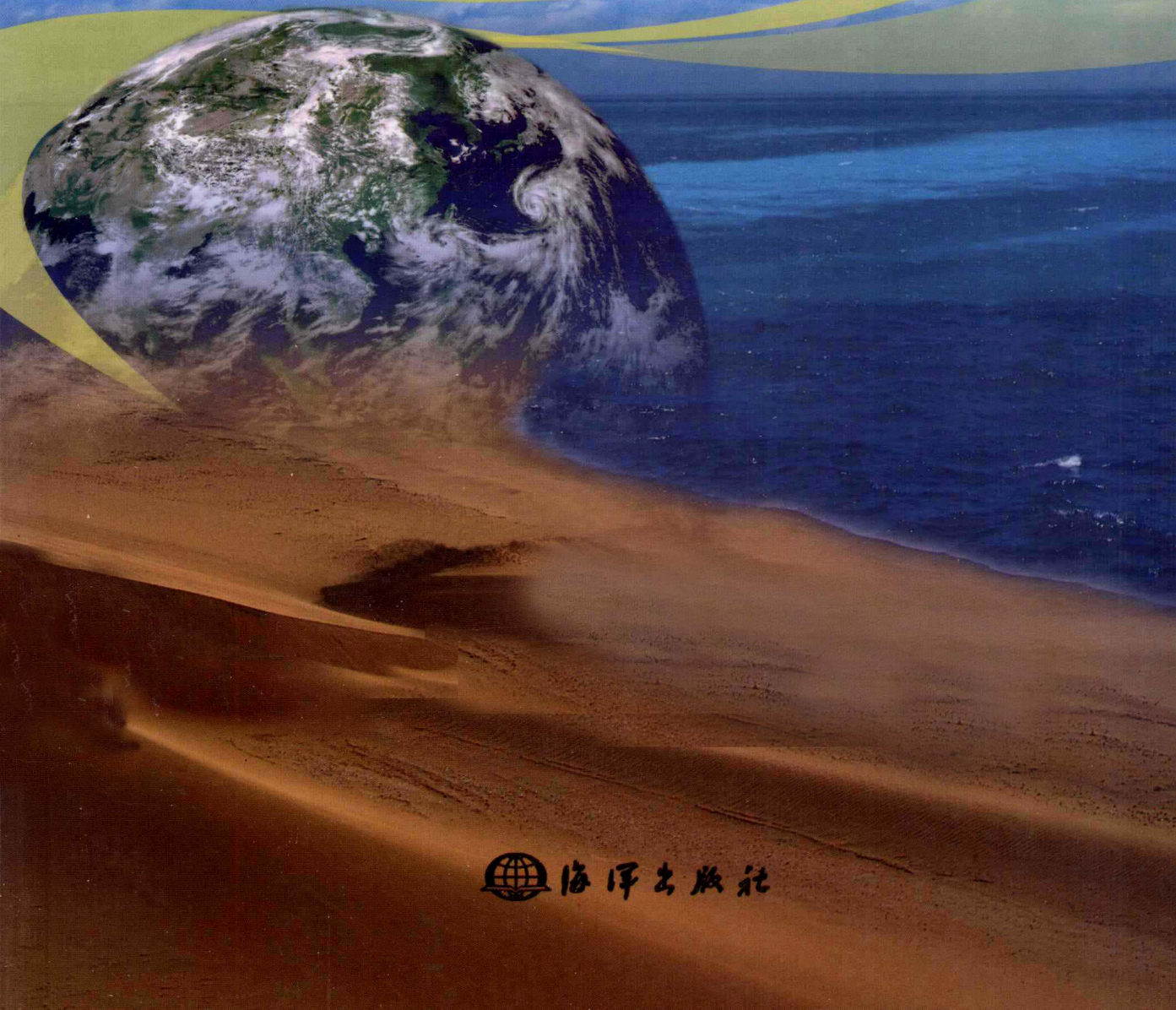


# 浮游植物的生态与 地球生态系统的机制

杨东方 著



 海洋出版社

# 浮游植物的生态 与地球生态系统的机制

杨东方 著

海洋出版社

2009年·北京

## 内 容 提 要

本书创新地从海洋环境学、生物学、生物地球化学和生态学的角度, 定量化研究了胶州湾浮游植物生态变化过程, 揭示了浮游植物的生长规律, 深入探讨了营养盐硅的生物地球化学过程与营养盐限制的判断方法、法则和唯一性以及海洋环境与浮游植物生长的生态学原理。同时, 提出地球生态系统的补充机制, 展示了人类与地球生态系统的相互作用, 剖析目前地球发生的现象, 预测了人类影响下的地球发展趋势。

本书共分为 16 章。主要内容为生态数学模型的建立方法和应用, 营养盐、光照时间和水温对浮游植物生长的影响以及浮游植物生长规律和地球生态系统的补充机制等。

本书适合海洋地质学、环境学、生物学、生物地球化学、生态学、海湾生态学和河口生态学的有关科学工作者和相关学科的专家参阅, 也适合高等院校师生作为教学和科研参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

浮游植物的生态与地球生态系统的机制/杨东方著. —北京: 海洋出版社, 2009. 10  
ISBN 978 - 7 - 5027 - 7364 - 9

I. 浮… II. 杨… III. 黄海 - 海湾 - 海洋浮游植物 - 生态学 - 研究  
IV. Q948. 885. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 184769 号

责任编辑: 方 菁

责任印制: 刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京海洋印刷厂印刷 新华书店北京发行所经销

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 21.25

字数: 580 千字 定价: 68.00 元

发行部: 62147016 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

“梦想除外，数字上的精确性是科学的真正灵魂，达到这一点是判断理论的真实性与实验的正确性的最好的、也许是唯一的标准。”

**D' Arcy Wentworth Thompson,  
On Growth and Form, Cambridge, 1942**

## 作者简历



杨东方 1984 年毕业于延安大学数学系（学士）；1989 年毕业于大连理工大学应用数学研究所（硕士），研究方向：Lenard 方程唯  $n$  极限环的充分条件、微分方程在经济管理生物方面的应用；1999 年毕业于中国科学院海洋研究所（博士），研究方向：营养盐硅、光和水温对浮游植物生长的影响，专业为海洋生物学和生态学；同年在青岛海洋大学化学化工学院和环境科学与工程研究院做博士后研究工作，研究方向：胶州湾浮游植物生长过程的定量化初步研究。2001 年毕业后到上海水产大学工作，主要从事海洋生态学、生物学和数学等学科的教学以及海洋生态学、环境学和生物地球化学领域的研究。2001 年被国家海洋局北海分局环境监测中心聘为教授级高级工程师，2002 年被国家海洋局第一海洋研究所聘为研究员。2004 年 6 月被核心期刊《海洋科学》聘为编委。2005 年 7 月被核心期刊《海岸工程》聘为编委。2006 年 2 月被核心期刊《山地学报》聘为编委。2007 年 11 月被中国科学院生态环境研究中心聘为研究员。2008 年 4 月被浙江海洋学院聘为教授。2009 年 8 月被中国地理学会聘为环境变化专业委员会委员。曾参加了国际 GLOBEC（全球海洋生态系统研究）研究计划中的由 18 个国家和地区联合进行的南海考察（在海上历时三个月）；国际 LOICZ（沿岸带陆海相互作用研究）的研究计划中在黄海东海的考察及国际 JGOFS（全球海洋通量联合研究）的研究计划中在黄海东海的考察。并多次参加了青岛胶州湾，烟台近海的海上调查以及胶州湾等水域的生态系统动态过程和持续发展等课题的研究。目前，正在进行胶州湾和长江口的生态、环境、生物地球化学过程的研究。

## 序言

近年来,全球变暖、沙尘暴、洪水、风暴潮和赤潮等灾害频繁发生,严重地威胁着人类社会的发展和生命财产的安全。出于防灾减灾的目的,人们对海洋生态学领域的兴趣一直在不断增长着,强烈关注陆地生态系统、海洋生态系统、大气生态系统。大量研究海洋生态系统在地球生态系统中的作用和人类对地球生态系统的影响以及地球生态系统的发展趋势。

本书是在浙江海洋学院出版基金和国家海洋局北海环境监测中心主任科研基金——长江口、胶州湾及其附近海域的生态变化过程(05EMC16)的共同资助下完成的。

在书中,有许多方法、机制和原理,它们要反复应用,解决不同的实际问题和阐述不同的现象和过程。于是,出现许多次相同的段落。同时,有些段落作为不同的条件,来推出不同的结果;有些段落来自于结果,又作为条件来推出新的结果。这样,就会出现有些段落的重复。如果只能第一次用,以后不再用,这样在以后的解决和说明中就不完善,无法有充分的依据来证明结论,而且方法、机制和原理就变得无关紧要了。在书中,每一章都是独立地解决一个重要问题,也许其中有些段落与其他章节中有重复。如果将重复的删除,内容显得苍白无力、层次错乱。因此,从作者角度尽可能地一定要保证每章内容的逻辑性、条理性、独立性、完整性和系统性。

作者通过对胶州湾水域的研究(1996—2009)得到以下主要结果:

(1) 研究胶州湾营养盐硅的生物地球化学过程,建立相应的动力学模型,计算出胶州湾的浮游植物吸收营养盐硅的量,浮游植物对硅的内禀转化率和营养盐硅的量对浮游植物的吸收与水流稀释的分配比例。

(2) 按照限制初级生产力的营养盐硅的变化,首次提出划分初级生产力值的范围分为三个部分:硅限制的初级生产力的基础值,初级生产力的幅度和初级生产力的临界值。通过浮游植物对营养盐的吸收比例,定量化地阐明营养盐硅限制浮游植物生长的阈值和阈值的时间以及初级生产力受硅限制的阈值。详细阐述了营养盐硅限制浮游植物初级生产力的动态过程。

(3) 分析认为,在整个胶州湾不存在氮、磷的限制,营养盐硅在每年的春、秋、冬季呈现年周期变化限制胶州湾的浮游植物的生长。在胶州湾有

些海域的浮游植物生长一年四季一直都受到营养盐硅的限制。

(4) 提出营养盐限制的判断方法和绝对限制法则、相对限制法则，并认为必须要同时满足，才能确定浮游植物生长限制的营养盐元素，且限制营养盐是唯一的。

(5) 尝试考虑太阳光的热能给水体的能量输入和水体生态系统的浮游植物的生长过程。分析认为，光辐射和光照时间分别决定了浮游植物的光合作用的光化学过程与酶催化过程两个方面，展现了胶州湾的光照时间如何影响水温，水温如何影响浮游植物生长的过程。通过叶绿素 a 和初级生产力提出了新概念：浮游植物的增殖能力，定量化地阐述了浮游植物有夏季的单峰型（1 回）增殖和春、秋季的双峰型（2 回）增殖的机制。

(6) 运用统计和微分方程等数理工具，建立了初级生产力—硅酸盐—水温等多个动态模型，定量化阐明胶州湾生态系统浮游植物生产过程及理化因子的综合调控机制。并且阐述了浮游植物生长的理想状态与赤潮产生的原因。

(7) 通过探讨光、水温和营养盐因子的综合对浮游植物生长变化的影响及其集群结构改变的影响，阐明了光照、水温和营养盐对浮游植物生长影响的机理和过程，确定了光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序，由小到大的重要影响程度依次为：光照、水温和营养盐硅。这为研究浮游植物的生长规律和环境因子光、水温和营养盐的变化决定浮游植物的集群结构和生理特征的变化过程奠定了基础。

(8) 研究认为，营养盐硅和水温在时间和空间的尺度上有顺序的控制，我们所观察到的各种类型的初级生产力，展示了营养盐硅和水温控制初级生产力的不同阶段，尤其用增殖能力展示了水温对浮游植物生长的控制阶段。从而确定了营养盐硅和水温控制初级生产力的变化过程。从陆地到海洋界面的硅输送量决定了初级生产力的时间变化过程；硅的生物地球化学过程决定了初级生产力的空间变化过程。对此，提出了海洋生态系统中的 5 个重要规律。

(9) 研究认为，浮游植物生长的变化及其集群结构的改变，主要受营养盐硅和水温的影响。研究结果展示了浮游植物生长的变化及其集群结构的改变过程，揭示了营养盐硅和水温影响浮游植物生长变化和其集群结构改变的机制，确定了营养盐硅和水温是海洋生态系统的健康运行的动力。认为营养盐硅和水温是浮游植物生长的发动机，营养盐硅是主要发动机，水温是次

要发动机。

(10) 提出了地球生态系统的三大补充机制：地球系统的营养盐硅补充机制、地球系统的水温补充机制和地球系统的碳补充机制。剖析目前地球发生的现象，解释厄尔尼诺与拉尼娜的现象成因，预测了人类影响的地球发展趋势。

(11) 研究发现地球生态系统为了保持海洋生态系统的持续发展和降低大气的二氧化碳浓度，启动了硅补充机制，对海洋进行了营养盐硅的补充，造成了沙漠化进一步扩大。沙漠化为海洋生态提供可持续发展，同时，沙漠化又威胁人类生存。那么，在海洋生态与人类生存之间，人类对沙漠化的进程既要维持海洋生态系统又要维持人类生存的状况，使得沙漠化在海洋生态与人类生存之间发挥更好的平衡和作用。

(12) 研究发现，全球气候的变化趋势有两大显著特点：气温趋向于升高、风暴趋向于增强。那么，在未来气候变化的趋势下，首先，未来生长的整个农作物在全球都趋向于耐高温和抗倒伏。其次，未来生长的农作物具有内陆抗干旱；在近岸和盆地流域抗洪涝。因此，提高生物技术来进行精选、培养、改良农作物物种，适合未来的高温、强风和持续干旱的内陆气候以及洪涝灾害的近岸和盆地流域气候。同时，利用现代技术加强节水灌溉系统和排水系统的建设，以便减少未来的自然灾害对农作物的影响。

有关这方面的研究还在进行中，本书权为阶段性成果的总结，欠妥之处在所难免，恳请读者多多指正。希望读者站在作者的肩膀上，使祖国海洋生态学研究、世界海洋生态学研究以及地球生态学研究有飞跃发展，作者甚感欣慰。

在各位同仁和老师的鼓励 and 帮助下，此书得以出版。作者铭感在心，谨致衷心感谢。

杨东方

2009年8月26日



<b>第1章 生态数学模型及其在海洋生态学的应用</b> .....	(1)
1.1 生态数学模型的特点和类型 .....	(1)
1.1.1 生态数学模型的构建 .....	(1)
1.1.2 模型的特点和类型 .....	(2)
1.2 举例说明数学模型在生态学上的应用 .....	(3)
1.2.1 DINT 模型 .....	(3)
1.2.2 颗粒垂直通量模型 .....	(4)
1.2.3 剩余产量模式 .....	(4)
1.2.4 伯塔兰菲生长方程式 .....	(5)
1.2.5 海洋中悬浮物质再悬比率计算模式 .....	(5)
1.2.6 胶州湾北部水层生态动力学模型 .....	(6)
1.3 应用数学模型解决胶州湾的生态问题 .....	(6)
1.4 结论 .....	(7)
参考文献 .....	(8)
<b>第2章 铁对浮游植物生长与大气碳沉降的作用</b> .....	(9)
2.1 铁对浮游植物生长影响的研究进展 .....	(9)
2.1.1 铁是浮游植物生长的限制因子的起源与证据 .....	(9)
2.1.2 研究结果与存在的问题 .....	(10)
2.2 刺激浮游植物生长的铁对大气碳沉降的影响 .....	(11)
2.2.1 浮游植物与限制因子 .....	(12)
2.2.2 铁对浮游植物生长的影响研究过程 .....	(13)
2.2.3 铁是限制因子的探讨 .....	(15)
2.2.4 铁对大气碳沉降的作用 .....	(15)
2.3 结论 .....	(16)
参考文献 .....	(17)
<b>第3章 营养盐对初级生产力的限制</b> .....	(19)
3.1 硅是浮游植物初级生产力的限制因子 .....	(19)
3.1.1 研究海区概况及数据来源 .....	(19)

3.1.2 硅酸盐浓度和初级生产力 ..... (20)

3.1.3 硅酸盐和水温与初级生产力的关系 ..... (23)

3.1.4 硅酸盐的来源 ..... (26)

3.1.5 初级生产力与硅酸盐的分布特征 ..... (27)

3.1.6 模型的生态意义 ..... (28)

3.1.7 硅酸盐与浮游植物优势种 ..... (33)

3.1.8 海水的透明度与初级生产力的关系 ..... (33)

3.1.9 浮游植物的结构 ..... (34)

3.1.10 营养盐硅的损耗过程 ..... (34)

3.2 浅析浮游植物生长的营养盐限制及其判断方法 ..... (37)

3.2.1 目前哪种营养盐可能成为限制因子 ..... (37)

3.2.2 营养盐硅限制浮游植物生长的判断方法 ..... (39)

3.2.3 胶州湾研究结果 ..... (41)

3.3 硅限制和满足浮游植物生长的阈值和阈值时间 ..... (42)

3.3.1 研究海区概况及数据来源 ..... (43)

3.3.2 营养盐 Si: N(Si(OH)<sub>4</sub>: NO<sub>3</sub>) 的比值 ..... (44)

3.3.3 Si: N 的比值与初级生产力 ..... (45)

3.3.4 胶州湾硅、氮、磷的动态变化趋势 ..... (47)

3.3.5 Si: N 的比值与初级生产力 ..... (47)

3.3.6 模型的生态意义 ..... (49)

3.3.7 硅酸盐的阈值和阈值时间 ..... (51)

3.3.8 水流稀释对浮游植物生长的影响 ..... (55)

3.3.9 营养盐硅限制浮游植物初级生产力的动态过程 ..... (56)

3.4 结论 ..... (58)

参考文献 ..... (60)

**第4章 营养盐限制的判断方法、法则和唯一性 ..... (64)**

4.1 营养盐限制的判断法则和唯一性 ..... (65)

4.1.1 营养盐限制的判断方法 ..... (66)

4.1.2 有关营养盐限制结论的不足 ..... (66)

4.1.3 相应的研究结果 ..... (67)

4.2 氮、磷、硅营养盐限制的唯一性 ..... (68)

4.2.1 研究海区概况及数据来源 ..... (70)

4.2.2 营养盐的平面分布和季节变化 ..... (70)

4.2.3 陆源对浮游植物生长的影响 ..... (74)

4.2.4	营养盐的绝对、相对限制法则	(77)
4.2.5	判断营养盐限制的方法和唯一性	(80)
4.2.6	仅考虑氮、磷成为限制因子不准确	(82)
4.2.7	营养盐硅控制生态系统的机制	(83)
4.3	结论	(83)
	参考文献	(86)
<b>第5章</b>	<b>硅的亏损过程</b>	<b>(90)</b>
5.1	硅的生物地球化学过程	(90)
5.1.1	海洋中浮游植物的优势种——硅藻	(90)
5.1.2	硅是硅藻必不可少的营养盐	(91)
5.1.3	硅藻的沉降	(92)
5.1.4	硅的生物地球化学过程	(92)
5.1.5	营养盐硅和浮游植物的动态平衡	(94)
5.1.6	胶州湾的研究结果	(95)
5.2	硅酸盐的起源以及生物地球化学过程和归宿	(96)
5.2.1	研究海区概况及数据来源	(96)
5.2.2	硅酸盐浓度远离带有河口海岸的横断面变化	(97)
5.2.3	硅酸盐浓度与黄海水的交换	(104)
5.2.4	河流的硅酸盐和初级生产力基本特征	(105)
5.2.5	硅酸盐的起源	(113)
5.2.6	硅、浮游植物和浮游动物的食物链过程	(115)
5.2.7	硅酸盐的归宿	(118)
5.3	生态系统中硅的作用	(121)
5.3.1	硅的迁移过程	(121)
5.3.2	全球硅的亏损	(122)
5.3.3	营养盐硅和浮游植物的动态平衡	(125)
5.4	结论	(126)
	参考文献	(127)
<b>第6章</b>	<b>胶州湾的浮游藻类生态现象</b>	<b>(132)</b>
6.1	胶州湾生态现象	(132)
6.1.1	浮游植物的生长	(132)
6.1.2	浮游植物的结构	(134)
6.2	胶州湾生态现象的剖析	(135)

6.2.1	地点	(135)
6.2.2	时间	(137)
6.2.3	结论	(137)
6.3	用定量化生态位研究环境影响生物物种的变化过程	(138)
6.3.1	生态位的概念	(138)
6.3.2	多维生态位和生态系统的量化定义	(139)
6.3.3	胶州湾的生态位研究	(140)
6.3.4	生态位的观点	(143)
6.4	结论	(144)
	参考文献	(144)
<b>第7章</b>	<b>光照时间对浮游植物生长的影响</b>	<b>(146)</b>
7.1	光辐射、光照时间对浮游植物生长的影响	(146)
7.2	光照时间对水温的影响	(147)
7.2.1	构建水温变化的模型框图	(148)
7.2.2	光照时间通过水温影响初级生产力	(151)
7.3	胶州湾的光照时间、水温对浮游植物生长的影响	(153)
7.3.1	光温对浮游植物生长的影响	(153)
7.3.2	胶州湾的光、温对浮游植物生长的影响	(154)
7.3.3	研究海区概况及数据来源	(154)
7.3.4	光照时间与水温的关系	(155)
7.3.5	光辐射、光照时间对浮游植物生长的影响	(158)
7.3.6	光照时间、水温和营养盐对初级生产力的影响	(166)
7.4	结论	(166)
	参考文献	(167)
<b>第8章</b>	<b>水温对浮游植物生长的影响</b>	<b>(169)</b>
8.1	浮游植物增殖能力	(169)
8.1.1	生态现象	(169)
8.1.2	生物因子	(169)
8.1.3	浮游植物的增殖能力	(170)
8.1.4	增殖能力的应用	(170)
8.1.5	浮游植物增殖能力的重要性	(172)
8.2	胶州湾水温对浮游植物增殖能力的影响	(172)
8.2.1	研究海区概况及数据来源	(174)

8.2.2	浮游植物的增殖能力 .....	(174)
8.2.3	增殖能力与水温的动态模型 .....	(177)
8.2.4	水温影响增殖能力 .....	(179)
8.2.5	增殖能力-水温的动态模型的生态意义 .....	(180)
8.2.6	增殖能力与初级生产力的差异 .....	(182)
8.2.7	胶州湾的单(双)峰型的增殖机制 .....	(182)
8.3	结论 .....	(184)
	参考文献 .....	(184)
<b>第9章</b>	<b>胶州湾环境变化对海洋生物资源的影响 .....</b>	<b>(186)</b>
9.1	胶州湾环境的变化 .....	(186)
9.1.1	研究海区概况 .....	(186)
9.1.2	营养盐 .....	(187)
9.1.3	气温和水温 .....	(188)
9.2	胶州湾海洋生物资源的变化 .....	(188)
9.2.1	浮游植物生态变化 .....	(188)
9.2.2	物种的变化 .....	(189)
9.3	水温、营养盐硅是浮游植物生长的动力 .....	(189)
9.3.1	营养盐主要发动机 .....	(189)
9.3.2	水温次要发动机 .....	(190)
9.4	人类影响环境 .....	(190)
9.5	结论 .....	(191)
	参考文献 .....	(191)
<b>第10章</b>	<b>胶州湾水温和营养盐硅限制初级生产力的时空变化 .....</b>	<b>(193)</b>
10.1	胶州湾浮游植物的研究基础 .....	(194)
10.1.1	研究海区概况及数据来源 .....	(194)
10.1.2	序列成果 .....	(195)
10.2	限制初级生产力的时空变化 .....	(195)
10.2.1	限制因子 .....	(195)
10.2.2	在时间尺度上 .....	(196)
10.2.3	在空间尺度上 .....	(198)
10.3	初级生产力的变化规律 .....	(199)
10.4	结论 .....	(201)
	参考文献 .....	(201)

<b>第 11 章 营养盐硅和水温影响浮游植物的机制</b> .....	(205)
11.1 营养盐影响浮游植物 .....	(205)
11.1.1 营养盐影响浮游植物生长 .....	(205)
11.1.2 营养盐影响浮游植物的集群结构变化 .....	(207)
11.1.3 营养盐影响浮游植物的机制 .....	(208)
11.2 水温影响浮游植物 .....	(208)
11.2.1 水温影响浮游植物生长 .....	(208)
11.2.2 水温影响浮游植物的集群结构变化 .....	(210)
11.2.3 水温影响浮游植物的机制 .....	(210)
11.3 结论 .....	(212)
参考文献 .....	(212)
<b>第 12 章 浮游植物的生态</b> .....	(214)
12.1 光照、水温和营养盐对浮游植物影响的大小 .....	(214)
12.1.1 光照影响浮游植物的生长 .....	(215)
12.1.2 水温影响浮游植物的生长 .....	(216)
12.1.3 营养盐影响浮游植物的生长 .....	(217)
12.1.4 硅酸盐和水温对初级生产力的影响 .....	(218)
12.1.5 光、水温和营养盐的综合影响顺序 .....	(220)
12.1.6 结论 .....	(221)
12.2 营养盐硅在全球海域中限制浮游植物的生长 .....	(221)
12.2.1 全球浮游植物优势种——硅藻 .....	(222)
12.2.2 限制全球浮游植物生长的营养盐硅 .....	(224)
12.2.3 硅造成死亡空间 .....	(227)
12.2.4 结论 .....	(228)
12.3 浮游植物生态规律 .....	(229)
12.3.1 胶州湾海区概况 .....	(229)
12.3.2 浮游植物生长的理想状态与赤潮 .....	(230)
12.3.3 初级生产力的控制因子 .....	(231)
12.3.4 初级生产力的受控原理 .....	(231)
12.3.5 浮游植物生长的发动机 .....	(232)
12.3.6 人类对环境的影响 .....	(233)
12.3.7 结论 .....	(233)
参考文献 .....	(234)

<b>第 13 章 地球生态系统的机制</b> .....	(241)
13.1 地球生态系统的营养盐硅补充机制 .....	(241)
13.1.1 人类活动对生态环境的影响 .....	(242)
13.1.2 生态环境变化对海洋生态系统的影响 .....	(244)
13.1.3 地球生态系统对海洋生态系统的响应 .....	(248)
13.1.4 结论 .....	(250)
13.2 地球生态系统的气温和水温补充机制 .....	(251)
13.2.1 人类对生态环境的影响 .....	(251)
13.2.2 生态环境变化对地球生态系统的影响 .....	(252)
13.2.3 地球生态系统对生态环境变化的响应 .....	(253)
13.2.4 结论 .....	(256)
13.3 地球生态系统的碳补充机制 .....	(257)
13.3.1 碳沉降 .....	(257)
13.3.2 浮游植物与环境因子 .....	(259)
13.3.3 碳补充机制 .....	(261)
13.3.4 赤潮的作用 .....	(264)
13.3.5 结论 .....	(266)
参考文献 .....	(266)
<b>第 14 章 海洋生态和沙漠化的耦合机制</b> .....	(272)
14.1 海洋生态和沙漠化的桥梁——沙尘暴 .....	(272)
14.1.1 沙漠化的目前状态 .....	(273)
14.1.2 海洋中浮游植物的硅需要 .....	(273)
14.1.3 人类对营养盐硅输入的改变 .....	(274)
14.1.4 缺硅对海洋浮游植物造成的结果 .....	(275)
14.1.5 营养盐硅的补充 .....	(276)
14.1.6 沙尘暴变化 .....	(277)
14.1.7 结论 .....	(279)
14.2 沙漠化与海洋生态和人类生存的关系 .....	(279)
14.2.1 沙漠状况与起因 .....	(279)
14.2.2 沙漠化维持海洋生态 .....	(280)
14.2.3 沙漠化威胁人类生存 .....	(282)
14.2.4 沙漠化在海洋生态和人类生存之间的平衡 .....	(283)
14.2.5 结论 .....	(284)

参考文献 .....	(284)
<b>第 15 章 海洋生态变化对气候的影响及农作物种植关系 .....</b>	<b>(288)</b>
15.1 灾害发生 .....	(288)
15.1.1 农作物 .....	(288)
15.1.2 全球变暖 .....	(289)
15.1.3 二氧化碳浓度升高 .....	(289)
15.2 海洋生态 .....	(290)
15.2.1 限制浮游植物的生长 .....	(290)
15.2.2 硅的生物地球化学过程 .....	(291)
15.2.3 人类活动的影响 .....	(291)
15.2.4 硅输送 .....	(292)
15.3 未来陆地生态 .....	(293)
15.3.1 气候变化 .....	(293)
15.3.2 农作物 .....	(294)
15.4 结论 .....	(295)
参考文献 .....	(296)
<b>第 16 章 人类与地球生态系统的相互作用 .....</b>	<b>(300)</b>
16.1 人类与生态环境 .....	(300)
16.1.1 胶州湾浮游植物的生态变化 .....	(300)
16.1.2 水温、营养盐硅是浮游植物生长的动力 .....	(301)
16.1.3 人类影响浮游植物 .....	(302)
16.2 人类对生态环境的影响 .....	(302)
16.2.1 人类对营养盐硅的影响 .....	(302)
16.2.2 人类对水温的影响 .....	(304)
16.3 生态环境变化对地球生态系统的影响 .....	(304)
16.3.1 营养盐硅的缺乏 .....	(304)
16.3.2 水温的上升 .....	(305)
16.4 地球生态系统对生态环境变化的响应 .....	(306)
16.4.1 营养盐硅的补充 .....	(306)
16.4.2 水温的补充 .....	(306)
16.5 地球生态系统的补充机制 .....	(307)
16.5.1 营养盐硅的补充机制 .....	(307)
16.5.2 水温的补充机制 .....	(308)



---

16.5.3 碳沉降的补充机制 .....	(308)
16.6 地球发生的现象 .....	(310)
16.6.1 厄尔尼诺与拉尼娜的现象成因 .....	(310)
16.6.2 人类灾害 .....	(311)
16.6.3 气候突变的未来预测 .....	(312)
16.7 结论 .....	(312)
参考文献 .....	(313)
主要相关文章 .....	(315)
致谢 .....	(319)