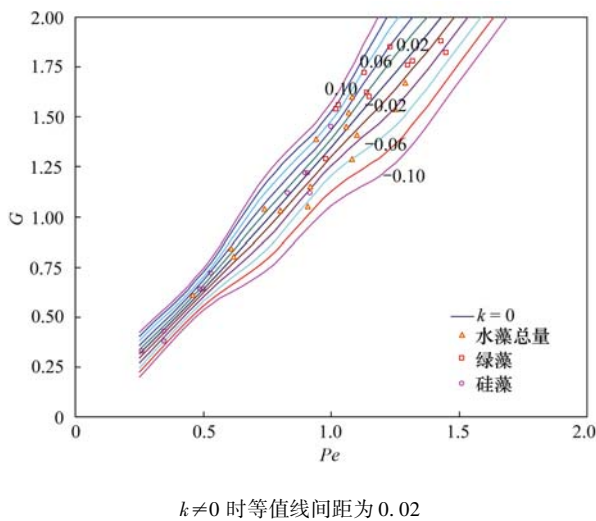


图 5 LBJ 湖的实测数据[8]在 $Pe \sim G$ 曲线中的影响区域

Fig. 5 The influence field of measurements of LBJ Lake

3 讨论

上节通过理论方法和数值方法量化研究了生长率 μ 、 E 、 v 、 d 以及 l 、 H 这些参数对水藻生长状态的影响. 但考虑的都是 μ 和 E 的垂直平均值, 在实际过程中, μ 沿着水深方向受到光照、营养盐分布不均的影响. E 在不同环境条件下分布也不一样. 因此, 光照和营养盐对 μ 会产生怎样的影响, 同时 E 的垂直不均匀分布会对水藻的生长状态产生怎样的影响, 是本节要研究的问题.

3.1 光照对水藻生长的影响

在考虑光照影响下, 生长率 μ 首先在空间上就不是一个常数, Di Toro 等^[7]曾经分别采用常数和指数分布的生长率对水藻生长进行分析. 根据常理, 越靠近表层, 得到的光照越强, 生长率越高. 光照在水中满足 Lambert-Beer 公式:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\lambda I \quad (15)$$

式中, $\lambda = K_{bg} + \gamma C$, 式中, I 是光线在水中的强度, K_{bg} 是水体背景透明度吸光率, γ 是水藻吸光率.

对上式进行积分, 并利用表层边界条件, 可得:

$$I = I_{in} \exp \left[- \left(\gamma \int_0^z C dz + K_{bg} z \right) \right] \quad (16)$$

式中, I_{in} 是表面光强 (下标均使用正体), 也就是入射光强, 从表达式可以看到, 随着水深、背景吸光率增加光强呈指数衰减, 随着水藻浓度的增加, 光强的衰减速度也越快.

在不考虑其他限制条件下, 生长率可以直接跟光照成正比关系即:

$$\mu = \alpha I = \alpha I_{in} \exp \left[- \left(\gamma \int_0^z C dz + K_{bg} z \right) \right] \quad (17)$$

式中, α 是光照生长率系数, αI_{in} 直接可写成 μ_0 作为最大生长率. 从式 (17) 可以看到, 植物的生长率 μ 不仅在垂向有变化, 而且会随着水藻浓度的变化而变化, 即“遮蔽效应”. 下面将关于这点在下面通过数值实验详细讨论.

数值实验最大生长率 μ_0 分别取为 0.55 d^{-1} 和 3 d^{-1} , $\gamma = 0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{cell}^{-1}$, $K_{bg} = 0 \text{ m}^{-1}$. 其余参数和前面完全相同. 图 6 中显示了水藻浓度分布随时间变化, 其中上面的数字表示天数, 图 7 表示生长率随时间的变化. 当水藻处于消亡状态时, 由于藻类的浓度在不断降低, 对光的吸收也会逐渐减弱, 这样植物的生长率会比初始时刻增加 [图 7(a)], 相比于不考虑水藻“遮蔽效应”的情形 [图 6(b)], 水藻含量不会无限制减小, 而是减小到某个值后就达到平衡 [图 6(a)]. 同理, 当水藻处于增长状态时, 如果不考虑水藻的“遮蔽效应”, 水藻会呈几何倍数地增长 [图 6(d)], 而这种情景在自然界中是不可能出现的, 更多情况下, 是如同图 6(c) 中的现象, 当水藻增长到一定数量后, 会在光照的限制下生长率减小, 最终趋于某个平衡状态 [图 7(b)]. 所以光照对水藻影响主要表现在控制植物生长率从而限制水藻数量, 使其既不使其完全消亡, 也不无限制增长, 而会趋于一种平衡状态. 而这种平衡状态下的生长率可以通过公式 (14) 来确定. 因此在实际水藻计算中, 要考虑到光照“遮蔽效应”的影响, 否则计算结果会产生较大偏差.

3.2 营养盐对水藻生长的影响

水中的氮、磷等营养盐会对水藻的生长产生影响, 营养盐的控制方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = E \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} - \alpha_N \mu C \quad (17)$$

式中, N 表示营养盐的浓度, α_N 表示藻类对营养盐

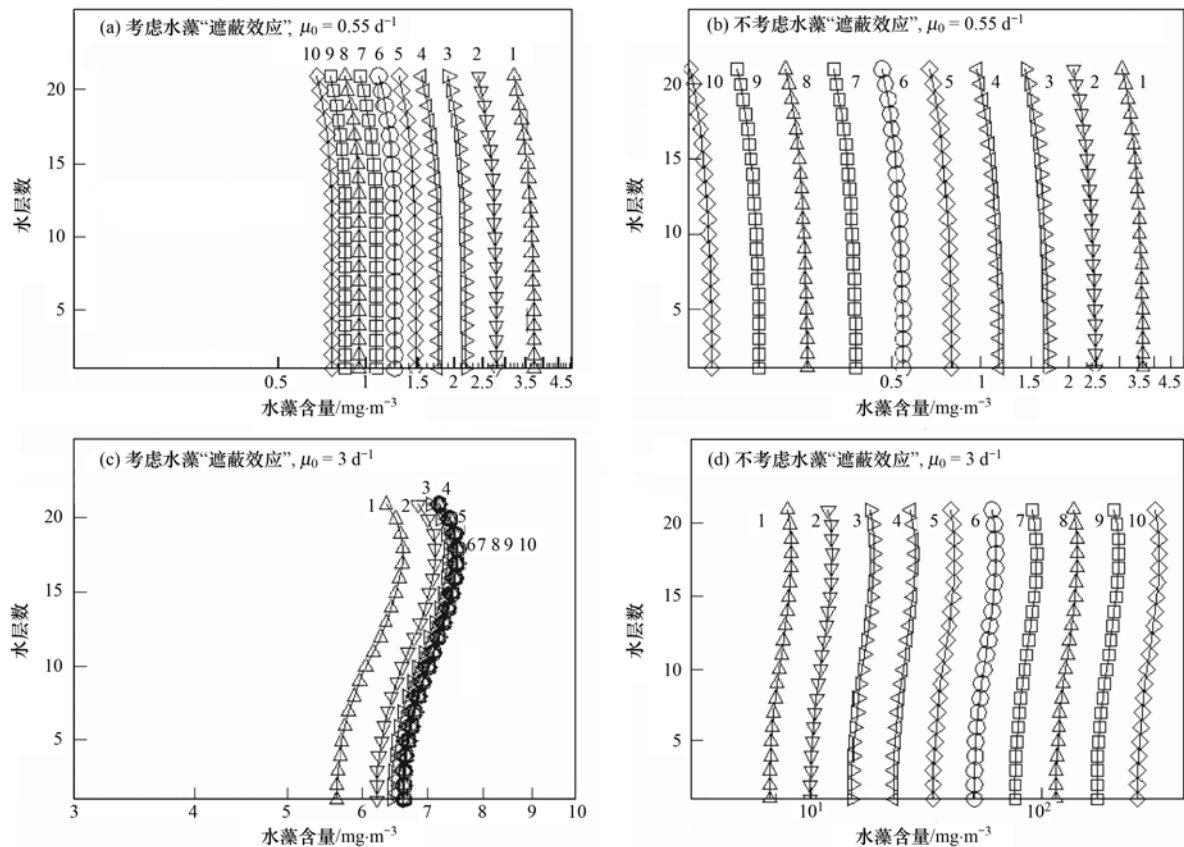


图 6 不同光照条件下的水藻含量随时间(天)变化

Fig. 6 Algal biomass along water column by day under different light conditions

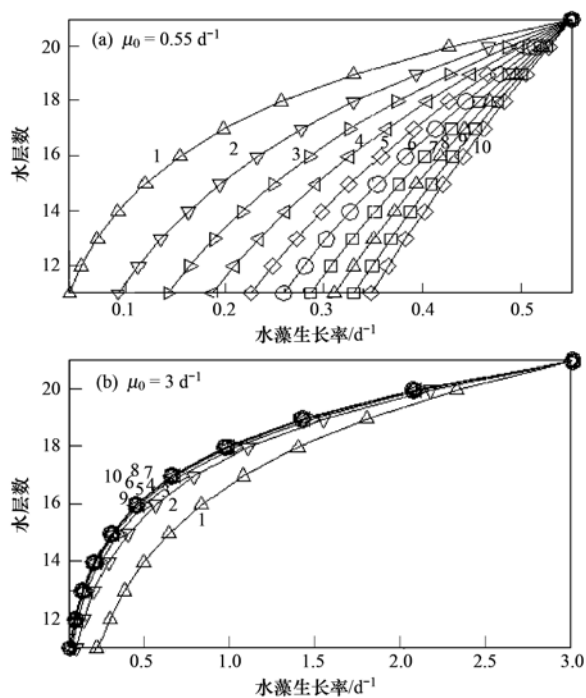


图 7 考虑“遮蔽效应”下生长率分布

Fig. 7 Growth rate along the water column by day under the 'shade effect'

$$N = (N_l - N_0) \frac{z^2}{l^2} + N_0 \quad (18)$$

N_l 和 N_0 分别是 $z=1$ 和 $z=0$ 处营养盐的浓度,代入式(17),并假定 $\alpha_N=1$,可得:

$$\mu = \frac{F_l}{Cl} \quad (19)$$

式中, $F_l = \frac{2E(N_l - N_0)}{l}$, 是 $z=l$ 的营养盐通量。

从式(19)可见,水藻的生长率跟营养盐通量成正比,跟水藻浓度和真光层厚度成反比。由于营养盐通量一定,当水藻处于暴发状态时,水藻浓度的不断增加会使 F_l 逐渐减小, μ 也随之减小,直至达到平衡态,反之,水藻处于消亡状态时,水藻浓度的减小会使 μ 逐渐增加,直到 $\mu = \mu_{\text{平衡}}$ 。从中可以看到,营养盐和光照一样对水藻的生长起到控制作用。

下面通过具体的数值实验来分析营养盐对水藻生长的影响。具体参数为: $E=0.0001 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $v=2.16 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, $N_l=8.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $N_0=1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $L=5 \text{ m}$, $H=10 \text{ m}$ 。初始生长率 $\mu_0=1.03 \text{ d}^{-1}$ 。从图8中可以看到,营养盐对水藻生长的限制作用在8d以后非常明显,最终水藻趋于平衡状态。在仅考虑

营养盐限制条件下, μ 稳定后的垂向分布也不是均匀分布, 而是近似于随深度逐渐下降的指数型分布.

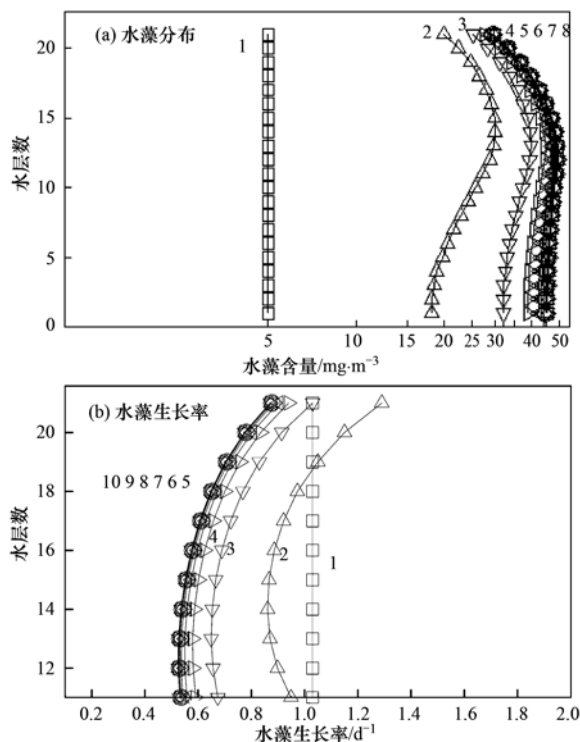


图8 营养盐限制下水藻分布和增长率随着时间(天)变化情况
Fig. 8 Algal biomass and growth rate along water column by day under nutrient flux limit

3.3 垂直扩散系数分布形态对水藻增长的影响

和植物的生长率 μ 一样, 垂直扩散系数 E 也不是一个常数, 而是 z 的函数, Koseff 等^[20] 认为与外海区域不同, 在浅海、河口及湖泊应考虑垂直扩散系数的空间及时间变化, 以更接近于实际状况. 笔者曾采用紊流模型模拟太湖风生环流得到的垂直扩散系数分布如图9所示. 根据观测及数值模拟结果, 假定在不考虑密度分层及波浪情况下风生流的垂直

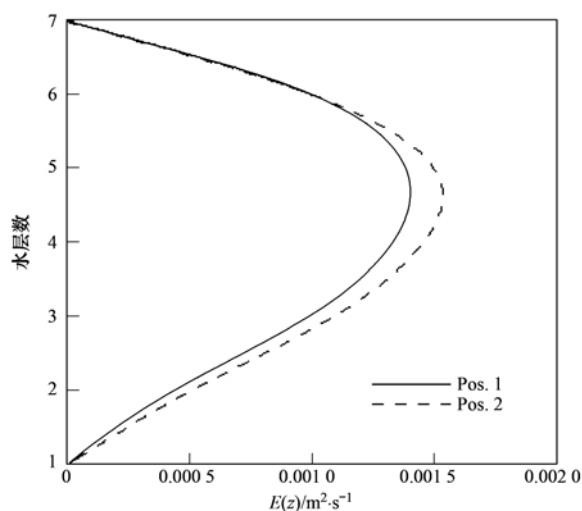


图9 紊流模型模拟得到的垂向扩散系数分布(7层)

Fig. 9 Distribution of vertical turbulent diffusivity by the turbulent closure model (7 layers)

扩散系数分布应接近于抛物分布:

$$E(z) = \kappa H \mu_* \left(\frac{z}{H} \right) \left(1 - \frac{z}{H} \right) \quad (20)$$

式中, μ_* 是摩阻流速, $\kappa = 0.4$ 是卡门常数.

式(20)也可以改写成以垂直平均扩散系数表达的形式:

$$E(z) = 6\bar{E} \left(\frac{z}{H} \right) \left(1 - \frac{z}{H} \right) \quad (21)$$

式中, $\bar{E}$ 是扩散系数的垂直平均.

和常数分布一样, 同样可以得到采用垂直扩散系数 $E(z)$ 抛物分布的 $Pe \sim G$ 曲线(图10), 在这里本研究采用 $E(z)$ 的垂直平均值 $\bar{E}$ 来得到 Pe 和 G . 从图10上可以看到, 对于不同的水深, 垂直扩散系数形态的影响是不同的, 当 $l/H = 0.5$ 时, 抛物分布和常数分布的效果类似, 说明在 H 较浅的水域, 抛物分布可以用常数分布代替, 当 $l/H = 0.2$ 时, 抛物分布和常数分布会产生偏离, 这种偏离会随着 Pe 数

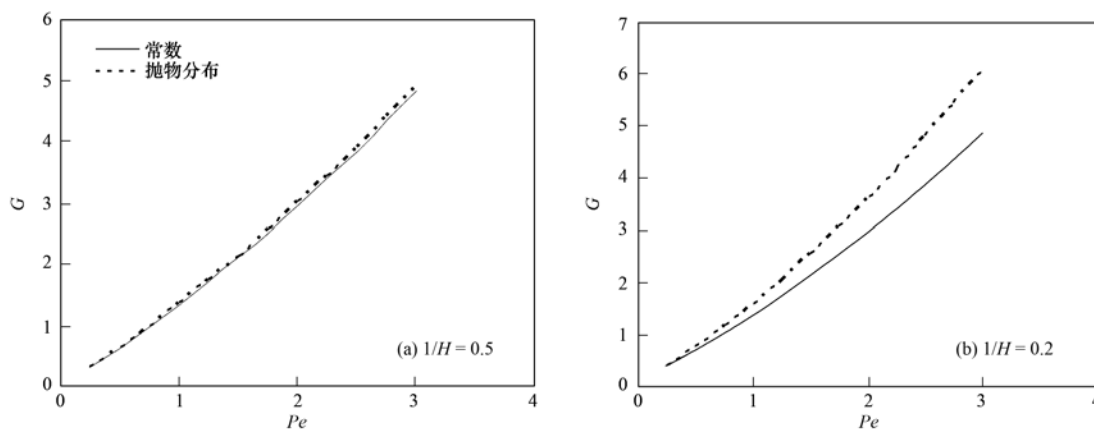


图10 不同垂直扩散系数不同分布下稳定性曲线

Fig. 10 Stability criterion curves under different vertical turbulent diffusivities

的增大而增大,这主要是因为此时在真光层下的紊动扩散已经远大于垂直平均值,如果仍采用垂直平均值,就会得出倾向于“暴发”状态,而在实际过程中,由于中下层的强烈紊动扩散,水藻很可能并没有“暴发”.因此在比较深的区域,应采用更接近实际的抛物型扩散系数.

4 结论

(1)在不考虑营养盐和光照限制条件下,藻类的生长状态由4个无量纲数 $\frac{v_l}{E}$ 、 $\frac{\mu l^2}{E}$ 、 $\frac{\mu}{d}$ 、 $\frac{l}{H}$ 确定,其中前两个参数表示生长、沉降和扩散之间的相对强弱,对于水藻生长状态起到主导作用,后两个参数表示生长与死亡、真光层和总水深的相对强弱,对藻类生长状态起到次要作用.

(2)通过拟合理论推导和数值方法的结果,得到表征水藻生长平衡状态下的 $Pe \sim G$ 曲线经验表达式,通过该表达式可以作为初步判断藻类生长状态的标准,并可用来估算平衡条件下不同水藻的生长率或水藻沉降速度.

(3)光照、营养盐都会对水藻的生长暴发起到限制作用,前者主要通过“遮蔽效应”,而后者主要通过“通量限制”.

(4)垂直扩散系数的分布形态对水藻的生长状态的影响大小受 l/H 的影响, l/H 较小时,应考虑垂直扩散系数垂向分布不均的影响.

参考文献:

- [1] 王磊,张磊,段学军,等.江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应[J].生态学报,2011,31(22):6832-6844.
- [2] 王华,逢勇.藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J].环境科学,2008,29(4):884-889.
- [3] 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,2005,25(3):589-595.
- [4] 黄钰玲,陈明曦,刘德富,等.不同氮磷营养及光温条件对蓝藻水华生消的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(9):93-100.
- [5] Cloern J E. Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary[J]. Journal of Marine Research, 1991, 49(1): 203-221.
- [6] Riley G A, Stommel H, Bumpus D F. Quantitative ecology of the plankton of the western North Atlantic [J]. Bulletin of the Bingham Oceanographic Collection Yale University, 1949, 12: 1-169.
- [7] Di Toro D M. Vertical interactions in phytoplankton populations-an asymptotic Eigenvalue analysis (IFYGL) [A]. In: Proceedings of the 17th Conference on Great Lakes Research [C]. International Association for Great Lakes Research, 1974. 17-27.
- [8] Schnoor J L, Di Toro D M. Differential phytoplankton sinking and growth-rates: an eigenvalue analysis [J]. Ecological Modelling, 1980, 9: 233-245.
- [9] Huisman J, Van Oostveen P, Weissing F J. Critical depth and critical turbulence: two different mechanisms for the development of phytoplankton blooms [J]. Limnology and Oceanography, 1999, 44(7): 1781-1787.
- [10] Wong K T M, Lee J H W, Hodgkiss I J. A simple model for forecast of coastal algal blooms[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 74(1-2): 175-196.
- [11] 田峰,葛根,杨晨.水动力与生态耦合的赤潮藻类生长模型研究[J].海洋技术,2007,26(2):34-37.
- [12] 周捷,曾诚,王玲玲.太湖蓝藻生长特征的非线性动力学分析[J].水生生物学报,2009,33(5):931-936.
- [13] 陈鸣,陆卫鲜,郁建桥,等.太湖梅梁湾水污染及蓝藻分析计算[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):634-638.
- [14] 石洪华,方国洪,胡龙,等.用生态动力学模型分析海带养殖对浮游生态系统的影响[J].水道港口,2011,32(3):213-218.
- [15] 李大勇,王济干,董增川,等.基于生态系统动力学模型的太湖藻类动态模拟[J].水力发电学报,2011,30(3):124-131.
- [16] Xie L, Xie P, Li S, et al. The low TN: TP ratio, a cause or a result of Microcystis blooms? [J]. Water Research, 2003, 37(9): 2073-2080.
- [17] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖水环境演化过程与机理[M].北京:科学出版社,2004. 200-201.
- [18] Brunberg A K, Blomqvist P. Benthic overwintering of Microcystis colonies under different environmental conditions[J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(11): 1247-1252.
- [19] 程曦.淀山湖氮磷营养物与浮游藻类增长相互关系的研究[D].上海:华东师范大学,2010. 1-5.
- [20] Koseff J R, Hohen J K, Monismith S G, et al. Coupled effects of vertical mixing and benthic grazing on phytoplankton populations in shallow, turbid estuaries [J]. Journal of Marine Research, 1993, 51(4): 843-868.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行