

大鹏湾优势藻引发赤潮的灰分析

黄贯虹¹, 黄伟健^{2*}, 方 刚¹, 徐 宁², 陈菊芳², 江天久², 谢隆初², 骆育敏²

(1. 广东职业技术师范学院计算机科学系, 广州 510665; 2. 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要:对 1990 年 3 月 30 日~6 月 30 日在大鹏湾盐田海域的海水采样结果, 用灰色理论的系统分析方法研究并计算大鹏湾地区海水中的尖刺拟菱形藻、中肋条骨藻和反曲原甲藻等 3 种藻引发的赤潮与浮游动物数量和海水理化因子等 12 个因素变化的灰关联度, 关联排序结果表明: 浮游动物、浊度、铁、锰、溶解氧、酸碱度、盐度和温度均对该三类藻种群增殖态势有着较大的影响, 构成大鹏湾赤潮发生“优势”因素。

关键词:灰关联; 关联度; 尖刺拟菱形藻; 中肋条骨藻; 反曲原甲藻; 大鹏湾

Grey Analysis of Red Tide Produced by Superior Alga in Dapengwan Bay, South China Sea

HUANG Guan-Hong¹, HUANG Wei-Jian², FANG Gang¹, XU Ning², CHEN Ju-Fang², JANG Tian-Jiu², XIE Long-Chu², LUO Yu-Min². *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 822~827.

Abstract: Based on samples taken from the seawater of the salt field in Dapengwan Bay from March 30th to June 25th, 1990, the systematic analytical method of grey theory is used to study and calculate grey related values between three major kinds of red tide phytoplankton (*Pseudonitzschia pungens*, *Skeletonema costatum*, and *Prorocentrum sigmoides*) separately and 12 various related physical-chemical factors of seawater in Dapengwan Bay. The result of related value and its permutation indicates that Zooplankton, Turbidity, Fe, Mn, Dissolved Oxygen, pH, Salinity and Temperature have more influence on the above three kinds of alga than other factors. Therefore, these eight factors become superiorly influential factors of red tide.

Key words: grey related values; *pseudonitzschia pungens*; *skeletonema costatum*; *prorocentrum sigmoides*; dapengwan bay

文章编号: 1000-0933(2002)06-0822-06 中图分类号: X145, X171 文献标识码: A

尖刺拟菱形藻 (*Pseudonitzschia pungens*)、中肋条骨藻 (*Skeletonema costatum*) 和反曲原甲藻 (*Prorocentrum sigmoides*) 是大鹏湾春季赤潮发生的主要藻种。作者曾运用灰色系统理论的分析方法对夜光藻和反曲原甲藻种群增殖、以及浮游动物和叶绿素与海水理化因子间的关系进行关联分析^[1~8], 也曾运用时间序列模型、回归分析和微分方程的变分模型对夜光藻和反曲原甲藻增殖与形成赤潮的原因进行过深入的研究^[9,10], 但由于上述诸分析中均未考虑赤潮生物的共存性、共发性和竞争性等特点, 而赤潮生物往往又具有一定的共同特性, 如海水理化因子对上述 3 种藻种群形成赤潮的影响, 这个共性对进一步研究和防治赤潮现象有着重要的积极作用, 因此本文将利用灰色系统理论的方法对所形成赤潮的原因作进一步研究与分析。

1 材料与方法

1.1 材料

基金项目: 广东省高教厅资助项目

* 通讯作者 Author for correspondence

收稿日期: 2002-07-01 出版日期: 2001-11-23

作者简介: 黄贯虹 (1961~), 男, 安徽人, 博士, 副教授。主要从事系统建模研究。E-mail: ghcantan@21cn.com

所有数据皆取自大鹏湾盐田海域的调查结果,地理位置如图 1 所示。采样时间是 1990 年 3 月 30 日至 6 月 25 日,每隔 2d 采样 1 次。共 19 个因子(31 个数据 $\times$ 19 $\times$ 3 个站位)。浮游动物采样分定性与定量两种:定性是用浅水 2 号浮游生物网,网口是 31.6cm,全长为 140cm,用 GB36 筛绢垂直拖网采样;定量是用 2L 的采水器,标本少则全部计数,多则浓缩后计数。浮游植物采样按照《海洋调查规范》(国家海洋局,1975),用直径 37cm,长 130cm,孔径 70 μ m 的拖网在采样点进行垂直拖网,采样站位 S_1 离岸约 100m;站位 S_2 离岸约 500m,站位 S_3 离岸大约 1000m。各站位的采样深度分别为:表层深度为此 0.5m,底层深度分别为 3m、5m 和 9m; S_{11} 和 S_{12} 、 S_{21} 和 S_{22} 与 S_{31} 和 S_{32} 分别表示 S_1 、 S_2 和 S_3 三个站位的表底层。

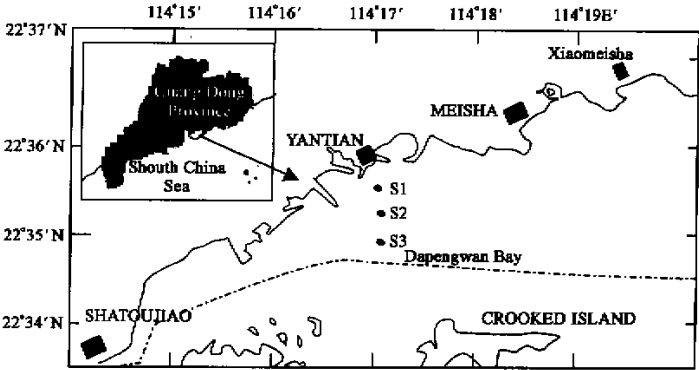


图 1 大鹏湾采样站位分布图
Fig. 1 Sketch map showing the sites investigated

1.2 方法

1.2.1 采样分析 本文所用数据的定量与定性采样由暨南大学水生生物研究所完成;理化因子的分析按国家海洋局《海洋污染调查暂行规范》(1979 年)进行,样品由国家海洋局南海分局海洋环境监测中心提供。其中,可溶性无机磷用钼锑蓝分析;可溶性硝态氮、亚硝态氮分别用镉-铜还原法和重氮-偶氮法分析。

1.2.2 灰关联排序分析^[11] 把尖刺拟菱形藻、反曲原甲藻、中肋条骨藻的种群密度作为参考序列 $\{X_i^{(0)}(k) \mid k = 1, 2, \dots, N\}$ ($i = 1, 2, 3$), 其中样值个数 $N = 31$;以浮游动物种群密度(ind/L)、温度 $[T(^{\circ}\text{C})]$ 、盐度 $[S(\text{‰})]$ 、溶解氧 $[\text{DO}(\text{mg/L})]$ 、酸碱度 $[\text{pH}]$ 、浊度、磷酸盐 $[\text{PO}_4(\mu\text{g/L})]$ 、亚硝酸盐 $[\text{NO}_2(\mu\text{g/L})]$ 、硝酸盐 $[\text{NO}_3(\mu\text{g/L})]$ 、硅 $[\text{Si}(\mu\text{g/L})]$ 、铁 $[\text{Fe}(\mu\text{g/L})]$ 和锰 $[\text{Mn}(\mu\text{g/L})]$ 等 12 个因子作为比较序列 $\{X_j(k) \mid k = 1, 2, \dots, N\}$ ($j = 1, 2, \dots, 12$)。

为使各因素具备可比性,将各序列初值化参考序列,即 $\{Y_i^{(0)}(k) \mid k = 1, 2, \dots, N\} = \{X_i^{(0)}(k)/X_i^{(0)}(1) \mid k = 1, 2, \dots, N\}$ ($i = 1, 2, 3$), 其中若采样值 $X_i^{(0)}(1) = 0$, 则取下一个采样值,比较序列亦然,即 $\{Y_j(k)\} = \{X_j(k)/X_j(1)\}$ ($j = 1, 2, \dots, N$)。

$\zeta_{ij} = \{\zeta_{ij}(k) \mid k = 1, 2, \dots, N\}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 12$) 为第 i 个经初值的参考序列 $\{Y_i^{(0)}(t)\}$ 与第 j 个比较序列 $\{Y_j(t)\}$ 的关联系数,其中:

$$\zeta_{ij}(k) = \frac{\text{Min}_{j,k} \Delta_{ij}(k) + \text{Max}_{j,k} \Delta_{ij}(k)}{\Delta_{ij}(k) + \rho \text{Max}_{j,k} \Delta_{ij}(k)} \quad i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 12; k = 1, 2, \dots, N$$

式中, $\Delta_{ij}(k) = |Y_i^{(0)}(k) - Y_j(k)|$; $\rho(0 < \rho < 1)$ 为分辨系数,本文取 $\rho = 0.1$ 。

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta_{ij}(k) \quad i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 12$$

其中, γ_{ij} 为第 i 个参考序列 $\{Y_i^{(0)}(t)\}$ 与第 j 个比较序列 $\{Y_j(t)\}$ 的关联度。

2 结论与讨论

本文分别对 3 个站位 S_1 、 S_2 和 S_3 以及表、底层的采样数据进行计算排序结果列示于表 1~表 3,将各因素对 3 类藻种群密度的关联度排序结果列于表 4,并作出尖刺拟菱形藻、中肋骨条藻和反曲原甲藻的种群密度分别在第 1 和第 2 个站位的表、底层与表 4 中排前 4 位的因素比较图于图 2~图 4,以进行定量与定性相结合的分析。图中,为便于进行直观比较,故将排前 4 位的浮游动物、浊度、Fe 和 Mn 等因素的折线图按其采样值比其均值后作出,其比值均以 1 值为中心上下波动,从 3 个比较图均可以看出,当排在前 4 位的因素的采样值与其均值的比(呈现其均值的倍数)大多在均值线的下方时,3 个藻种的密度均低于其均值;而当前 4 位的因素的采样值与其均值的比值大多在均值线的上方时,3 个藻种的密度大多高于其均值,这充分表明了这 3 个藻种的增殖密度与前 4 位因素有着较密切关联性。

表 1 尖刺拟菱形藻与各因子的关联度及排序结果

Table 1 The result of related value and its permutation between <i>Pseudonitzschia pungens</i> and various factor								
因素 Factor	S_1		S_2		S_3		均值 Average	排序 Permu- tation
	表层	底层	表层	底层	表层	底层		
	Surface (S_{11})	Bottom (S_{12})	Surface (S_{21})	Bottom (S_{22})	Surface (S_{31})	Bottom (S_{32})		
1. 浮游动物 ^①	0.9094	0.9404	0.9378	0.8710	0.9844	0.8858	0.9215	1
2. T	0.8482	0.9143	0.8590	0.7208	0.9373	0.6124	0.8153	8
3. S	0.8627	0.9187	0.8795	0.7426	0.9467	0.6434	0.8323	7
4. DO	0.8750	0.9273	0.8917	0.7769	0.9533	0.6568	0.8468	5
5. pH	0.8617	0.9230	0.8815	0.7505	0.9468	0.6475	0.8352	6
6. 浊度 ^②	0.8984	0.9239	0.9125	0.8049	0.9764	0.8517	0.8946	3
7. PO_4	0.4616	0.5394	0.4036	0.4003	0.6044	0.7720	0.5302	12
8. NO_2	0.8364	0.6787	0.8148	0.6628	0.6738	0.6718	0.7231	10
9. NO_3	0.8536	0.8825	0.6976	0.7390	0.9291	0.6288	0.7884	9
10. Si	0.5109	0.8441	0.7457	0.5876	0.7220	0.5367	0.6578	11
11. Fe	0.9061	0.8749	0.9338	0.8270	0.9826	0.8470	0.8952	2
12. Mn	0.8916	0.9434	0.9120	0.7932	0.9695	0.6235	0.8555	4

① Zooplankton, ② Turbidity

表 2 反曲原甲藻与各因子的关联度及排序结果

Table 2 The result of related value and its permutation between <i>Prorocentrum sigmoides</i> and various factor								
因素 Factor	S_1		S_2		S_3		均值 Average	排序 Permu- tation
	表层	底层	表层	底层	表层	底层		
	Surface (S_{11})	Bottom (S_{12})	Surface (S_{21})	Bottom (S_{22})	Surface (S_{31})	Bottom (S_{32})		
1. 浮游动物 ^①	0.7422	0.8783	0.9531	0.8449	0.9535	0.8303	0.8671	1
2. T	0.7188	0.8495	0.8642	0.8446	0.9071	0.5772	0.7935	8
3. S	0.7268	0.8555	0.8847	0.8450	0.9182	0.6194	0.8083	7
4. DO	0.7292	0.8594	0.8969	0.8447	0.9256	0.6255	0.8136	5
5. pH	0.7257	0.8557	0.8891	0.8450	0.9188	0.6233	0.8096	6
6. 浊度 ^②	0.7214	0.8580	0.9336	0.8461	0.9385	0.7730	0.8451	2
7. PO_4	0.4078	0.4891	0.3926	0.7726	0.5914	0.6702	0.5540	12
8. NO_2	0.7050	0.6459	0.8363	0.8475	0.6628	0.6122	0.7183	10
9. NO_3	0.7199	0.8280	0.7154	0.8498	0.9038	0.6050	0.7703	9
10. Si	0.5411	0.7860	0.7676	0.8406	0.7353	0.5363	0.7012	11
11. Fe	0.7305	0.8056	0.9476	0.8456	0.9486	0.7450	0.8372	3
12. Mn	0.8930	0.8742	0.9320	0.8450	0.9407	0.6317	0.8261	4

① Zooplankton, ② Turbidity

表 3 中肋骨条藻与各因子的关联度及排序结果

Table 3 The result of related value and its permutation between <i>Skeletonema costatum</i> and various factor								
因素 Factor	S ₁		S ₂		S ₃		均值 Average	排序 Permu- tation
	表层	底层	表层	底层	表层	底层		
	Surface (S ₁₁)	Bottom (S ₁₂)	Surface (S ₂₁)	Bottom (S ₂₂)	Surface (S ₃₁)	Bottom (S ₃₂)		
1. 浮游动物 ^①	0.9417	0.9766	0.9503	0.9286	0.9897	0.8747	0.9436	1
2. <i>T</i>	0.8722	0.9432	0.8630	0.7671	0.9297	0.5751	0.8251	8
3. <i>S</i>	0.8882	0.9481	0.8842	0.7901	0.9399	0.6113	0.8436	7
4. DO	0.8999	0.9576	0.8957	0.8258	0.9473	0.6190	0.8576	5
5. pH	0.8865	0.9527	0.8887	0.7972	0.9401	0.6161	0.8469	6
6. 浊度 ^②	0.8186	0.9595	0.9261	0.8612	0.9724	0.8001	0.9063	2
7. PO ₄	0.4320	0.5318	0.3842	0.4275	0.6004	0.7430	0.5198	12
8. NO ₂	0.8567	0.6898	0.8317	0.7389	0.6669	0.6885	0.7454	10
9. NO ₃	0.8741	0.9144	0.7116	0.8038	0.9277	0.6382	0.8116	9
10. Si	0.5091	0.8703	0.7531	0.6457	0.7120	0.5367	0.6712	11
11. Fe	0.9308	0.9005	0.9494	0.8751	0.9896	0.7885	0.9057	3
12. Mn	0.9159	0.9818	0.9236	0.8523	0.9705	0.6354	0.8799	4

① Zooplankton, ② Turbidity

表 4 12 个因子对 3 类藻种群密度影响度的因素排序结果

Table 4 The result of permutation at the twelve factors' related value to the population density of three kinds of the alga												
排序 Permutation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
尖刺拟菱形藻 ^①	浮游动物 ^④	Fe	浊度	Mn	DO	pH	<i>S</i>	<i>T</i>	NO ₃	NO ₂	Si	PO ₄
反曲原甲藻 ^②	浮游动物	浊度 ^⑤	Fe	Mn	DO	pH	<i>S</i>	<i>T</i>	NO ₃	NO ₂	Si	PO ₄
中肋骨条藻 ^③	浮游动物	浊度	Fe	Mn	DO	pH	<i>S</i>	<i>T</i>	NO ₃	NO ₂	Si	PO ₄

① *P. pungens*, ② *P. sigmoides*, ③ *S. costatum*, ④ Zooplankton, ⑤ Turbidity

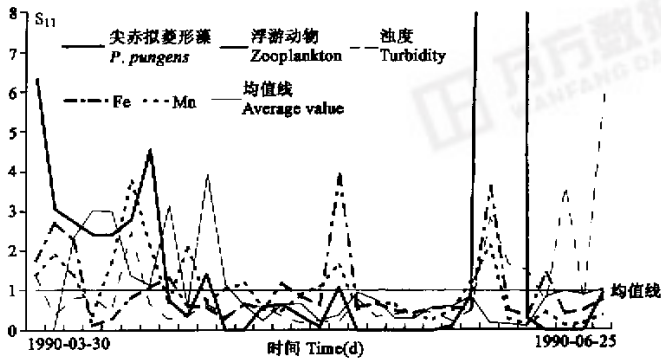


图 2 尖刺拟菱形藻与排列前四位因素在 S₁₁ 站位的比较

Fig. 2 The comparison of *Pseudonitzschia pungens* with the first four factors

结果表明:由于浮游动物以藻类为饵料,对拟尖刺菱形藻(1)、反曲原甲藻(2)、中肋骨条藻(3)的种群密度影响最大。当浮游动物密度增大时,这些藻种的种群密度是降低的,反之亦然。这一结果从图 2~图 4 中赤潮生物种群密度与浮游动物的比较可以清楚的说明这一点,因此关联度排序结果均列第 1 位实为合理,与已有的研究数据一致;浊度对(2)、(3)的影响度列第 2 位,对(1)列第 3 位。说明海水的清洁度对海洋赤潮生物有着重要的影响。另外,浊度也反映了海洋的透明度,直接影响浮游植物的光合作用。浊度大与之对

应海洋污染程度高(特别针对海洋作业和挖泥工程)和透明度降低抑制浮游植物(藻类)的增殖效应。在比较图中,浊度的峰值与 3 种藻的种群密度峰值均有良好的对应关系;Fe 对(1)的影响度列第 2 位,对(2)和(3)均列第 3 位;Mn 对(1)、(2)和(3)的影响均排在第 4 位。铁和锰因子,藻类并不直接吸收,但是它们具有催化和激活藻类酶的作用,从图上可以看出,较高的铁锰浓度是刺激这 3 类藻种群密度增殖的重要原因。本结论希望能得到实验室的验证;DO 对 3 类藻种的影响列第 5 位。在赤潮爆发之前,浮游动物的密度增大,且对应的溶解氧浓度较高。当赤潮爆发后,浮游植物大量死亡,此时又消耗大量的溶解氧,使溶解氧浓度迅速降低;pH 的影响分列第 6 位;S 和 T 对这 3 类藻种的影响度分列第 7 和第 8 位。

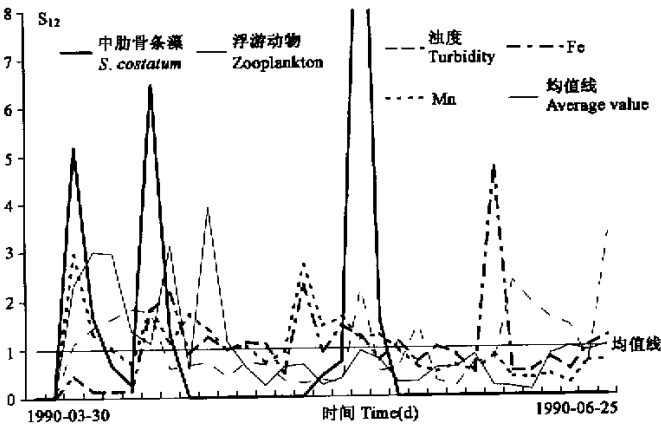


图 3 中肋骨条藻与前四位因素在 S₁₂ 站位的比较

Fig. 3 The comparison of *Skeletonema costatum* with the first four factors

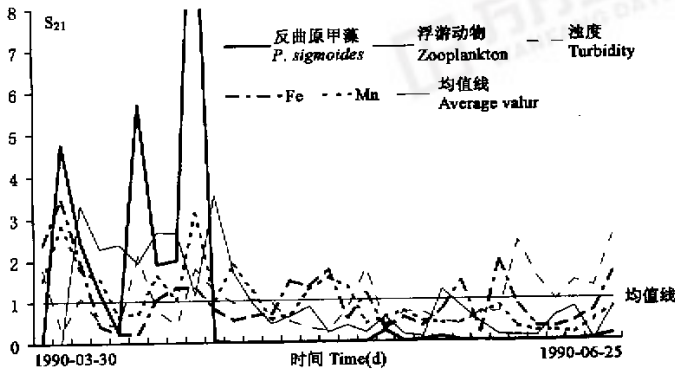


图 4 反曲原甲藻与前四位因素在 S₂₁ 站位的比较

Fig. 4 The comparison of *Prorocentrum sigmoides* with the first four factors

从表 4 的计算结果可见,除 Fe 和浊度两个因子对尖刺拟菱形藻、反曲原甲藻和中肋骨条藻的影响度在第 2 和第 3 位上互有交换以外,其它因素对该 3 类藻种的影响度的排序结果均相一致。12 个环境理化因

子对该 3 类藻种的种群密度关联排序结果分别为:浮游动物、浊度、铁、锰、溶解氧、酸碱度、盐度、温度、磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐和硅,充分表现出这 3 种赤潮生物所具有的共性。相比较之下,上述前 8 个因子对这 3 种赤潮生物均有较大的影响,从而构成中国南海大鹏湾赤潮发生的“优势”因素。而磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐和硅对这 3 类藻的种群密度增殖的影响相对较弱。作者认为该海域属于富营养化区,有充分的养分提供给藻类增殖,即使在赤潮发生时也是如此,所以该海域营养盐不能成为有效因子。其结果与文献对反曲原甲藻的讨论较相吻合^[3],而差异在于本文所考虑的影响因素较全,多达 12 个,进而能够全面反映各影响因素的比较结果。

参考文献

- [1] Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻). Analysis of grey incidence between seawater physicochemical factors and the growth of *Noctiluca scientillans* in Dapeng Bay, South China Sea. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*(in Chinese)(应用生态学报), 1996, **2**(2): 115~118.
- [2] Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻), Ruan Z F(阮志峰). Analysis of grey incidence of ecology factor in Dapeng Bay, South China Sea. *Ecologic Science*(in Chinese)(生态科学), 1997, **16**(1): 34~39.
- [3] Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻), Huang C J(黄长江). Analysis of relationships between seawater physicochemical factors and the abundance of zooplanktons in Dapeng Bay, South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*(in Chinese)(海洋与湖沼), 1998, **29**(3): 293~296.
- [4] Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻). Analysis of grey models between the environmental essential parameters of seawater and the growth of *Prorocentrum sigmoides* Bohm in Dapeng Bay, South China Sea. *Marine Environmental Science*(in Chinese)(海洋环境科学), 1999, **18**(1): 45~49.
- [5] Huang G H(黄贯虹), Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻). Analysis of grey models $\{GM(1, n)\}$ between environmental essential factors in seawater and the Growth of *Noctiluca scientillans* in Dapeng Bay, South China Sea. *Chinese Journal of Ecology*(in Chinese)(生态学杂志), 1999, **18**(4): 10~13.
- [6] Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻), Han B P(韩博平). Analysis of model between seawater environmental essential factors and phytoplankton dynamics in the Dapeng Bay, the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*(in Chinese)(海洋学报), 1999, **18**(1): 103~108.
- [7] Huang W J(黄伟建), Huang G H(黄贯虹), Jiang T J(江天久), et al. Analysis of grey incidence of chlorophyll(a, b, c) and ecology factor in Dapeng Bay, South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*(in Chinese)(海洋学报), 2000, **22**(1): 134~140.
- [8] Huang W J(黄伟建), Huang G H(黄贯虹), Jiang T J(江天久), et al. The relationships between chlorophyll-b concentration and related environmental factors of seawater in Dapeng Bay based on grey model relative analysis. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*(in Chinese)(热带亚热带植物学报), 2001, **9**(1): 7~13.
- [9] Huang W J(黄伟建), Qi Y Z(齐雨藻), Han B P(韩博平). The identification of mechanism model on the population dynamics of *Prorocentrum sigmoides* in the Dapeng Bay, South China Sea. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese)(应用生态学报), 1995, **6**(1): 81~86.
- [10] Huang G H(黄贯虹), Guo Y Q(郭远琼), Huang W J(黄伟建). Study of a model on change ratio of the population densities dynamics of *prorocentrum sigmoides* bohm in the Dapeng Bay, South China Sea. *Chinese Journal of Ecology*(in Chinese)(生态学杂志), 1998, **17**(2): 7~11.
- [11] Fu L(傅立). *Grey Systematic Theory and Its Application* (in Chinese), Beijing: Science and Technology Documentation Publishing House, 1992.