

普渡河污染源解析 及藻类竞争机理研究

俞 茜 陈永灿 刘昭伟 江 磊 ◎ 著



SOURCE APPORTIONMENT OF POLLUTANTS
IN THE PUDU RIVER
AND COMPETITION MECHANISMS OF ALGAE



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

普渡河污染源解析 及藻类竞争机理研究

俞 茜 陈永灿 刘昭伟 江 磊 ◎ 著



SOURCE APPORTIONMENT OF POLLUTANTS
IN THE PUDU RIVER
AND COMPETITION MECHANISMS OF ALGAE



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书针对富营养化湖泊一下游河流的水体富营养化问题建立了大型河流污染源解析方法,并用其分析了导致普渡河(螳螂川、普渡河下游及三条主要支流)水体富营养化的主要污染源,构建了受水体紊动影响的微囊藻属和小球藻属垂向光竞争模型,并基于该模型,通过大量的数值模拟,绘制了不同初始藻细胞密度条件下藻属的竞争优势分布图,揭示了藻类对不同水动力条件的适应规律,阐明了藻类空间演替的水动力调控机制。大量的实际案例包括螳螂川中优势藻属的沿程变化均能证明:竞争优势分布图能够预测水体动力特征的改变导致的优势藻属的转变。

图书在版编目(CIP)数据

普渡河污染源解析及藻类竞争机理研究 / 俞茜等著.

— 南京: 河海大学出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5630-5794-8

I. ①普… II. ①俞… III. ①河流—富营养化—水污染防治—研究—云南 IV. ①X522

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 284390 号

- | | |
|------|---------------------------------------|
| 书 名 | 普渡河污染源解析及藻类竞争机理研究 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5630-5794-8 |
| 责任编辑 | 彭志诚 |
| 封面设计 | 张育智 吴晨迪 |
| 出版发行 | 河海大学出版社 |
| 地 址 | 南京市西康路 1 号(邮编:210098) |
| 电 话 | (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部) |
| 经 销 | 江苏省新华发行集团有限公司 |
| 排 版 | 南京布克文化发展有限公司 |
| 印 刷 | 虎彩印艺股份有限公司 |
| 开 本 | 787 毫米×960 毫米 1/16 |
| 印 张 | 10.5 |
| 字 数 | 170 千字 |
| 版 次 | 2018 年 12 月第 1 版 |
| 印 次 | 2018 年 12 月第 1 次印刷 |
| 定 价 | 80.00 元 |

近几十年来,河流富营养化问题日益严重,受到了学者和管理部门的极大重视。河流中的藻属来源大致可分为内源和外源两种:内源即在河流中通过光合作用自身分裂生长的藻属,通常被称为河生藻属;外源,即河流外部(如上游藻类富集区域和附近的回水区等)为河流提供湖泊型藻属。滇池微囊藻属水华严重时,其出口下游螳螂川(普渡河上游河段)的起始段水面常会出现明显的蓝绿色聚集物,在水华高峰期,这些蓝绿色聚集物会向螳螂川下游蔓延,严重影响河流生态及两岸居民的生活,导致螳螂川中出现这种蓝绿色聚集物的原因可能是其上游的滇池。但是,由于微囊藻属在普渡河中的空间变化过程及相应的控制因子尚并不清晰,因此难以判断滇池对于普渡河的影响范围及影响程度。

本书通过现场采样、物种鉴定、污染源解析、数值模拟和机理分析等方法,针对滇池—普渡河这类富营养化湖泊—下游河流的水体富营养化问题开展了系统的研究,首先构建了大型河流污染源解析方法(空间区域划分,区域内重点指标确定,重点指标污染源解析),并用其系统分析了导致普渡河(螳螂川、普渡河下游及三条主要支流)水体富营养化的主要污染来源。研究结果表明滇池对普渡河螳螂川河段影响最显著,是螳螂川水体富营养化的主要污染源,并导致螳螂川河段富营养化程度最严重且水质空间差异最大。通过2013年6月和9月在滇池口及螳螂川沿程采样分析发现,总藻细胞密度沿程逐渐减少,但9月的减少速率缓于6月,滇池对螳螂川的影响范围随时间变化,来自滇池的微囊藻属在螳螂川沿程逐渐被中心纲硅藻和绿球藻目绿藻所取代。该河段营养盐充足、水温适宜,光强是藻类的主要竞争资源,沿程加剧的水体紊动是导致不同藻属藻细胞密度空间变化的主要原因。因此,在野外采样的基础上,本书构建了受水体紊动影响的微囊藻属和小球藻属垂向光竞争模型。模型中考虑了不同直径的微囊藻群

体的浮力调节能力。通过模拟发现:微囊藻群体最大藻细胞密度出现在群体密度与水体密度相同的位置处;微囊藻属在水面会出现昼沉夜浮的现象,且该现象在紊动较弱的水体中更加明显。藻属的垂向自迁移能力以及生长速率分别是具有浮力调节能力的微囊藻属和生长速率较快的小球藻属在紊动较弱和紊动较强水体中取得竞争优势的关键。水体紊动较弱时,竞争藻属的自身垂向迁移决定其垂向分布,具有浮力调节能力的微囊藻属占据上层水体优势位置,进行充分的光合作用,易取得竞争优势;水体紊动较为剧烈时,紊动的水体会将竞争藻属带至各水深处,导致所有藻属在垂向分布较为均匀,此时,所有藻属获取光强的机会相似,因此,生长速率更快的小球藻属易取得竞争优势。此外,笔者选取水深和水体紊动描述水体动力特征,通过大量的模拟,绘制了不同初始藻细胞密度条件下藻属的竞争优势分布图,揭示了藻类对不同水动力条件的适应规律:微囊藻属适宜水深较深且紊动较弱的水体;小球藻属适宜水深较浅的水体;两种藻属均不适宜水深较深且紊动剧烈的水体。大量的实际案例包括螳螂川中优势藻属的沿程变化均能证明:竞争优势分布图能够预测水体动力特征的改变导致的优势藻属的转变。

本书主要由俞茜撰写和统稿,各章的主要执笔人、参与人员如下:第1章,陈永灿,俞茜,江磊;第2章,俞茜,江磊;第3章,俞茜,江磊;第4章,俞茜,刘昭伟;第5章,俞茜,陈永灿,刘昭伟。本书的撰写参考和引用了大量国内外专家学者的有关研究成果,作者从中获得了很大的教益和启迪,谨向这些学者表示衷心的感谢。

本书得到了国家重点研发计划河流—水库系统浮游植物及微生物种群变异过程与调控机制(2016YFC0502204)的资助。

鉴于富营养化问题的复杂性,涉及的因素众多,同时由于作者水平有限,书中难免有错漏之处,殷切希望同行专家和读者朋友指正。

作者

2018年9月于北京

第1章 绪论

- 1.1 研究背景及意义 /001
- 1.2 污染源解析方法研究进展 /004
- 1.3 河流浮游藻类生长的影响因素及其研究进展 /005
 - 1.3.1 营养盐 /005
 - 1.3.2 水动力条件 /006
 - 1.3.3 水下光强 /008
 - 1.3.4 水温 /008
 - 1.3.5 浮游动物捕捉 /009
 - 1.3.6 各因素综合作用 /010
 - 1.3.7 河流与湖泊中浮游藻类生长因素的差别 /010
- 1.4 富营养化湖泊下游河流浮游藻类空间变化的研究进展 /012
 - 1.4.1 富营养化湖泊下游河流现状分析 /012
 - 1.4.2 典型湖泊型浮游藻属和典型河流型藻属的特点 /013
- 1.5 浮游藻类竞争模型的研究进展 /016
 - 1.5.1 资源竞争模型和生态模型研究进展 /016
 - 1.5.2 微囊藻属模型研究进展 /018
- 1.6 研究思路及主要内容 /021

第2章 普渡河水环境基本特征及污染源解析

- 2.1 普渡河简介 /024
 - 2.1.1 普渡河气候特征 /024
 - 2.1.2 普渡河水文特征 /025

- 2.1.3 普渡河水环境特征 /025
- 2.2 研究方法 /026
 - 2.2.1 采样点布置 /026
 - 2.2.2 基于环境因子的水质评价 /027
 - 2.2.3 大型河流污染源解析方法 /028
- 2.3 普渡河水质情况 /030
- 2.4 普渡河污染源解析 /033
 - 2.4.1 普渡河空间区域划分 /033
 - 2.4.2 普渡河空间区分内重点污染指标确定 /035
 - 2.4.3 普渡河空间分区内污染源解析 /036
- 2.5 小结 /043

第3章 螳螂川中浮游藻类时空变化及功能群分析

- 3.1 研究方法 /045
 - 3.1.1 采样点布置 /045
 - 3.1.2 样品采集及理化因子检测 /047
 - 3.1.3 浮游藻类物种鉴定 /047
 - 3.1.4 基于浮游藻类的多样性指数水质评价 /048
 - 3.1.5 功能群划分 /049
 - 3.1.6 相关性分析和回归分析 /050
- 3.2 螳螂川中浮游藻类时空变化 /050
 - 3.2.1 理化因子空间变化 /050
 - 3.2.2 浮游藻类时空变化 /051
 - 3.2.3 浮游藻类藻细胞密度与环境因子的相关性分析 /058
 - 3.2.4 浮游藻类物种丰度与环境因子的相关性分析 /061
- 3.3 螳螂川中浮游藻类功能群划分 /062
 - 3.3.1 浮游藻类功能群时空组成 /062
 - 3.3.2 浮游藻类功能群时空变化 /066
- 3.4 螳螂川中过渡区长度的确定 /067
- 3.5 小结 /068

第4章 微囊藻属的垂向运动规律及数学模型

- 4.1 微囊藻属藻细胞密度垂向分布模型特点 /071
- 4.2 模型基本假设和控制方程 /072
 - 4.2.1 移流扩散方程 /072
 - 4.2.2 细胞组织密度改变模型 /073
 - 4.2.3 静止水体中上浮/下沉模型 /074
 - 4.2.4 水体中迁移轨迹 /075
- 4.3 模型数值离散 /075
- 4.4 模型验证 /078
 - 4.4.1 Vinkeveen 湖 /078
 - 4.4.2 于桥水库 /084
- 4.5 微囊藻属在静止水体中的迁移轨迹 /084
 - 4.5.1 微囊藻群体密度变化 /084
 - 4.5.2 微囊藻群体上浮/下沉速度变化 /089
 - 4.5.3 微囊藻群体迁移轨迹 /091
- 4.6 小结 /097

第5章 浮游藻类光竞争模型

- 5.1 浮游藻类光竞争模型特点 /101
- 5.2 模型基本假设和控制方程 /101
- 5.3 无量纲分析 /103
- 5.4 微囊藻属和小球藻属垂向光竞争模型 /103
 - 5.4.1 模型验证 /103
 - 5.4.2 模型改进 /106
 - 5.4.3 光竞争模型中藻类自遮蔽的作用 /109
- 5.5 微囊藻属和小球藻属单独生存时的参数敏感性分析 /112
 - 5.5.1 微囊藻属单独存在时参数敏感性分析 /113
 - 5.5.2 小球藻属单独存在时参数敏感性分析 /116
 - 5.5.3 单独存在时微囊藻属和小球藻属的无量纲分析 /117
- 5.6 微囊藻属和小球藻属共存时的参数敏感性分析 /117

5.6.1	垂向紊动扩散系数(D)	/121
5.6.2	水深($Depth$)	/121
5.6.3	最大光强(I_m)	/122
5.6.4	光周期(D_L)	/122
5.6.5	背景消光系数(K_{bg})	/123
5.6.6	微囊藻属消光系数(k_M)	/123
5.6.7	小球藻属消光系数(k_C)	/123
5.6.8	微囊藻群体半径(r)	/124
5.6.9	微囊藻属最大生长速率($p_{M,max}$)	/124
5.6.10	微囊藻属损失速率(l_M)	/124
5.6.11	小球藻属最大生长速率($p_{C,max}$)	/125
5.6.12	小球藻属损失速率(l_C)	/125
5.7	微囊藻属和小球藻属竞争光强对于最大藻细胞密度的影响	/126
5.7.1	消光系数	/127
5.7.2	水深	/127
5.7.3	垂向紊动扩散系数	/128
5.7.4	初始藻细胞密度	/128
5.8	微囊藻属和小球藻属竞争光强对于总藻细胞密度的影响	/130
5.8.1	水深	/130
5.8.2	垂向紊动扩散系数	/130
5.9	水深/水体紊动对藻类竞争优势的影响	/131
5.9.1	竞争优势分布图	/132
5.9.2	竞争优势分布图在多水体中的验证	/136
5.10	小结	/138

参考文献	/140
------	------

— 第1章 —

绪 论

1.1 研究背景及意义

近年来,在滇池微囊藻属水华暴发季节,普渡河上游(螳螂川)的起始河段常会出现大量蓝绿色聚集物,如图 1.1(a)所示。在滇池水华严重时,该蓝绿色聚集物甚至会覆盖整个河面,并随流向下游传输。这种现象在其他上游没有富营养化湖泊的河流中很少出现。一般情况下,河流起始端的浮游藻类藻细胞密度很低(Hilton et al., 2006),不会出现水华,只有在水温适合且营养盐充足的大型河流的中下游河段才有可能出现(Istvánovics et al., 2010; Tavernini et al., 2011; Abonyi et al., 2012),且形成水华的优势藻属通常为中心纲硅藻(Jeppesen et al., 2005; Phillips et al., 2008)或者绿球藻目绿藻(Bahnwart et al., 1998)等河流型藻属。

河流中的藻属来源可分为内源和外源两种,内源即在河流中通过光合作用自身分裂生长的藻属,通常被称为河生藻属(potamoplankton),一般只在大型河流的中下游才会达到有威胁的生物量(Hilton et al., 2006; Istvánovics et al., 2012),此类含有大量河流型藻属的河流常被认为是下游湖泊或者河口中浮游藻类的外源。近年来,由于湖泊水华及河口赤潮问题较为严重,河-湖/河-河口的案例得到了较为广泛的研究(Bridgeman et al., 2012)。外源,顾名思义,就是河流外部如上游藻类富集区域和附近的回水区等(Allan et al., 2007)为河流提供

湖泊型藻类(limnoplankton)。螳螂川中出现的现象说明有外源给螳螂川提供了大量的蓝绿色浮游藻类,该蓝绿色聚集物很可能为滇池的水华藻属微囊藻属。因此,首先需要确定导致螳螂川水体污染的主要原因,即需要进行污染源解析,以确定上游富营养化湖泊是否为螳螂川水质恶化的主要污染源,然后针对富营养化湖泊对下游河流的影响进行研究。这种案例并不少见,所有的富营养化湖泊及其下游的出口河流都属于这一范畴(Prygiel et al., 1994),然而却鲜有相关研究。

富营养化湖泊会给下游出口河流带来严重的危害,其提供的典型湖泊优势藻蓝藻不仅会危害出口河流的水生态还会严重影响两岸居民的生活。(1) 浮在水面的蓝绿色聚集物会散发恶臭,导致河流的景观性和娱乐功能显著降低(陈永灿等, 2014)。(2) 部分蓝藻会释放毒素,如多数富营养化湖泊中的优势藻属微囊藻属会释放微囊藻毒素(Lawton et al., 1991),该毒素会造成人体的肝脏、神经系统和皮肤疾病,对牲畜也有伤害(Paerl et al., 2008; Visser et al., 2015)。(3) 微囊藻属会堵塞净水厂的过滤网,造成当地饮用水和工农业用水紧缺(Bahnwart et al., 1998; Qin et al., 2010)。笔者在普渡河沿岸调研时听到很多居民反映了这样的问题。(4) 给水体治理增加巨额费用。就英国的英格兰和威尔士来说,目前花费在富营养化治理的费用约为每年 1 亿英镑,用于治理富营养化带来危害的花费约为每年 5 500 万英镑(Pretty et al., 2003);昆明市于“十二五”期间投入约 75 亿元用于治理普渡河。(5) 造成水体缺氧。大量蓝绿色藻华聚集在水体表面,一方面会阻碍大气复氧,另一方面当藻类死亡后下沉,细菌会利用水体中的溶解氧分解藻类,导致水体中的溶解氧被大量消耗,两者协同作用会大量消耗水体中的溶解氧,造成如鱼类等生物的生存危机。

近几十年来,河流富营养化问题日益严重,已引起了国际学者和管理部门的极大重视(Bowes et al., 2008; Domingues et al., 2008)。如在过去的 30 年里,富营养化已经取代有机污染成为欧洲大型河流的主要污染压力(Mischke et al., 2011),2000 年欧盟颁布的“水框架指令”(Water Framework Directive, WFD)中明确提出要控制河流中营养盐和浮游藻类的数量(Hilton et al., 2006)。我国也针对河流富营养化问题开展了一系列研究(江源等, 2013)。然而,针对富营养化湖泊对下游河流的生态影响的研究还非常缺乏。考虑到富营养化湖泊会给河

流带来诸多负面的影响,且这些外源带来的严重影响甚至超过河流自身水体的影响,有必要针对富营养化湖泊对下游出口河流的水生态系统的影响进行深入研究和分析,并对来自富营养化湖泊的湖泊优势藻属和河流中自身的河流型优势藻属生物量的控制因子进行深入研究,以期为预防和治理富营养化湖泊下游河流的水质恶化提供有效方案。

由图 1.1(a)可见,滇池蓝藻水华暴发时,在滇池出口即螳螂川的起始端水面有明显的蓝绿色聚集物。而由图 1.1(b)可见,这些蓝绿色聚集物在螳螂川下游水流较为紊动的河段中消失了。究其原因,可能是适宜生存于紊动较弱水体的湖泊型藻属不适应紊动较强的河流环境,因此导致生物量逐渐减少。而通过加剧水体紊动改变优势藻属也是治理湖泊蓝藻水华较为常见的一种方式,如 Harris 等(1996)通过加剧天然湖泊中的水动力条件促使蓝藻转换为绿藻和硅藻。Huisman 等(2004)发现 Lake Nieuwe Meer 在紊动加剧后,绿藻和硅藻会取代微囊藻属成为优势藻属。Mitrovic 等(2011)在澳大利亚 Darling River 进行野外观察时发现,通过加大来流量有助于移除水体中的蓝藻。本书所要研究的湖泊型藻属由水体紊动较弱的湖泊进入水体紊动较强的河流中出现的空间藻属变化也属于水体紊动导致的藻类物种变化问题。但是,学者们仅仅知道改变水体紊动可以导致优势藻属变化或者导致浮游藻属的生物量得到抑制(Li et al., 2013),却不了解水体紊动对藻类生物量的影响方式。因此,有必要针对水体紊动对浮游藻类变化的干预方式进行深入研究,以期为有效预防和治理有毒蓝藻提供有力的理论支持。



(a) 螳螂川起始端(中滩闸)



(b) 螳螂川下游(赤鳊)

图 1.1 螳螂川不同河段处的水面照片(俞茜 摄)

1.2 污染源解析方法研究进展

近几十年来,多元分析方法如因子分析(Factor Analysis, FA)(Pekey, et al., 2004; Huang et al., 2010),聚类分析(Cluster Analysis, CA),化学质量平衡法(Chemical Mass Balance, CMB),主成分分析—多元线性回归(Multi-linear regression of the absolute principal component score, APCS/MLR)(Thurston et al., 1985; Singh et al., 2005; Liu et al., 2010)等方法已被成功应用于水体中污染物的污染源解析问题中。其中,CA对于时间尺度的样品相似度和空间尺度的区域相似度划分较为有效(Wang et al., 2013),因此被广泛应用于河流空间区域划分中(Zhou et al., 2007; Wang et al., 2013);而比值法、FA、CMB和APCS/MLR等受体模型被广泛应用于污染源解析中(刘春慧等, 2009; 许云竹等, 2011)。

受体模型一般分为定性模型和定量模型两类(刘春慧, 2010)。由于定性污染源解析方法无法给出污染源对于污染物的贡献率,因此,一般情况下,多采用定量法进行污染源解析。不同的定量源解析方法各有优劣(刘春慧, 2010)。FA是最早的源解析方法之一,其优势是使用简单,但是缺点是污染源解析结果中存在负数,且FA对缺失数据没有处理方案(Pekey et al., 2013)。此外,FA只能定性地分析污染源,而不能提供各污染源对污染的贡献率,需要采用APCS/MLR辅助解决(Huang et al., 2010; Pekey et al., 2013)。CMB模型是应用最广泛的源解析方法之一,但是该模型对于污染源成分谱要求较高且计算较为繁琐(许云竹等, 2011)。而正定矩阵因子分解(Positive matrix factorization, PMF)是一种较新的污染源解析方法,由Paatero博士(Paatero et al., 1994; Paatero, 1997)提出,该方法可以弥补FA和CMB的不足。首先,PMF给出的污染源贡献率等数据非负,因此相较于FA等可能得到的负数,PMF的结果物理意义更加明确;其次,PMF有针对缺失数据的专门处理方法;此外,PMF无需提供各污染源的排放成分谱(刘春慧, 2010)。但是PMF的缺点是无法提前确定污染源的数量。PMF最早被应用于大气中颗粒物的污染源解析(Larsen et al., 2003; Jaeckels et al., 2007; Reff et al., 2007; Pekey et al.,

2013),近几年开始被应用于河流沉积物中的多环芳烃源解析等(许云竹等, 2011)。相较于其他一些源解析方法,PMF分析得到的结果与实测结果更接近且准确(刘春慧, 2010; Yu et al., 2013a)。

1.3 河流浮游藻类生长的影响因素及其研究进展

湖泊富营养化问题的研究目前已经较为成熟,营养盐浓度、温度、光照、水动力条件等非生物因素和浮游动物捕食等生物因素都是影响湖泊富营养化的主要因素。河流的水动力条件和资源分布等都与湖泊存在显著差异,因此,影响河流中浮游藻类生长的主要因素与影响湖泊可能有较大不同。考虑到本书的研究对象为富营养化湖泊下游出口河流中的浮游藻类,首先需要对河流中影响藻类生长的因素进行深入了解,再与湖泊中的相关因素进行对比,然后来分析湖泊型藻属进入下游河流后可能受哪些因素影响。

1.3.1 营养盐

目前被广泛接受的导致水体富营养化的基本原因是营养盐的过量排放(韩菲等, 2003; Schneider et al., 2003; Abell et al., 2010; Garnier et al., 2010),浮游藻类通过一个细胞分裂为两个相同的细胞进行繁衍(Hilton et al., 2006),一定数量的细胞分裂为两倍数量所需的时间称为倍增时间(Doubling Time, DT)。Redfield(1958)认为细胞在分裂时按一定的比例吸收碳(C)、硅(Si)、氮(N)、磷(P)等营养元素。随着细胞分裂,营养盐不断被消耗,当其中某一营养盐的含量低于生长所需的最低浓度时,藻类细胞的进一步分裂将受到限制,该营养元素被称为限制营养盐(OECD, 1982)。此时,对限制营养盐浓度需求最低或者对其利用能力最强的藻类会在与其他藻类竞争营养盐的过程中胜出,但当营养盐比率发生改变时,其他更适合的浮游藻类将成为新的优势藻属,可见浮游藻类之间的变化是由于不同的藻类有不同的最适宜生长的营养盐比例。蓝藻、绿藻对磷需求较高,对硅需求较低,蓝藻适宜低氮环境,绿藻偏好氮磷比较高的环境,而硅藻则适宜较高的硅磷比和氮磷比(Tilman, 1982; Dortch et al., 1992)。目前得到广泛认可的是P为淡水湖泊的主要限制元素,P与表征藻类生物量的

叶绿素 a(Chla)之间有较显著的正相关关系(OECD, 1982; Lynam et al., 2010; Pasztaleniec et al., 2010)。

相较之下,河流中营养盐与 Chla 的关系相对复杂,限制元素一直未有定论(Allan et al., 2007)。Bum 和 Pick(1996)针对加拿大安大略省东部 31 条河流的研究发现水体中的 P 与 Chla 呈正相关关系。Bowes 等(2011)发现英国 River Frome 自 2002 年控制污水管排放(STW)的 P 含量之后有效控制了藻类生物量。然而 Zeng 等(2006)发现在三峡的主干流中,Chla 与溶解态营养盐之间无显著的相关关系,在支流香溪河中甚至出现负相关关系。Kiss(1994)、Istvánovics 等(2012)根据匈牙利境内的 River Danube 不同年份的数据发现 Chl-a 与 N、P 之间相关性很弱。Desortová 等(2011)发现捷克 River Vltava 在 1996—2007 年间,总磷(TP)和可溶解态氮的浓度有明显下降,而 Chla 仍保持较高浓度。Søballe 等(1987)发现若水体中 P 浓度相同时,河流中的生物量要比湖泊中的生物量低几倍。Bowes 等(2012)发现在 Kennet 河中,当可溶性磷(SRP)浓度低于 $10 \mu\text{g/L}$ 时,浮游植物的生长和繁殖会明显减少,当 SRP 浓度大于 $60 \mu\text{g/L}$,对浮游藻类生物量影响不大。Westlake(1981)认为在河流里当 $\rho(\text{P}) > 30 \mu\text{g/L}$ 且 $\rho(\text{N}) > 1 \text{ mg/L}$ 时就不存在限制元素的说法。因此,Hilton 等(2006)认为营养盐是藻类生长的驱动力,但在重度富营养化的河流里不是必然的限制因素。

1.3.2 水动力条件

水流条件的改变可能对藻类生物量有重要影响,较弱的水体扰动有利于部分藻类的繁衍和聚集(吴晓辉,李其军,2010),所以湖泊表面受风扰动,藻类仍然可以大量生长;但随着流速增大、紊动加剧,藻类的生长会受到限制(王红萍等,2004; Long et al., 2011)。通常情况下(Mitrovic et al., 2003; 刘信安等,2008),每个藻种有最适生长的流速范围,在此范围内有最优生长速率。不同藻类的临界流速不同(Li et al., 2013),所以当水流逐渐加剧时,适宜生长的藻类也有所不同。Long 等(2011)建立了非恒定二维生态动力学模型,发现 0.04 m/s 是嘉陵江优势藻类生长的最佳流速。焦世珩(2007)进行室外实验时发现小球藻和纤维藻生长的临界流速分别为 0.05 m/s 和 0.01 m/s ,而流速对

栅藻和鱼腥藻的影响不大。鉴于实验过程中的控制条件以及使用仪器等的差别,目前关于藻类最优生长流速的研究结果在数值上并不统一。

河流与湖泊最显著的区别在于水动力条件的巨大差异,水力停留时间(RT)是一个用于表征不同水生态系统之间的水流条件的很好的指标,湖泊中 RT 为水体完全混合的时间,河流里面因为污染物横向混合很快,而纵向混合有限,因此河流中 RT 类似于传输时间(Hilton et al., 2006)。当 $RT < 60 \sim 100$ d 时,浮游藻类生物量受限于水流条件,而非营养盐(OECD, 1982; Søballe et al., 1987)。平均情况下,湖泊 RT 为 50~100 年,河流 RT 远短于湖泊,为 2~6 个月左右(Pidwirny, 2006),结合 1.2.1 节中讨论的河流中营养盐与 Chla 之间不明确的线性关系可知,RT 所代表的水流条件可能是冲刷较快河流中藻类生长的主要限制因素,而对 RT 较长的湖泊影响较小。许多学者的研究结果也支持 RT 是河流藻类生物量的主要限制因素(Bum et al., 1996; Neal et al., 2006; Istvánovic et al., 2012)。如果河流在传输过程中没有受到干扰且水流流速较慢,被水流夹带的浮游藻类数量 1 d 可增长 1~2 倍,在河流中下游河段浮游藻类可能发展到相当大的数量,从而暴发水华(Allan et al., 2007)。Reynolds (2006)认为当河段的 RT 为浮游藻类 DT 的 2~3 倍时,浮游藻类有可能占据主导地位。另外一个关于河流浮游藻类研究得到的最多的结论是浮游藻类生物量与流量成反比(Wetzel, 2001; Sullivan et al., 2001; Mitrovic et al., 2011),即流量增加会显著抑制河流中藻类生物量。

水动力条件对河流中浮游藻类生长的影响是直接作用还是间接作用一直备受争议。直接作用指不同流速的水流通过物理作用限制或者促进藻类的生长,间接作用是通过水流改变营养盐(Cózar et al., 2005)、光照(张运林 等, 2004)等资源或者浮游藻类生物量(Huisman et al., 2004)分布,不同藻类对资源的竞争能力不同而导致的藻类的生长或死亡。高月香等(2007)发现适量的水体紊动强度有利于微囊藻进行光合作用。颜润润等(2008)认为紊动对贫营养条件下的微囊藻生长影响显著,对富营养条件下的藻类生长影响不明显。Arin 等(2002)则认为富营养条件下,紊动加速营养盐离子向藻细胞表面的移动,从而刺激了藻类对营养盐的吸收。陈伟民等(2000)发现水体扰动增大会导致悬浮物含量明显增加,透明度降低,从而引起水下光强分布等改变,阻碍

藻类生长。

1.3.3 水下光强

光是藻类进行光合作用的主要能量来源,但是光在进入水体后会衰减,而且当水体中有颗粒物时,光线会被散射(孔繁翔等,2011;俞茜等,2015)。光在水中的光谱梯度变化是藻类光竞争演替的基础(Huisman et al., 2004),因为不同藻类除共同含有 Chla 外还可能各自含有其他色素,不同色素吸收光谱的范围不一样,所以不同的藻类有不同的适宜光照条件。蓝藻细胞内特有的藻胆蛋白(包含藻青蛋白和异藻青蛋白)与 Chla 等结合能吸收其余藻类所不能吸收的 500~600 nm 波段的绿光和黄光,因此当光照条件较低时,蓝藻的生长速率更快;小球藻体内的主要色素除 Chla 还有叶绿素 b(Chlb),Chlb 的吸收波峰在 665 nm 附近,所以小球藻属在较高光照条件下生长速率更快(孔繁翔等,2011)。

河流紊动强度较大,剧烈翻滚的水流会卷带底泥及底栖藻类至水体中,水体透光度差,致使浮游藻类生长在一定程度上受到限制,因此,光照可能是营养盐充足且 RT 较长的大型河流的主要限制因素(Cole et al., 1992; Wehr et al., 1998; Sellers et al., 2003; Allan et al., 2007)。Cole 等(1991)发现生长在 River Hudson 中的浮游藻类 1 d 中多数时间接受的光照度小于 1%,直接导致其损失量大于生长量。这一观点与 Lewis(1988)相似,Lewis 发现 Orinoco River 中的浮游藻类接受的光照太少不足以支持其生长,他认为在这些人类影响较弱的区域,河流的深度、透明度等都会直接影响水体中的光照分布,而适应在河流中生长的生长速率较快的浮游藻类通常对光照条件敏感。在一些水深且水体完全混合的河流里面,光合作用导致的藻类生物量的增长甚至与呼吸作用的损失量相平衡(Allan et al., 2007)。

1.3.4 水温

富营养化水体水华定期发生,并在不同季节优势藻类发生演替(Ha et al., 1998; 姚绪姣等,2012)。这种时间尺度上的藻类演替一方面可能是由于营养盐比例等发生了改变,但更重要的可能是温度的改变,因为不同藻类适宜生长或