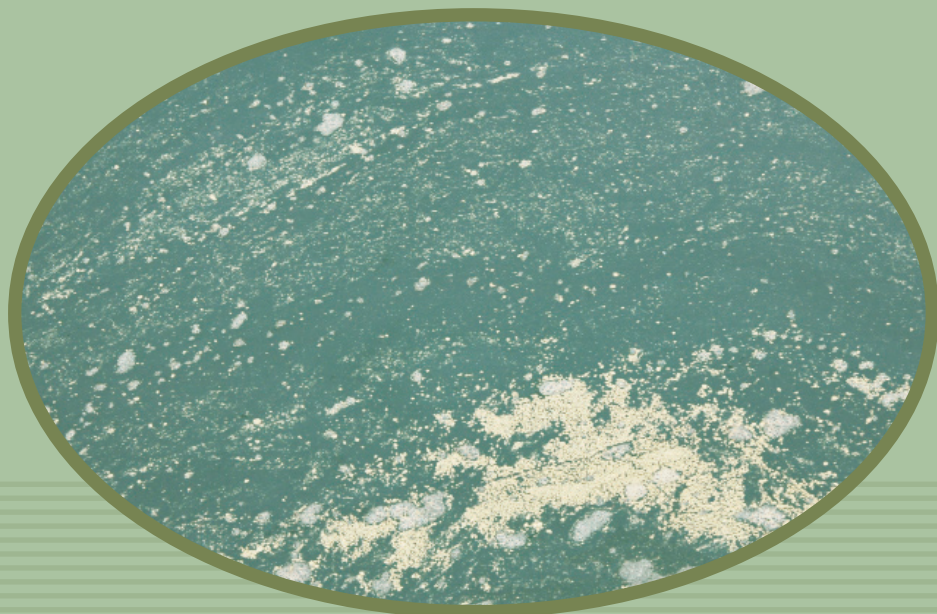


三峡库区

# 藻华形成机理及其影响因素研究

——以大宁河为例

张永生 编著



中国三峡出版传媒  
中国三峡出版社



# 三峡库区藻华形成机理及其影响因素研究 ——以大宁河为例

张永生 李海英 编著

**Mechanism of Algal Bloom Formation and Its  
environment Influence Factors in the Daning River,  
the Three Gorges**

(节选版)

中国三峡出版传媒  
中国三峡出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

三峡库区藻华形成机理及其影响因素研究: 以大宁河为例/张永生 李海英编著. —北京: 中国三峡出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-80223-922-7

I. ①三… II. ①张… ②李… III. ①三峡水利工程-水库-藻类水华-形成-研究-大宁县②三峡水利工程-水库-藻类水华-影响因素-大宁县 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 140073 号

责任编辑: 祝为平

中国三峡出版社出版发行  
(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)  
电话: (010) 66112758 66116828  
<http://www.zgsxcbs.cn>  
E-mail: sanxiaz@sina.com

北京市十月印刷有限公司印刷 新华书店经销  
2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷  
开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 7.625  
字数: 155 千字  
ISBN 978-7-80223-922-7 定价: 100.00 元

## 摘要

为探究三峡库区大宁河藻华形成机理,进而为库区重要支流藻华预警提供数据,本研究选择三峡库区重要支流——大宁河为研究对象,分析了大宁河底泥中营养盐及叶绿素的分布;研究了水体中藻细胞的分布及垂直迁移规律;并从浮力角度,在生理生态学和分子生物学水平分析了藻华形成过程各浮力提供因子及其浮力贡献,其结果如下:

1. 底泥中总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮的含量在0.0~8.0cm之间变化显著;菜子坝处总磷和无机磷含量显著高于其他3个取样点的含量,有机磷在菜子坝和大昌两个取样点含量较其他两点含量高;叶绿素含量在大昌取样点最高,4个取样点底泥0.0~8.0cm之间叶绿素含量急剧降低,底泥8.0cm之下无法检测到叶绿素;叶绿素与营养盐的分布无显著相关,仅在1月份,大昌取样点处无机磷和叶绿素的含量显著正相关,相关系数为0.87。

2. 4—9月,4个取样点蓝藻比重均逐步增大,硅藻比重逐步降低,绿藻比重变化不显著。藻密度与水温和叶绿素呈极显著相关,相关系数分别为0.97和0.95,与光照、溶解氧、pH值和可溶性磷盐呈显著相关,相关系数分别为0.87、0.83、0.82、0.82;菜子坝在整个试验期间0.0m处藻密度比其他水层的藻密度高,白水河在6和7月的2.0m处藻密度最高,双龙在7、8和9月的0.0m和2.0m处藻密度较高,大昌在整个试验期间,藻密度变化不显著。

3. 水体中,藻细胞主要以绿藻、蓝藻、硅藻和甲藻为主;藻细胞在水体中的分布不均匀,72.5%~76.2%的藻细胞集中在0.5~4.0m水体之间,白天藻细胞 Morisita 指数 (MI) 在1.41~1.97之间,夜晚 MI 指数在1.17~1.55之间,叶绿素白天 MI 指数在1.31~1.59之间,而夜晚 MI 指数在1.17~1.39之间。藻细胞在水体中垂直迁移主要发生在0.5~4.0m水体之间。水体中的藻密度受营养盐的影响较小,与可溶性总磷显著相关( $r = 0.89$ ),与温度、pH值和导电率呈极显著相关,相关系

数分别为 0.96、0.97 和 -0.99。

4. *gvpA* 基因拷贝数目与伪空胞气体相对含量呈极显著线性相关，与伪空胞直径呈极显著负相关；*gvpC* 基因内保守重复序列与伪空胞直径呈极显著正相关，与伪空胞气体相对含量、表观破裂压力、临界破裂压力呈极显著负相关。故推测：同一藻种内，*gvpA* 基因拷贝数主要是通过控制伪空胞的数量来控制伪空胞气体相对含量；伪空胞的直径不仅受到 *gvpC* 基因内保守重复序列数量影响，而且还可能受到 *gvpA* 基因拷贝数调控。

5. 伪空胞气体含量在 9℃ ~ 33℃ 之间先增加后减少，9℃ ~ 22℃ 之间伪空胞气体缓慢增加，22℃ ~ 28℃ 之间伪空胞气体含量急剧增加，28℃ ~ 33℃ 伪空胞气体缓慢减少；通过缩小温度区间方法，确定了引起伪空胞破裂的温度阈值位于 22℃ ~ 23℃ 之间；实时定量 PCR 检测 *gvpA*<sub>2</sub> 转录水平与伪空胞气体含量变化一致。

6. 藻华形成过程中有两种浮力提供因子联合为其提供浮力。室内模拟试验中，培养器取样口 2 和 3 处藻细胞受的浮力大于藻细胞的重力；太湖藻华样品伪空胞提供的浮力小于藻细胞的重力，藻群体细胞间空隙提供的浮力大于藻细胞的重力；大宁河的藻细胞样品伪空胞提供的浮力远小于藻细胞重力。因此伪空胞可以为藻细胞提供浮力使其上浮，但不能使其上浮至水面形成藻华，藻群体细胞间空隙可以为藻群体提供足够浮力使其上浮至水面形成藻华。

7. 根据藻细胞的时空分布及运动规律研究结果，提出了基于藻华形成机制的预测模型，该模型利用野外原位围隔试验测得相关参数，其短期预测效果准确率较高。

**关键词：**三峡；大宁河；太湖；藻华形成；营养盐；伪空胞；浮力因子；*gvp* 基因；藻华预警；预测模型

# ABSTRACT

To explore the mechanism of algal bloom formation and supply the base data for bloom formation warning system, in the research the distribution of nutrients and chlorophyll a in sediment were analyzed from January to April in 2011 at Caiziba, Baihuihe, Shuanglong and Dachang. The distribution and circadian vertical migration of algal cells in water were also researched from April to September in 2011. And we also analyzed the buoyancy providers and their contribution. The results were as follows:

1. Content of total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, and nitrite nitrogen changed significantly in sediment from 0.0cm to 8.0cm. Content of total phosphorus and inorganic phosphorus in sediment were highest at Caiziba. Content of nitrite nitrogen at Caiziba and Dachang were higher than that of at Baishuihe and Shuanglong. Content of chlorophyll a reduced sharply in sediment from 0.0cm to 8.0cm, but it is not close relation with the distribution of nutrient. Only in January at Dachang, there was a significant positive correlation between chlorophyll a content and that of inorganic phosphorus, correlation coefficient was 0.87.

2. From April to September, the blue algal density proportion was increasing continuously, the diatom density proportion was decreasing, and that of green algal did not change significantly in water. Algal density were extremely significant correlated with water temperature and chlorophyll a, the correlation coefficient were 0.97 and 0.95 respectively; algal density were correlated significantly with light intensity and dissolved oxygen, pH and dissoluble total phosphorus, the correlation coefficient were 0.87, 0.83, 0.82 and 0.82 respectively; Algal density in 0.0m of Caiziba was higher than that in other water depth, and in Baishuihe the highest algal density appeared in 2.0m water depth in June and July, in Shuanglong most algal cells existed in 0.0m and

2. 0m in July, August and September, in Dachang algal density in different water depth did not change significantly during of test.

3. Different algal species were found in the Daning River Bay, including cyanobacteria, green algal, dinoflagellates and diatoms etc; The distribution of algal cells was uneven, 72.5% ~ 76.2% of algal cells aggregated in 0.5m ~ 4.0m water depths from 10:00 to next day 10:00, but 7.5% ~ 16.3% of algal cells aggregated 0.0m ~ 0.5m. Morisita's indexes of algal cells were from 1.41 to 1.97 in day, but at night they were from 1.17 to 1.55. The vertical migration was also occurred at 0.5m ~ 4.0m water depths. The algal density was not significant related with concentration of nutrient except dissolved total phosphorus ( $r = 0.89$ ). The algal density was also influenced by water temperature, PH and specific conductance, and the correlation coefficients were 0.96、0.97 and  $-0.99$ , respectively.

4. *gvpA* copies are linearly relate to relative gas vesicle volume, and both have significant positive correlation; *gvpA* copies has significant negative correlation with diameter of gas vesicle, but repeated sequences of *gvpC* has significant positive correlation with diameter of gas vesicle, and has significant negative correlation with relative gas vesicle volume, appear pressure values and critical pressure values. So the results indicated *gvpA* copies control relative gas vesicle volume though the numbers of gas vesicle; diameter of gas vesicle is regulated by not only repeated sequences of *gvpC*, but also *gvpA* copies.

5. Gas vesicles volume was detected by capillary compression tubes. Three *gvpA* copies and a *gvpC* gene transcription level were also detected by real-time qPCR at temperature from 9°C to 33°C. The temperature threshold leading to gas vesicle volume change significantly was determined by reducing temperature interval. Gas vesicles volume gradually increased from 9°C to 22°C, increased quickly from 22°C to 28°C, and decreased slightly from 28°C to 33°C. Gas vesicle volume changed significantly from 22°C to 23°C. The change trend of *gvpA*<sub>2</sub> transcription level was consistent with that of gas vesicles volume.

6. There were two buoyancy providers jointly provide buoyancy for algal cells floating. In the simulation experiment, the buoyancy acting on algal cell was greater than its gravity at sample ports 2 and 3 of a columnar-cultivated cell



vessel, and intra-colony spaces was not detected. In the Taihu Lake, gas vesicle buoyancy was notably less than the total algal cell gravity. Buoyancy provided by intra-colony spaces exceeded total algal cell gravity at water surface, but not at other water depths. In the Daning River, total buoyancies provided by the two buoyancy providers were less than total algal cell gravity at different water depths.

7. An algal bloom prediction model basing its formation mechanism was proposed based on the results of algal cells spatial and temporal distribution, and their vertical movement. The parameters in prediction model were detected by enclosure experiment in field. Short-term prediction accuracy of the model was better than long-term prediction.

**Key words:** The Three Gorges; Daning River; Taihu Lake; Bloom formation; Nutrients; Gas vesicles; Buoyancy provider; *gvp* gene; Algal bloom prediction; Prediction model



# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 藻华复苏机理研究进展 .....	1
1.2 伪空胞研究进展 .....	3
1.3 藻细胞活性（酯酶）的研究进展 .....	7
1.4 研究意义 .....	7
1.5 科技需求 .....	8
1.5.1 国家需求 .....	8
1.5.2 地方需求 .....	9
1.6 研究内容 .....	9
1.7 研究目标 .....	10
1.8 研究思路 .....	10
1.9 研究路线 .....	11
第二章 三峡库区大宁河藻种种源分布与底泥营养盐的关系 .....	12
2.1 引言 .....	12
2.2 材料与方法 .....	13
2.2.1 研究地点 .....	13
2.2.2 野外采样 .....	13
2.2.3 测定方法 .....	14
2.2.4 数据处理 .....	14
2.3 结果 .....	14
2.3.1 氮元素时空分布 .....	14
2.3.2 磷元素的分布 .....	19
2.3.3 叶绿素分布 .....	21
2.3.4 叶绿素与营养盐的分布相关性 .....	22
2.4 讨论 .....	23
2.4.1 沉积物中营养盐分布的影响因素 .....	23
2.4.2 底泥中藻细胞分布与营养盐分布关系 .....	23
2.5 结论 .....	25

第三章 三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	26
3.1 引言	26
3.2 材料与方法	27
3.2.1 研究地点	27
3.2.2 野外采样	28
3.2.3 测定方法	28
3.2.4 数据处理	28
3.3 结果	28
3.3.1 环境因子及水质物理参数	28
3.3.2 藻密度及藻种随时间的变化	32
3.3.3 藻细胞空间分布	33
3.4 讨论	36
3.4.1 环境因子及水质理化指标的影响因素	36
3.4.2 藻细胞时空分布及其影响因素	39
3.4.3 藻种时空演替变化及其影响因素	39
3.5 结论	41
第四章 三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	42
4.1 引言	42
4.2 材料与方法	43
4.2.1 野外采样	43
4.2.2 测定方法	43
4.2.3 数据处理	44
4.3 结果	46
4.3.1 藻细胞的种类、形态和分布	46
4.3.2 藻细胞和叶绿素 a 的昼夜垂直迁移及变化	47
4.3.3 藻细胞分布的影响因素	50
4.4 讨论	54
4.4.1 大宁河藻细胞的垂直迁移特征	54
4.4.2 大宁河藻细胞垂直分布的影响因素	56
4.5 结论	57
第五章 <i>gvpA</i> 拷贝数与伪空胞气体含量的关系	59
5.1 引言	59
5.2 材料与方法	60
5.2.1 藻种的培养	60
5.2.2 <i>gvp</i> 基因结构	60
5.2.3 伪空胞分离和纯化	60

5.2.4	负染色电镜	61
5.2.5	检测性状	61
5.2.6	数据处理	61
5.3	结果	61
5.3.1	伪空胞的形态	61
5.3.2	伪空胞的相对气体含量	62
5.3.3	伪空胞各性状间相关性分析	64
5.4	讨论	65
5.4.1	伪空胞气体含量的决定因素	65
5.4.2	伪空胞破裂的影响因素	66
5.5	结论	67
第六章	伪空胞气体含量与 <i>gvp</i> 基因转录水平差异之间的关系	68
6.1	引言	68
6.2	材料与方法	69
6.2.1	藻种的培养	69
6.2.2	藻密度的测定	69
6.2.3	伪空胞气体测定	70
6.2.4	<i>gvp</i> 基因转录水平的差异	70
6.3	结果	71
6.3.1	伪空胞体积含量变化	71
6.3.2	<i>gvp</i> 基因转录水平	74
6.4	讨论	77
6.4.1	<i>gvp</i> 基因转录水平与伪空胞气体含量变化的关系	77
6.4.2	<i>gvp</i> 基因转录水平的影响因素	77
6.4.3	藻华形成过程的其他浮力提供因子	78
6.5	结论	79
第七章	伪空胞和群体细胞间空隙分别在藻华形成过程中的浮力贡献	80
7.1	引言	80
7.2	试验地点	81
7.3	材料与方法	82
7.3.1	室内蓝藻复苏模拟试验	82
7.3.2	野外样品处理	83
7.3.3	伪空胞和藻群体细胞间空隙浮力分析	83
7.3.4	藻细胞的重力分析	84
7.3.5	检测指标	84
7.4	结果	84

7.4.1	藻细胞聚集形态及密度 .....	84
7.4.2	伪空胞和藻群体细胞间空隙的浮力研究 .....	87
7.4.3	伪空胞和藻群体细胞间空隙的气体变化 .....	88
7.4.4	胞外多糖及细胞干重含量 .....	89
7.4.5	藻细胞的受力平衡分析 .....	89
7.5	讨论 .....	90
7.5.1	伪空胞和藻群体细胞间空隙对藻华形成的影响 .....	90
7.5.2	藻群体在藻华形成过程中的作用 .....	92
7.5.3	藻种对藻华的影响 .....	93
7.6	结论 .....	94
<b>第八章</b>	<b>基于藻华形成机理的预测模型研究</b> .....	<b>95</b>
8.1	引言 .....	95
8.2	预测原理 .....	96
8.3	评价公式 .....	97
8.4	预测步骤 .....	98
8.5	预测实例 .....	99
8.6	适用条件及优劣 .....	99
<b>第九章</b>	<b>结论及展望</b> .....	<b>101</b>
9.1	全本结论 .....	101
9.2	未来展望 .....	102
<b>第十章</b>	<b>研究创新</b> .....	<b>103</b>
10.1	基础研究 .....	103
10.2	应用研究 .....	103
<b>参考文献</b>	.....	<b>104</b>

# 第一章 绪论

我国是世界上湖泊富营养化最严重的国家之一。湖泊富营养化导致浮游藻类过度生长形成水华，从而加剧水质的恶化。在形成藻华四个阶段，即休眠、复苏、生物量增加（生长）、上浮及聚集过程中，蓝藻通过伪空胞调节自身浮力进行垂直迁移，以获取适宜的光能，得到充足的营养盐，使其成为优势藻种。因此，研究伪空胞的特性对弄清藻华形成机理有十分重要的意义。

## 1.1 藻华复苏机理研究进展

藻华暴发的突然性和严重性使人们对藻华形成机理和发生过程日益关注。孔繁翔和高光（2005）在探索藻华形成机理方面，提出了藻细胞生长需经历越冬休眠、春季复苏、生长和集聚上浮并形成水华的四阶段理论，认为在不同的阶段，藻类的生理特性不同，影响其发展的主导生态因子也不同。基于该理论，要有效控制夏季藻华，应该在蓝藻越冬休眠或者春季复苏这些藻类生命过程中最薄弱的环节，即藻类大量繁殖形成水华之前，采取更加有针对性的措施抑制蓝藻的生长，在藻类大量复苏生长前对其进行消减。因而对于藻细胞越冬过程的研究迫在眉睫。

复苏阶段，藻细胞在合适的外部环境条件下，生物量生长迅速，不同的藻细胞在水体中利用不同的方式进行运动，以获得充足的养分和适宜的生长条件。因此复苏期间藻细胞在水体中分布的生态格局和变化是影响藻华形成的重要因素。

藻细胞越冬期和复苏期是藻华形成的重要阶段。在此期间，影响藻华形成有很多因素，包括非生物因素（如温度、光强、风浪、流场、营养盐以及底质条件），及生物因素（代谢产物、底栖动物和水生植物等）。没有一个单一的因子可以独立驱动藻华的形成，但是在藻细胞的越冬及复苏阶段起主导作用的环境因子可能不同。在多数条件下，藻华的形成极有可能是这些环境因子联合作用的结果。

下面就分别对驱动藻华形成的环境因子进行讨论。

### (1) 物理因素

室内实验证明，太湖微囊藻的最适生长温度为 30 ~ 35℃，水库中的围隔实验证

实, 当水温为 26℃ 时, 最适宜于微囊藻的聚集、上浮而形成水华。水体中的光照条件会对其中生长的藻类产生重要的影响。由于蓝藻细胞体内藻胆蛋白使得蓝藻利用其他藻类所不能利用的绿、黄和橙色部分的光 (500 ~ 600nm), 从而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。此外微囊藻通过增加细胞内类胡萝卜素的含量而保护细胞免受光的抑制, 因此对强光有较大的忍受性。加之在较低的光照条件下蓝藻可以比其他藻类具有更高的生长速率。这样, 在扰动及其他浮游生物数量较多的条件下, 蓝藻就具有更多的竞争优势。此外, 水文、气候、气象等条件也可以通过影响湖泊水体的分层、混合以及光照、营养盐的可利用性等, 从而直接或间接地影响蓝藻种群的细胞密度、种群组成、垂直分布、生命周期等。直接作用是由于风浪和湖流的运动将湖区内的蓝藻吹向湖岸, 形成水华; 而间接作用, 尤其在大型浅水湖泊中, 可能更多的是由于风浪的扰动, 导致了大量的营养盐从沉积物中释放出来, 大大增加了水体中藻类可利用的营养盐含量。

### (2) 化学因素

伴随着湖泊的富营养化, 尤其是水体中磷浓度的增加, 通常会导致水体中浮游植物的种群组成朝着形成水华的蓝藻演替。水体中总氮总磷比 (TN: TP) 会显著影响浮游植物的种群组成, 当 TN: TP < 29 时, 可以形成水华的蓝藻会占优势。但最近的研究结果表明, 在较高的 TN: TP 的情况下, 水体中也会形成蓝藻的水华, 较低的 TN: TP 并不是藻华形成的条件, 而是藻华产生的结果。当水体中溶解性磷的浓度 > 0.01mg/L 时, 磷浓度的降低不会导致藻类生物量的减少。在湖泊富营养化过程的早期, 磷作为藻类的生长限制性因子, 其含量的增加, 导致了藻类的大量生长。美国生态学家 ODUM 提出“限制因子规律只有在严格的稳定条件下才能成立”的观点, 湖泊并不是一个封闭的生态系统, 因此引起水华暴发的限制性因子已经发生了转换, 有可能其他环境因素成为了藻类生长与水华暴发的限制因子, 而营养元素的浓度只是人们可以控制的诱导因素之一。

### (3) 生物因素

相对于物理因素和化学因素, 对藻华形成的生物学因素, 尤其是生物种群间相互作用的因子研究较少。已有的研究主要关注的是, 藻种本身的生理生态特征在形成优势种群过程中的作用。例如, 为了获取适宜的光辐射, 蓝藻常常会以形成表层水华的方式作为其适应环境的生态对策的一部分。许多种类的藻细胞中具有的气囊, 使得它们能够悬浮在水中, 同时可以通过调节浮力来控制它们在水体中的垂直分布、昼夜迁移及形成水华的能力。这种通过浮力的控制一方面使得它们能更好地适应环境的变化, 例如: 漂浮到表层, 增加获得光照的条件, 迁移到营养盐较适宜的位置, 增加营养盐供给; 另一方面, 水华蓝藻通过细胞分裂和胶鞘形成, 形成了细胞数量很多的群体, 不仅增强了下沉和上浮的速度, 而且减少了沉积的损失。蓝藻的这种能够进行垂直迁移的特性, 使得它们在与其它藻类竞争营养盐, 尤其是在竞争光照的方面具有明显优势。近期许多研究还提出了蓝藻成为优势种的其他原因, 例如:



蓝藻对低温以及低光强和紫外线的适应，与其他藻类相比，可以过量摄取无机碳和营养物质的能力；由于形成群体胶鞘，降低了被浮游动物摄食的可能；分泌藻毒素对其他物种生长进行抑制等。

藻华形成受到多种因素影响。目前这些研究主要从藻细胞的外部环境因子、富营养化因子、水动力学因子等方面对藻华的形成开展讨论，这些研究理清了某些湖库藻华形成的具体过程，为预测藻华形成提供了部分依据。但是中国幅员辽阔，不同地区的湖库生态并不相同，因此某一湖库的藻华形成规律并不能代表我国大部分湖库的藻华形成模式，并且目前藻华的形成机理研究大部分集中在外部环境因子对藻华形成的影响；作为一种生物，藻细胞在形成藻华的时候，其自身内部生理及部分基因也会发生改变，而这种自身内部的改变对藻华的形成影响远远大于外部环境因子的影响，但是这方面的研究相对较少。

目前，很少有研究关注在极端环境中，尤其是在越冬期底泥表面低温黑暗条件下藻细胞生存的生理生态和空间分布特征，而这恰恰是蓝藻生命周期中必须经历且最为薄弱的环节。藻细胞在底泥越冬，为来年藻华暴发提供“种源”，其过程十分复杂；且关于冬季底泥中蓝藻“种源”在不同湖区的分布与夏季水华暴发之间是否有空间上的相关性，至今尚无明确定论。

## 1.2 伪空胞研究进展

藻华形成之前，藻细胞为了在水体中获得足够营养和适宜的生长环境，会经常在水体中做垂直迁移运动。目前研究认为，为藻细胞提供浮力的主要器官是——伪空胞。

1895 德国微生物学家 Klebahn 利用光学显微镜观察到蓝藻细胞内存有含有气体的伪空胞，伪空胞是两末端呈圆锥状的中空圆柱体（图 1-1）（Larsen *et al.*, 1967）。冷冻断裂细胞图片（图 1-2）（Pfennig *et al.*, 1967）和负染色电镜图片也证实了这样的结构特点（Stoeckenius *et al.*, 1968）。

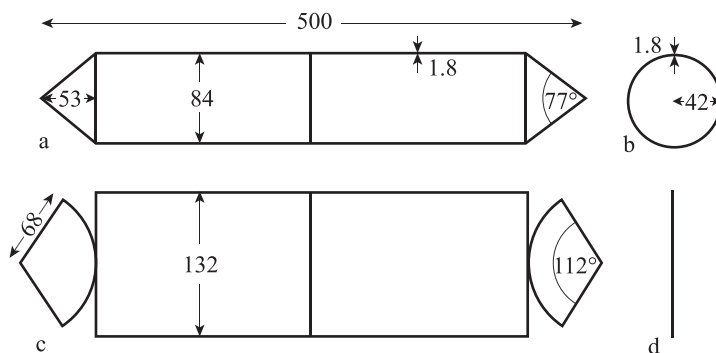


图 1-1 *Anabaena* 伪空胞的几何特征 (/nm)

a: 完整伪空胞的纵切面；b: a 图的横切面；c: 破裂伪空胞的纵切面；d: c 图的横切面

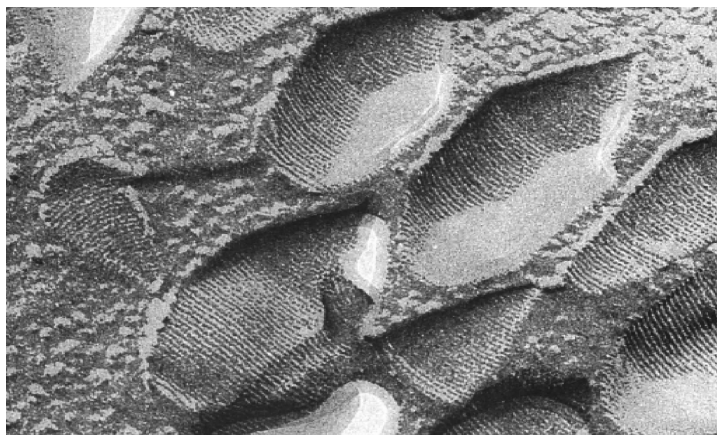


图 1-2 *Prosthecomicrobium pneumaticum* 伪空胞在冷冻细胞的剖面图

伪空胞的气体含量测定有很多方法，其绝对气体可以利用改进的 Walsby 伪空胞测定装置（图 1-3）测得（Oliver *et al.*, 1968），也可以按照 Walsby 等人对纯化的水华鱼腥藻伪空胞的测量值来进行估算：1 mg 伪空胞在 500 nm 处的压力敏感衰减值为  $20.84 \text{ cm}^{-1}$ （Walsby *et al.*, 1973）。

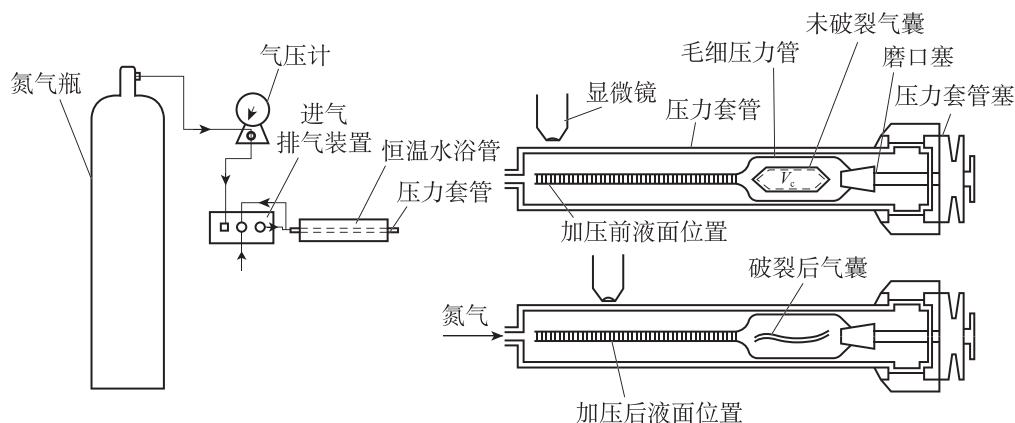


图 1-3 伪空胞体积测定装置示意图

伪空胞的相对气体含量则可以通过压力浊度计测定。由于伪空胞的结构会对光线发生散射作用，藻细胞被加压后，引起伪空胞的破裂，光线通过藻样后光值发生变化，通过光值变化便可以估算出细胞中伪空胞的相对含量（RGV）和一定压强下破裂伪空胞所占有的比率（C%）（Walsby *et al.*, 1973）：

$$RGV = \Delta T_a / T_c$$

$$\Delta T_a = T - T_c$$

$$C\% = (T - T_b) / (T - T_c) \times 100$$

其中， $\Delta T_a$  为所有伪空胞破裂前后比浊度的变化值； $T_b$  是加压后部分伪空胞破

裂时细胞悬液的比浊度； $T_c$ 为所有伪空胞破裂后细胞内其他物质的比浊度； $T$ 为初始细胞悬液的比浊度。

细胞中伪空胞的体积、临界压强和相对含量等参数还可以利用流式细胞仪和高斯-牛顿方程计算得到 (Brookes *et al.*, 2000):

$$y\% = (S_p - S_f) / (S_a - S_f) \times 100$$

$$y = M \frac{1}{1 + e^{a-bx}}$$

其中,  $y$  是某一压强下剩余伪空胞的百分含量;  $S_p$  是某一压强下部分伪空胞破裂后悬液的 SSC (side scatter) 值;  $S_f$  是伪空胞全部破裂后悬液的 SSC 值;  $S_a$  是伪空胞全部完整时悬液的 SSC 值;  $M$  是没有加压时的伪空胞百分含量 (= 100%);  $x$  是悬液受到的压强。表观压强  $P_a$  (悬液中还剩余 50% 完整伪空胞时的压强) 和临界压强  $P_c$  (悬液中加入 0.5M 蔗糖后剩余 50% 完整伪空胞时的压强) 可以利用各自的破裂-压力曲线和高斯-牛顿方程计算可得, 即  $y = 50\%$ , 则  $x = a/b$ 。细胞膨压  $P_i = P_c - P_a$ 。

迄今为止, 文献共报道 14 个不同的基因与伪空胞的形成有关 (Blaurock *et al.*, 1967; Smith *et al.*, 1967; Jones *et al.*, 1971; Walker *et al.*, 1983; Walsby *et al.*, 1988), 它们成簇排列。但是哪些是伪空胞合成所必需的基因并不清楚。*gvpA*、*gvpF*、*gvpG*、*gvpJ*、*gvpL* 和 *gvpM* 几乎在所有伪空胞的微生物中出现 (Damerval *et al.*, 1987; Horne *et al.*, 1989; Blaseio *et al.*, 1990; Englert *et al.*, 1992), 因此推测它们是合成伪空胞所必需的。在这些基因中, *gvpA* 和 *gvpC* 研究最为透彻。

Walker 等人对水华鱼腥藻的伪空胞进行氨基酸测序, 得到一个具有 70 个残基序列 (Kinsman *et al.*, 1997; Beard *et al.*, 1997)。该序列就是 *gvpA* 蛋白, 是伪空胞的主要组分, 具有很强的疏水特性 (Albouy *et al.*, 2001)。*gvpA* 是一个保守性很强的蛋白, 在不同蓝藻之间具有很高的相似性 (Mlouka *et al.*, 2004)。大多数藻细胞的伪空胞中含有多个 *gvpA* 基因拷贝。不同的藻细胞中, *gvpA* 基因拷贝数不同: PCC7806 和 PCC9354 基因组中均含有 3 个 *gvpA* 拷贝 (Li *et al.*, 1998); 丝状蓝藻拟鱼腥藻 PCC6901 中只含有 1 个 *gvpA* 拷贝, 伪空胞的含量较少, 不能使细胞漂浮起来, 只能减少藻细胞密度和沉降速率 (Offner *et al.*, 2000); 水华鱼腥藻中含有 7 个串联的 *gvpA* 拷贝 (Bentley *et al.*, 2000); 而 BC8401 中只含有 2 个 *gvpA* 拷贝 (Shukla *et al.*, 2004)。*gvpA* 基因多拷贝的原因可能是: 转录是伪空胞合成的限速步骤, 具有多个 *gvpA* 拷贝的个体更加有利于自然选择 (Walsby *et al.*, 1994)。*gvpA* 基因的拷贝数是否与伪空胞的含量存在线性关系需要进一步的试验证明。

绝大多数蓝藻藻株中只存在一个 *gvpC* 基因, 位于 *gvpA* 基因下游, 只编码一种 *gvpC* 蛋白, *gvpC* 蛋白是伪空胞的重要组成蛋白之一, 该蛋白亲水残基占优势, 因而具有亲水性。*gvpC* 蛋白是由高度保守的 33 个氨基酸残基重复序列单位组成 (Walker *et al.*, 1983; Jones *et al.*, 1991)。蓝藻 *gvpC* 蛋白的差异表现在保守重复单位数量

上的差异。不同微囊藻株中 *gvpC* 蛋白里保守重复的数量不同 (Shukla *et al.*, 2004)。在眉藻的 *gvpC* 上保守序列串联重复了 4 次, 而在鱼腥藻的蛋白上重复了 5 次 (Walsby *et al.*, 1994)。

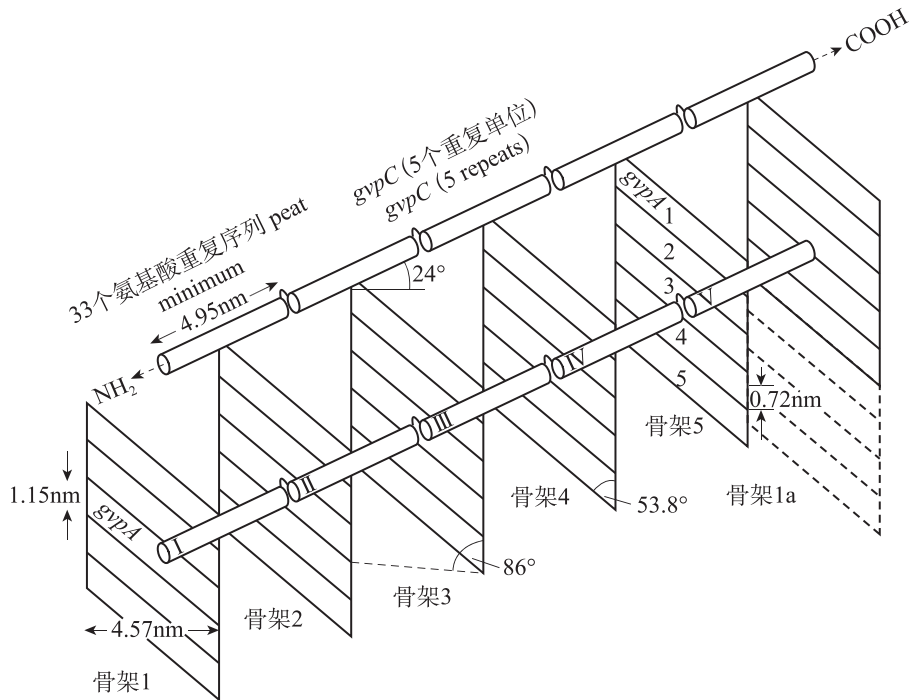


图 1-4 *gvpC* 蛋白与 *gvpA* 骨架结合的模式

目前, 关于蓝藻 *gvp* 基因表达调控方面的研究鲜有报道。拟鱼腥藻 PCC6901 从低光强 ( $5 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 转移到高光强 ( $50 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 时, *gvpA* 的转录量逐渐减少, 重新放置低光强后, *gvpA* 的转录子在 12 小时后再次达到最初的表达量 (Offner *et al.*, 2000)。眉藻 PCC7601 的 *gvpABC* 操纵子上游只有一个转录起始位点, 位于 *gvpA* 基因上游的 -56 核苷酸处; 另外一个转录子是反义 RNA, 起始于 *gvpA*<sub>2</sub> 的 3' 末端, 并延伸至 *gvpA* 基因中, 该转录可能会削弱 *gvp* 基因的转录 (Dunton *et al.*, 2005)。水华束丝藻的伪空胞含量随着光强的增加有所下降 (Hayes *et al.*, 1988), 但没有研究表明这种变化是否与 *gvp* 基因表达调控有关, 因为该藻种的伪空胞含量还受到磷浓度变化的影响, 但机理并不清楚。许敏和徐旭东等人利用微囊藻 FACHB930 为材料, 在不同温度、光照强度、氮源、碳源以及 pH 值条件下研究了蓝藻漂浮与 *gvp* 基因转录调控的关系: 在不同初始 pH 条件下, 3 个 *gvpA* 拷贝和 1 个 *gvpC* 基因的转录水平存在差异; 实时荧光定量 PCR 的方法证实了微囊藻 FACHB930 中 3 个 *gvpA* 拷贝与 1 个 *gvpC* 基因的转录调节是相互协调的 (Xu, 2006)。

### 1.3 藻细胞活性（酯酶）的研究进展

藻华“暴发”之前，水体中已存在大量的藻细胞。“藻华”仅仅是藻细胞或藻群体在气象与水文条件适合的情况下，上浮、聚集到水面的结果，因此藻华形成仅仅是藻细胞在空间位置上发生改变。藻华的出现，从表观上看是瞬时的“暴发”，但是其本质是一个逐渐发展与形成的过程，是藻类生物量在水体中逐渐增加的一个缓慢、可以预测的过程。其前提仍然是水体中已经存在较大的藻类生物量。

影响藻细胞生物量的因素很多，前面提及的物理化学及生物因素都有可能是影响藻细胞生物量的因素，但这些因素都是藻细胞自身外部的环境因子，而且这些因子都是通过细胞内各种酶的作用影响藻细胞的活性，进而影响藻细胞的生物量。

酯酶是单细胞藻类生长发育不可缺少的酶之一，对环境的变化比较敏感，它是催化酯类化合物水解并进入中间代谢的重要酶类。酯酶同时还是一种严格的胞内酶，主要存在于浮游植物细胞体内，而异养细菌和浮游动物的胞内酯酶含量基本可以忽略不计。

酯酶是细胞膜磷脂周转中必需的一种酶，酯酶活性高说明细胞的代谢活性和活力高，该酶一般被应用在毒性试验上判断细胞的活性，但是近来也被应用到检测细胞营养状态的试验中来，若藻细胞受到营养限制，细胞活性就会下降，酯酶活性也会降低。酯酶活性在许多生物体中被认为是敏感可靠的毒理学指标。荧光素二乙酸酯（Fluorescein diacetate, FDA）是一种合适的代谢探针，它能较容易地渗透到细胞内并在胞内被酯酶转化成荧光沉淀物，其荧光强度可以反映酯酶的活性状态，从而用来评估浮游生物细胞的代谢活性。酯酶检测以其快速、灵敏的特点越来越多地被应用为检测环境压力的方法。

### 1.4 研究意义

目前，随着我国的工农业发展，湖库富营养化趋势加重，藻华现象时常发生，部分湖库的生态安全存在潜在威胁，因此有必要对这些问题进行深入、细致的研究，以期为我国环境改善提供理论依据。

自2007年以来，太湖发生严重的藻华，科学家加大了对藻华现象的研究力度。研究主要从藻细胞的外部环境因子、富营养化因子、水动力学因子等方面对藻华的形成开展讨论，这些研究理清了太湖藻华形成的具体过程，为预测和防治藻华形成提供了部分依据，但仍有部分关键的科学问题无法解决（图1-5），而且中国幅员辽阔，不同地区的湖库生态并不相同，太湖藻华形成规律并不能代表我国大部分湖库的藻华形成模式。目前藻华的形成机理研究大部分集中在外部环境因子对藻华形成的影响。作为一种生物，藻细胞在形成藻华的时候，其自身内部生理及部分基因

也会发生改变，而这种自身内部的改变对藻华形成的影响远远大于外部环境因子的影响，但是这方面的研究相对较少。

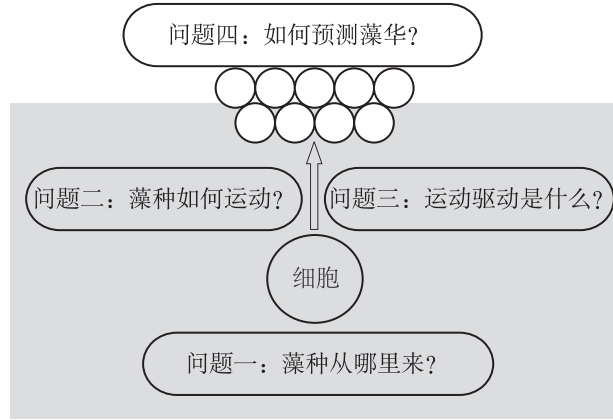


图 1-5 藻华形成过程中的关键科学问题

三峡工程是举世瞩目的特大型水利枢纽工程，它的兴建在防洪、发电、航运等方面带来了巨大的经济效益，同时，也对库区的生态环境产生了显著的影响。三峡水库蓄水后，库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长，水域环境发生了巨大变化，水生生物群落也随之发生了根本性改变。特别是因受水库回水顶托，库湾和部分支流污染加重，藻密度增高，而且呈逐年加重趋势，极易形成藻华。

但是目前未见三峡库区藻华形成机理的系统研究，对于藻种“汇”与“源”的研究、不同藻种的时空分布研究以及藻细胞的复苏研究相对较少，因此探究三峡库区支流的藻华形成机理，不仅对保护三峡库区的良好生态至关重要，而且还可以为后期水利枢纽的建设及水环境影响研究提供借鉴。

## 1.5 科技需求

### 1.5.1 国家需求

三峡大坝自截流以来，库区水体由天然河道改变为人工水库，库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长，特别是因受水库回水顶托，库湾和部分支流污染加重，局部水域部分时段已出现富营养化现象，这种水域环境的变化导致了整个库区水体水质及水生态系统的变化：浮游生物量增加，支流出现藻华。藻华往往又会对水生态造成更大的危害，因此，及时探究三峡库区的藻华形成机理，为预测藻华形成地点和时间提供数据，对保护三峡库区生态环境都有积极的影响。

### 1.5.2 地方需求

大宁河是三峡库区重要的支流，发源于巫溪县境，自北向南于龙溪镇进入巫山县后，流经水口、大昌、洋溪、双龙、巫峡镇汇入长江，流经区域既有原来的农田，也有原来的村寨，流域面积达 34315 平方公里，多年平均流量 9814 立方米/秒，是长江典型的支流水系。近几年，在大宁河出现过藻华现象，虽然没有像太湖藻华那么严重，但是作为库区周边地区居民的饮用水源地，藻华现象引起的水质问题应该引起足够的重视，因此应该对大宁河的藻华形成机理开展相关研究，从而进一步预防藻华的生成，避免产生较为严重的水危机。

## 1.6 研究内容

本研究依托水专项三峡项目，紧密结合水专项三峡项目在实际需求，在以下五个方面开展三峡库区大宁河藻华形成机理研究：

### (1) 大宁河藻华“汇”与“源”的藕联研究

通过调查大宁河底泥中叶绿素的含量、总氮、氨氮、硝态氮、总磷、无机磷和有机磷的时空分布，分析叶绿素与营养盐之间的分布关系；结合大宁河夏季藻华可能出现的区域，探究藻华与营养盐之间的藕联关系。

### (2) 大宁河藻细胞在水体中时空分布研究

通过调查藻华复苏期水体中的藻细胞的垂直分布及各营养盐的含量，分析藻细胞的分布与营养盐的分布关系；确定影响藻细胞在水体中分布的主要影响因素。

### (3) 大宁河藻细胞的昼夜垂直迁移规律特征研究

通过设计和设置野外原位试验围格装置，昼夜监测围格内外藻细胞的垂直迁移规律，分析大宁河典型区域的藻细胞垂直迁移规律，确定藻细胞垂直迁移规律的影响因素，并探讨建立基于藻细胞垂直分布和垂直迁移的藻华预警体系的可能性。

### (4) *gvpA* 的拷贝数与伪空胞气体含量的关系研究

通过分析伪空胞 *gvp* 基因特征，比对不同藻细胞 *gvpA* 的拷贝数，进而测定不同藻种的伪空胞的长度、宽度及气体含量，分析 *gvpA* 的拷贝数与伪空胞气体含量之间的关系。

### (5) 藻华形成过程中的浮力贡献机制研究

通过测量藻细胞上浮过程中伪空胞的气体变化，计算伪空胞在不同水层为藻细胞提供的浮力；分析 *gvp* 基因在不同温度下转录水平差异，在分子水平确定伪空胞气体显著变化的温度阈值。

根据野外藻华形态，提出藻群体是藻华形成过程中的浮力提供因子；并定量分析了不同水层藻群体细胞空隙的气体含量及其为藻群体提供的浮力贡献，进而区分藻群体细胞间空隙和伪空胞分别为藻华形成提供浮力的贡献。

## 1.7 研究目标

依据大宁河冬春季节底泥和水体中藻细胞的时空分布，阐述藻华“源”与“汇”的藕连关系。

调查大宁河藻细胞在复苏期的时空分布，阐述此时期藻细胞在整个流域水体中的分布状况。

通过昼夜连续检测藻细胞在水体中的分布，分析藻细胞在此期间的垂直迁移规律。

通过检测伪空胞和藻群体细胞间空隙气体含量，分析藻细胞的受力状况，区分两者分别在藻华形成过程中的浮力贡献。

## 1.8 研究思路

本研究思路：首先从宏观着眼，发现需要解决的问题，然后从微观入手开展相关研究，力求用微观的研究数据支撑宏观现象（图 1-6）。其具体思路如下：

首先从宏观角度着眼，从生态学角度调查大宁河流域冬春季节底泥中及复苏期水体中藻细胞时空分布；其次综合分析底泥与水体中藻细胞的时空分布之间的关系，在此基础上分析藻细胞在水体中的垂直迁移运动特征；最后从微观角度着手，分析三峡水库大宁河藻华的形态特征，在伪空胞和藻群体细胞间空隙两个方面阐述藻细胞在复苏过程中的浮力来源。

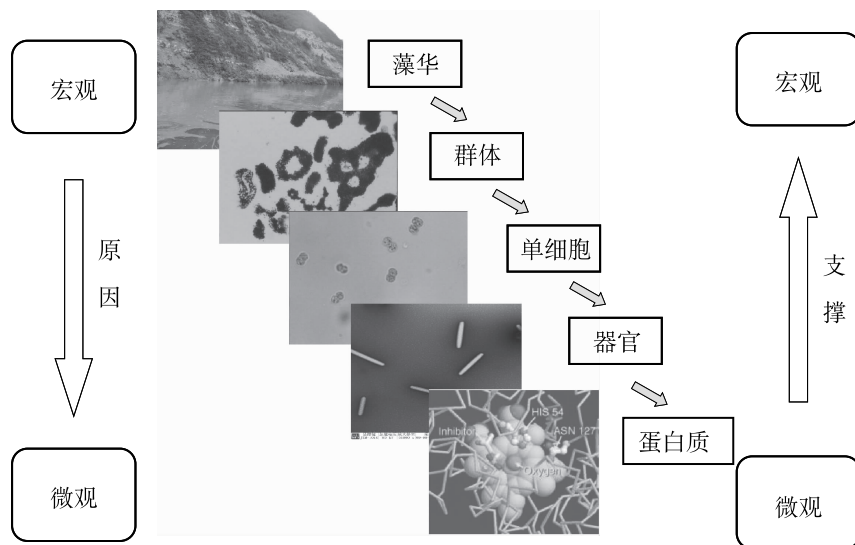


图 1-6 本研究的思路



## 1.9 研究路线

根据本研究思路及主要的研究内容，试验路线设置如下：

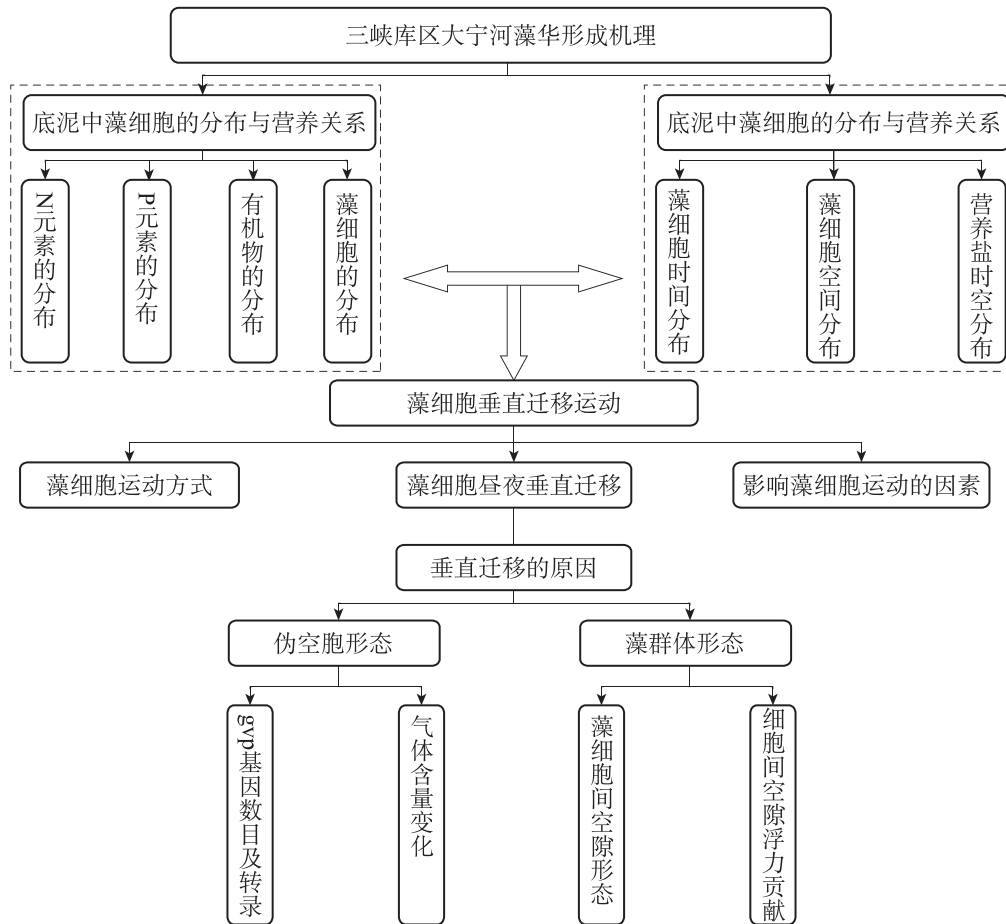


图 1-7 本研究技术路线

## 第二章 三峡库区大宁河藻种种源分布与底泥营养盐的关系

### 2.1 引言

近年来,我国部分湖库富营养化严重,频繁发生藻华灾害,严重影响湖泊生态安全和居民饮用水安全(秦伯强,2009;孔繁翔,2009;郑丙辉,2011)。为了预测藻华的暴发,科学家们对藻华的形成机理进行坚持不懈的探索,迄今研究表明,藻华的形成基本可以分为4个阶段:越冬、复苏、生长及消亡(孔繁翔,2006,2009)。

底泥中的藻细胞分布对预测次年藻华发生的地点是至关重要的。越冬期,微囊藻聚集在水库和湖泊中底泥表面,为次年的藻华提供藻源(Reynolds 1976, Topachevskiy et al. 1969),<sup>15</sup>N 稳定性同位素示踪的方法证实,夏季水体中的初期发生的微囊藻水华主要来源于底泥中的越冬微囊藻群体(Preston 1980)。Reynolds et al (1981)认为越冬的底泥微囊藻进入到水柱的数量有限,水华的形成是因为水柱中蓝藻的大量生长所致。但是 Verspagen 等(2004)认为微囊藻从底泥到水中的复苏是一个由于外来风力或生物扰动所产生的再次悬浮的被动过程。季健等通过分析越冬期太湖底泥中藻细胞时空分布,预测次年藻华的种源地在梅梁湾(季健,2009)。

藻种时空分布与底泥的营养盐有密切关系。范成新等(2000)曾对太湖主要湖区底泥中的氮、磷形态及含量进行了分析。季健和苗秀珍分析了年际间太湖底泥营养盐和叶绿素的含量,并初步分析了营养盐与叶绿素分布之间的关系,结果表明总磷与叶绿素在2月份呈显著相关(季健,2009)。

三峡水库蓄水以来,支流流速减缓,泥沙沉降(郑丙辉,2009),库湾和支流污染物的滞留时间延长(吴光应,2005),导致支流藻密度较高,极易形成藻华(张永生,2011,2012)。大宁河是三峡库区重要的支流,是著名风景区——小三峡所在河流,该河流回水区段淹没区域既有原来的农田,又有原来的村寨,还有V字形峡谷(吴光应,2005;张永生,2011),底泥特征并不一致。迄今在大宁河发生过几次较大的藻华(张永生,2012),但是对于藻华种源是否来源于底泥还不得而

知，并且目前没有发现关于大宁河底泥营养盐分布的相关报道，因此，为进一步探究大宁河流域藻华形成机理并为建立基于藻华形成机理的藻华预警体系，分析大宁河营养盐分布以及营养盐与藻细胞分布关系是极为必要的。

## 2.2 材料与方法

### 2.2.1 研究地点

本研究选择三峡库区大宁河流域 4 个具有代表性采样位点，分别是菜子坝、白水河、双龙及大昌（图 2-1）。菜子坝是大宁河支流与长江干流的交汇处，其河底既有巫山县城老城区的城市土地，又有原来大宁河河道的沉积物；白水河是大宁河流域典型的河湾，其河底平坦，蓄水前多为农田，此种类型的河湾在大宁河流域较为常见；双龙取样点属峡谷航道，两岸为石质峭壁，河流横断面为“V”形，其底部多为沙砾及砾石；大昌取样点位于古城原址，蓄水后大宁河的回水最上端区域。

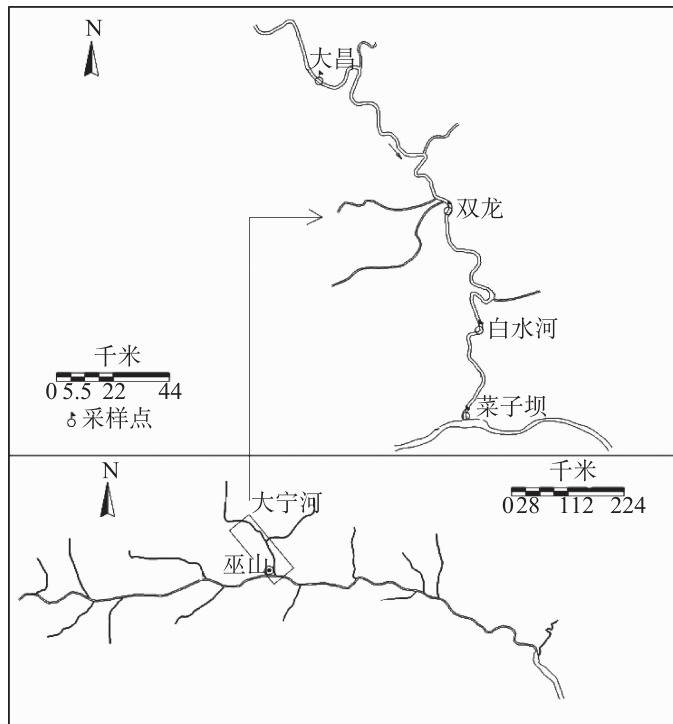


图 2-1 采样点在三峡库区的地理位置示意

### 2.2.2 野外采样

由于大昌取样点在 2007 年 12 月还曾出现过大规模藻华现象，为了真实反映越冬藻细胞的所在场所，野外底泥取样试验于 2011 年 1~4 月进行，每月取样 1 次。

利用内径为 60mm 的垂直重力柱状采泥器采集底泥样品，按采样厚度要求切取底泥移至密封袋中，放入保温箱内冷藏保存。在每个采样点采集三份平行样品，测定结果取其平均值。

### 2.2.3 测定方法

总氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、无机磷和有机磷在实验室测定。水质总氮的测定利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法（GB/T 11894—1989），硝酸盐氮的测定利用紫外分光光度法（HJ/T 346—2007），亚硝酸盐氮的测定利用分光光度法（GB/T 7493—87），铵态氮的测定利用纳氏试剂光度法（HJ 535—2009），总磷的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法（GB 11893—89），无机磷的测定利用磷钼蓝比色法（SMT），有机磷的测定利用磷钼蓝比色法（SMT）。

叶绿素的测定：称取一定量解冻后的底泥样品，于室内风干至恒重，称取 5g 研磨好的样品放入研钵中，加入 90% 丙酮溶液 2mL，仔细研磨 5min，转移至 10mL 具塞离心管中，于 4℃ 黑暗条件下静置 8 ~ 10h，4000g 的转速离心 5min，上清液转移至 10mL 容量瓶中，最后用 90% 丙酮定容至 10mL。此待测液用于测定叶绿素含量。

### 2.2.4 数据处理

每个样品相关指标测定重复 3 次，取其平均；相关性分析利用 SPSS 16.0 处理， $P < 0.05$  为显著性相关， $P < 0.01$  时为极显著相关。

## 2.3 结果

### 2.3.1 氮元素时空分布

#### 2.3.1.1 总氮

1—4 月，菜子坝沉积物 0.0 ~ -2.0cm 之间的总氮含量分别为 1215、1186、1276 和 1198mg/kg，其量显著高于其他深层的该元素含量，随着沉积物的深度增加，该元素含量迅速下降，在沉积物 -4.0cm ~ -12.0cm 之间，总氮元素变化不显著，从 -12.0cm 该元素含量又呈现上升趋势，在 -16.0cm 处再次达到顶点。其含量分别为 849、831、876 和 821 mg/kg，随后其含量再次下降。

1—4 月，白水河沉积物中氮元素含量最高的位置出现在 -16.0cm 处，其含量分别为 1042、994、964 和 942 mg/kg，含量次高点出现在 -4.0cm 处，其含量分别为 920、906、932 和 906 mg/kg，-4.0cm ~ -12.0cm 之间，总氮元素变化不显著，-16.0cm ~ -20.0cm 之间，总氮元素变化也不显著。

1—4 月，双龙处沉积物氮元素含量范围分别在 609 ~ 709 mg/kg，604 ~ 701 mg/kg，604 ~ 688 mg/kg，629 ~ 698 mg/kg；大昌处沉积物氮元素范围分别在 641 ~ 812mg/

kg, 632 ~ 720 mg/kg, 606 ~ 701 mg/kg, 651 ~ 714 mg/kg。双龙处沉积物各层的氮元素差异不显著, 大昌处沉积物中 -12.0cm ~ -14.0m 除了在 1 月份高达 812 mg/kg, 其他月份大昌沉积物各层氮元素差异不显著。(图 2-2)

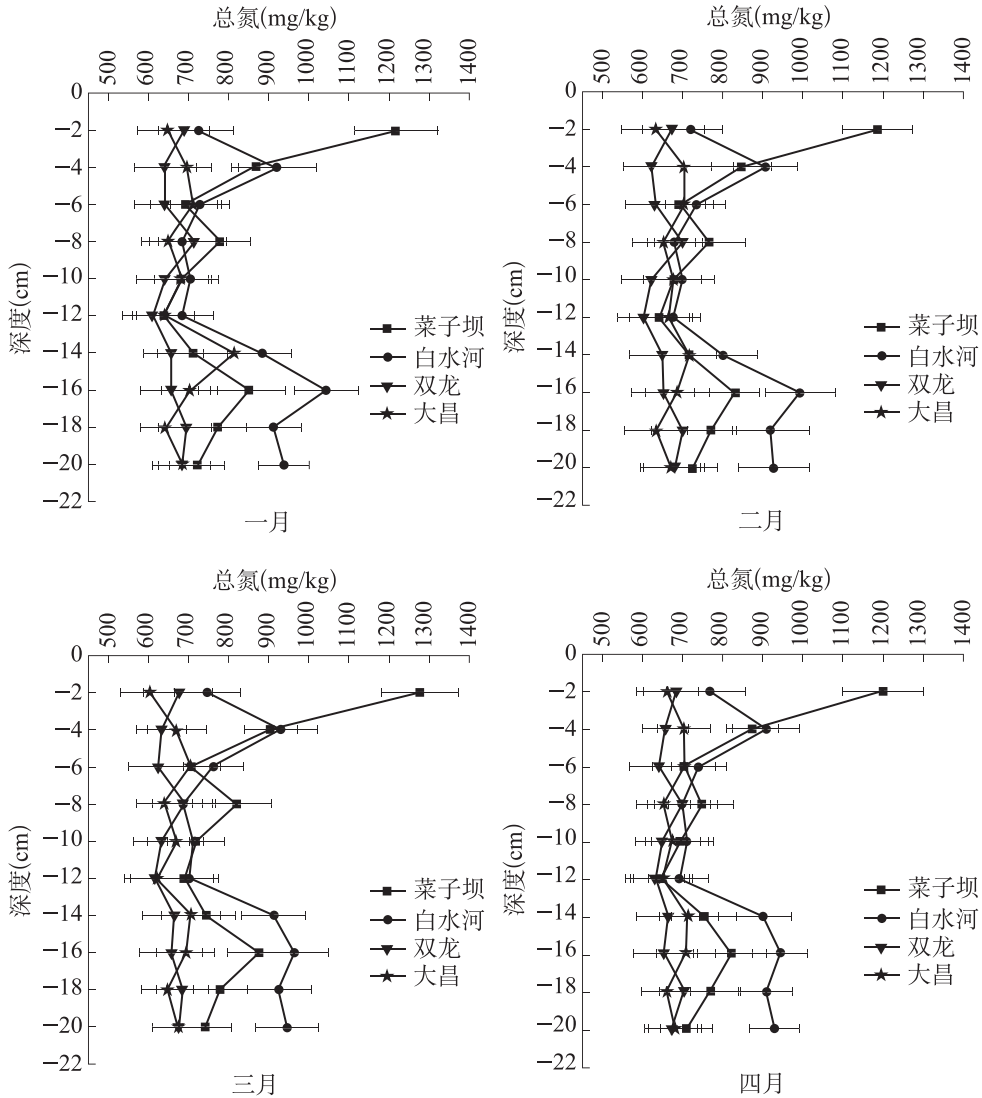


图 2-2 底泥中总氮的含量分布

### 2.3.1.2 氨氮

1—4 月, 菜子坝沉积物 0.0 ~ -4.0cm 之间的氨氮含量较高, 其最高含量位于 -2.0 ~ -4.0cm, 分别为 58.32、58.08、58.31 和 56.32mg/kg, 其他分层内氨氮在 4 个月份中均不显著。

1—3 月, 白水河沉积物中 0.0 ~ -2.0cm 氨氮含量最低, 其含量分别为 24.3、25.2 和 28.3 mg/kg, 该分层 4 月份的氨氮含量为 30.2 mg/kg, 4 月份沉积物中

-140.0 ~ -16.0cm 之间氨氮含量最低, 为 28.4 mg/kg。4 个月份沉积物在 0.0 ~ -6.0cm 分层中氨氮含量呈现上升趋势, 其中 -4.0 ~ -6.0cm 分层中含量最高为 53.46、53.13、42.28 和 46.83 mg/kg, 其含量在其他分层中变化不显著, 均位于 29.42 ~ 42.19 mg/kg。

1—4 月, 双龙处沉积物中仅在 -12.0cm ~ -14.0m 分层中略高 40 mg/kg, 其他分层氨氮含量差异不显著。

1—4 月, 大昌在 4 个取样点中, 沉积物中氨氮平均含量最高分别为 40.18、39.99、40.11 和 39.20 mg/kg。(图 2-3)

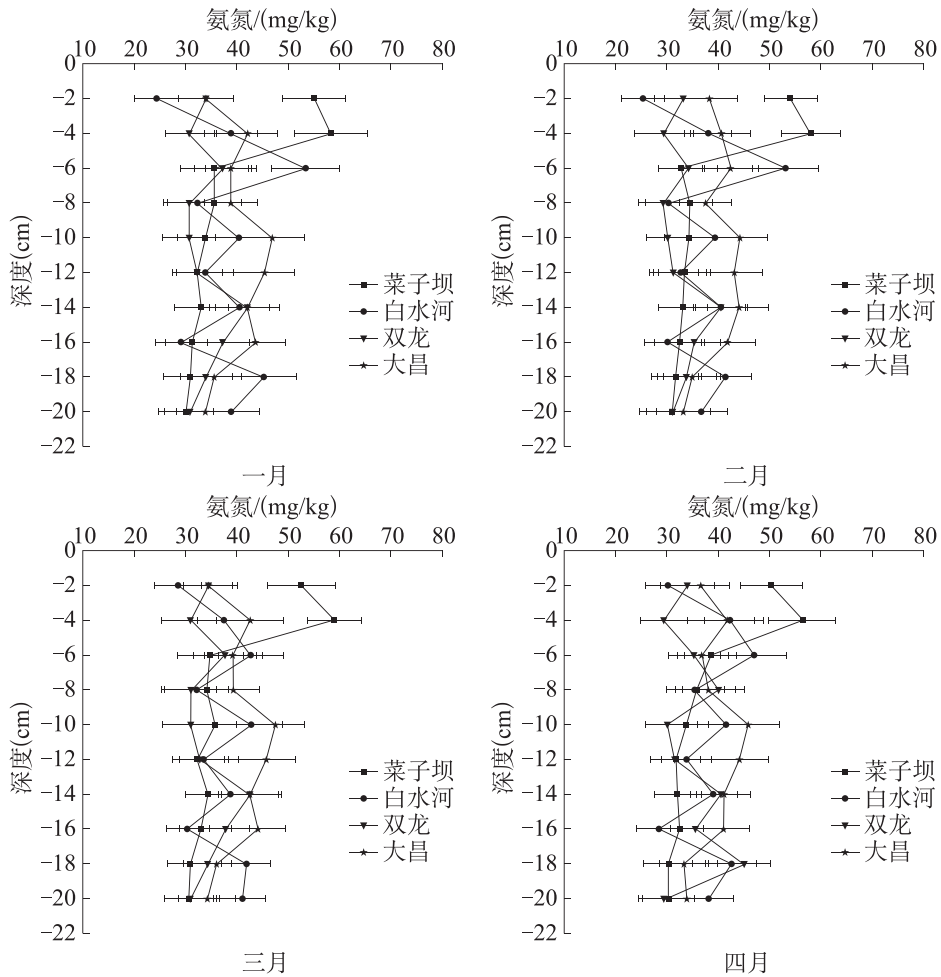


图 2-3 底泥中氨氮的含量分布

### 2.3.1.3 硝态氮

1—4 月, 菜子坝沉积物 0.0 ~ -4.0cm 之间的硝态氮含量呈上升趋势, 其最高含量位于 -2.0 ~ -4.0cm, 分别为 403.19、399.40、392.97 和 399.81mg/kg。随着沉积物深度增加, 其含量逐渐降低; -4.0 ~ -20.0cm 分层中, 菜子坝在 4 个取样

点中硝态氮平均含量最低, 为 191.02、189.24、196.17 和 192.74 mg/kg。

1—4 月, 白水河沉积物在 0.0 ~ -6.0cm 分层中硝态氮含量呈现上升趋势, 其中 -4.0 ~ -6.0cm 分层中含量最高为 364.02、331.83、339.43 和 337.81 mg/kg; 随着沉积物深度增加, 其含量逐渐降低, 其他分层中硝态氮含量变化不显著。

1—3 月, 双龙沉积物在 -12.0 ~ -14.0cm 分层中硝态氮含量最高为 272.61、245.43 和 263.84 mg/kg。4 月份硝态氮最高含量在 -6.0 ~ -8.0cm 分层中为 198.03mg/kg。

1—4 月, 大昌沉积物在 -8.0 ~ -10.0cm 分层中硝态氮含量最高为 311.18、295.31、302.36 和 307.53 mg/kg。但是其他分层中硝态氮的含量变化明显差异显著。(图 2-4)

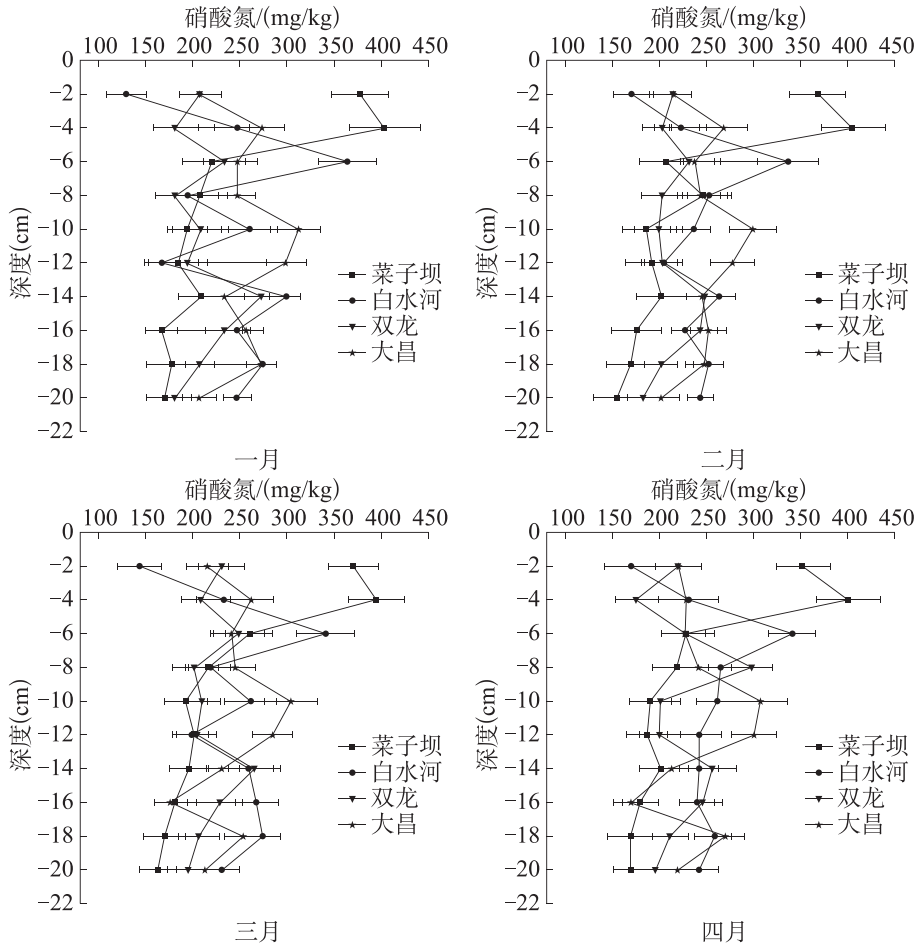


图 2-4 底泥中硝酸氮含量分布

#### 2.3.1.4 亚硝态氮

除了 3 月份, 菜子坝沉积物 0.0 ~ -4.0cm 之间的亚硝态氮最高含量为 132.58、

134.61 和 126.34mg/kg。3 月份，沉积物 0.0 ~ -2.0cm 之间的亚硝态氮最高含量，130.04mg/kg。-2.0 ~ -4.0cm，亚硝酸盐含量迅速降低；其他分层其含量变化不显著。

1—4 月，白水河沉积物在 0.0 ~ -6.0cm 分层中亚硝态氮含量呈现上升趋势，其中 -4.0 ~ -6.0cm 分层中含量最高为 120.53、96.27、100.21 和 117.84mg/kg；随着沉积物深度增加，其含量逐渐降低，其他分层中亚硝态氮含量变化不显著。

1—4 月，双龙沉积物中亚硝态氮含量相对稳定，在 -12.0 ~ -14.0cm 分层中亚硝态氮含量最高为 92.42、91.29、94.28 和 89.94mg/kg。其他分层中亚硝态氮含量变化不显著。

1 月，大昌沉积物在 -8.0 ~ -10.0cm 分层中的亚硝态氮含量最高为 100.45 mg/kg，2—4 月，在 -10.0 ~ -12.0cm 分层中的亚硝态氮含量最高为 102.73、101.02 和 101.38 mg/kg；但是 0.0 ~ -2.0cm 分层中的亚硝态氮含量较低。（图 2-5）

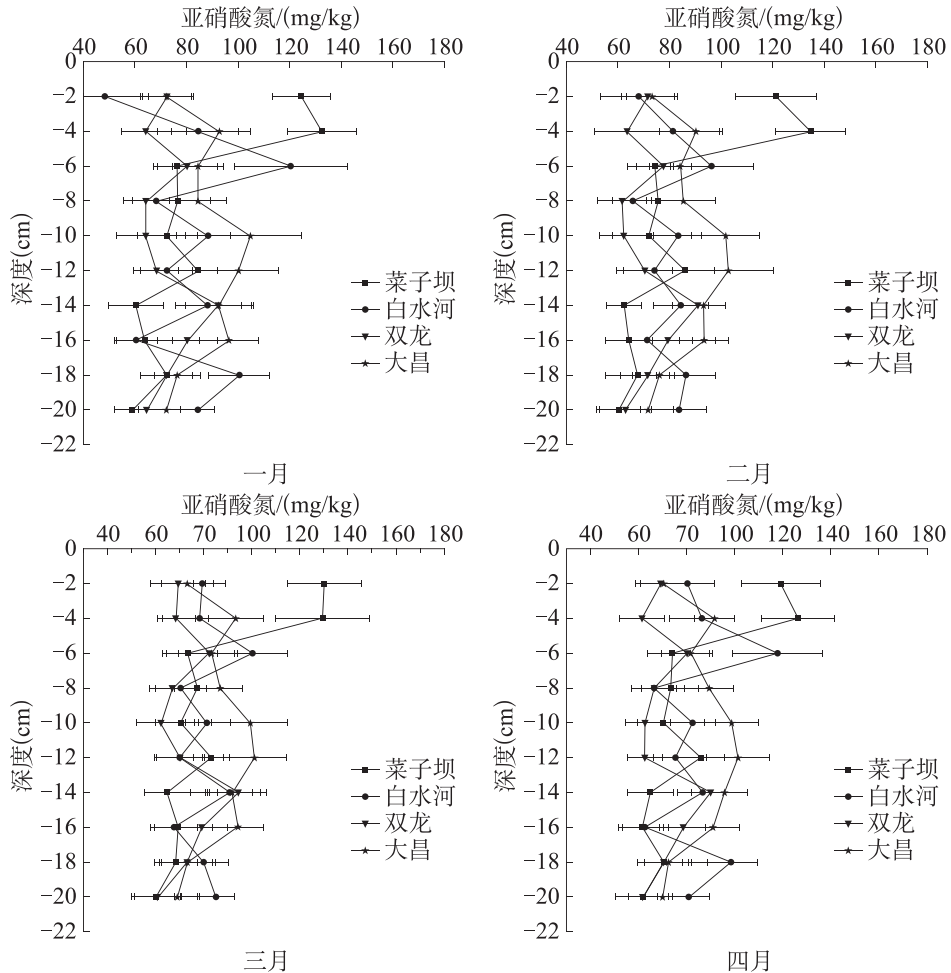


图 2-5 底泥中亚硝酸氮含量分布



## 2.3.2 磷元素的分布

### 2.3.2.1 总磷的分布

1—4月，菜子坝沉积物中各分层中总磷的含量总体上比其他3个取样点各对应分层的含量高。4个月份菜子坝沉积物中0.0~ -2.0cm的总磷含量最高，分别为785.11、763.68、772.12和767.90 mg/kg。-2.0cm~-20.0cm各分层中的总磷含量不显著。1—4月份其他3个取样点沉积物中各分层的总磷含量变化差异不显著，仅在水河沉积物中-18.0~-20.0cm之间总磷含量相对较高，为512.94、498.76、488.37和493.57 mg/kg。(图2-6)

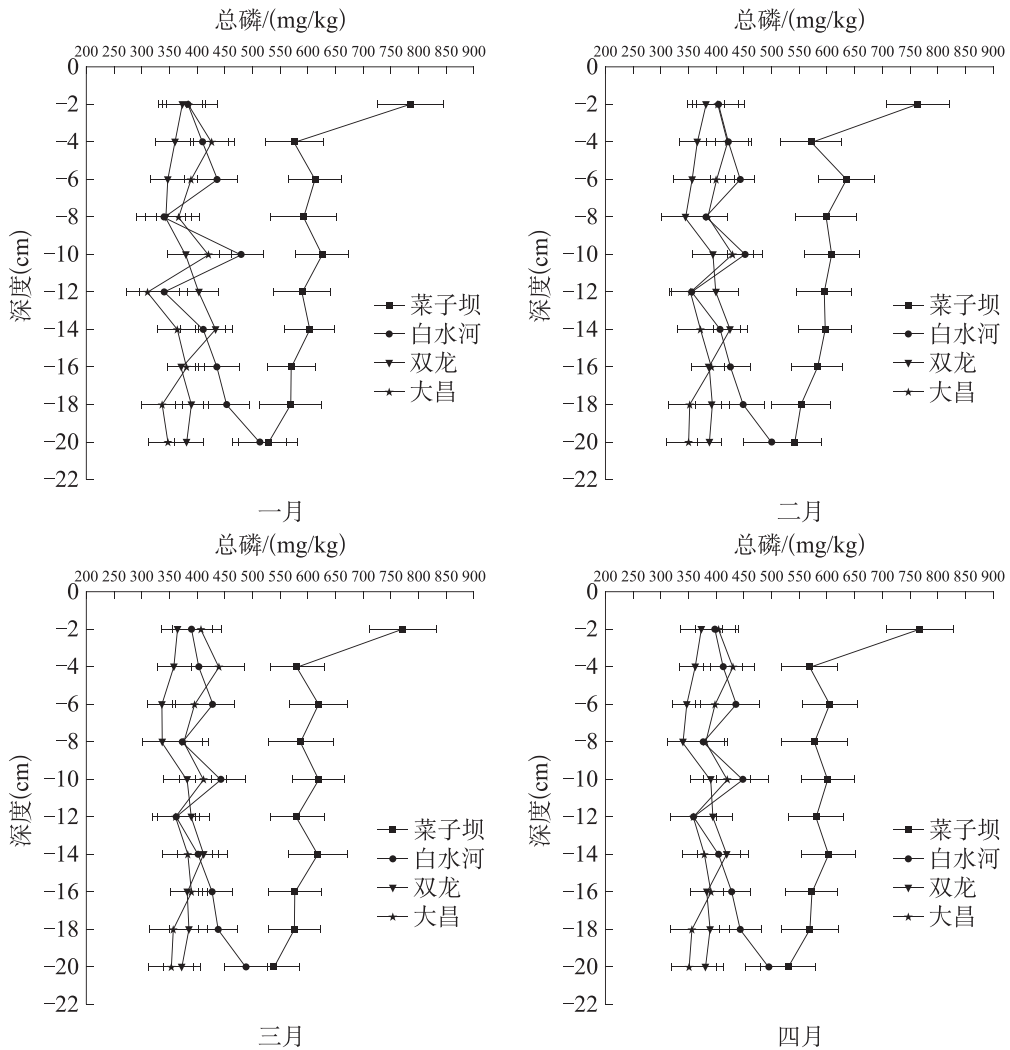
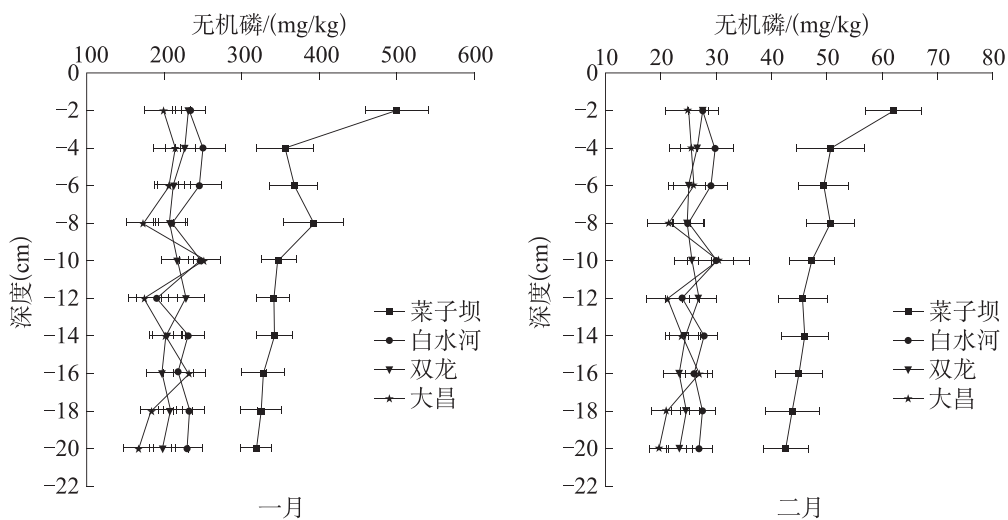


图2-6 底泥中总磷含量的分布

### 2.3.2.2 无机磷的分布

1—4月, 菜子坝沉积物中 0.0 ~ -2.0cm 的无机磷含量最高, 为 497.68、469.16、483.42 和 476.29 mg/kg。沉积物中 -2.0cm ~ -20.0cm 各分层中的无机磷含量变化不显著, 其含量均介于 324.25 ~ 389.80 mg/kg。

1—4月, 白水河沉积物中无机磷的含量为 205.11 ~ 241.27 mg/kg, 双龙沉积物中无机磷的含量为 191.77 ~ 224.37 mg/kg, 大昌沉积物中无机磷的含量为 168.43 ~ 211.09 mg/kg。这 3 个取样点沉积物中各分层的无机磷含量变化非常不明显。并且这 3 个取样点沉积物中各分层的无机磷含量均比菜子坝各对应分层的该元素含量低。(图 2-7)



未经中国三峡出版传媒有限公司的书面许可, 任何媒体及个人不得转载、摘编该节选内容。违者将被依法追究其侵权责任。

如有需要请购买原版书。



三峡小微



中国三峡出版传媒



中国三峡出版社