南海放射虫与初级生产力的古海洋学转换关系

陈木宏 黄良民 涂霞 郑范

(中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

摘要 根据南海 46 个调查站位的表层沉积物中放射虫群和上覆水体中初级生产力的分析测试结果, 采用主分量因子分析与多元线性和非线性回归分析相结合的方法, 初步探讨并建立了南海放射虫组合因子与初级生产力的转换函数. 结果表明: 南海放射虫组合与初级生产力的非线性转换函数公式具有较好的参数指标, 其中因子分析的方差累计总贡献为 83.6%, 共同度均大于 0.940 347; 回归分析中的复相关系数为 0.848 88, 解释方差 72.059%; 转换函数公式的平均估计误差为 $53.778 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$, 占实测平均值的 14.69%, 计算准确率为 85.31%.

关键词 南海放射虫 初级生产力 古海洋学 转换函数

在古海洋学研究中, 人们已经利用碳稳定同位素和底栖有孔虫列式壳类群的丰度等探讨古生产力及古环境^[1~3], 并建立了海底沉积物中有机碳与古生产力的关系公式^[4, 5], 根据有限条件从输出生产力的角度研究古海洋环境变迁中的浮游生物总体分布情况.

海洋中初级生产力是整个食物链的基础, 是海洋生态系统和海洋环境特征的重要指标. 放射虫属原生动物, 是海洋微体浮游动物的主要类群之一. 它们个体微小、数量巨大、种类繁多, 是次级生产力的重要部分, 与初级生产力之间存在着一定的相关关系. 本文试图以南海为例, 探索并建立表层沉积物中放射虫与初级生产力的转换函数, 为研究地史时期中的古初级生产力提供一种新方法.

初级生产力的形成与分布受太阳辐射产生的真光层深度、水温度和海水中营养盐含量的影响和控制, 以及随着纬度、季节、海水混浊度和其他天气条件等而变化^[6]. 南海海域广阔、地形复杂、水深变化较大又明显受陆源水影响的边缘海中, 初级生产力的分布呈现着较为复杂的情形. 有关的数据表明多数调查站位的年平均初级生产力为 $300\sim 500 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$, 其中在中部海区个别站位不足 $100 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$, 而在北部陆架和南部巴拉望海槽的一些站位则可分别高达 852 和 $710 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$. 初级生产力的季节变化较大, 如西沙群岛在 4 月份为 $325 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$, 而在 12 月份仅为 $58 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$ ^[6], 在南沙群岛的春季至夏季间平均为 $390\sim 422 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$ ^[7], 而在大亚湾区域的初级生产力变化范围是 $40\sim 1450 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$, 平均为 $317 \text{ mgC/m}^2\cdot\text{d}$ ^[8]. 可见, 在南海这样一个环境具复杂性和多样性的边缘海中, 初级生产力的年平均分布似乎规律性不甚明显.

1 材料与方法

1.1 样品和资料来源

本项研究共选取 46 个站位(表 1)的表层样放射虫分析结果和相应站位的初级生产力实测资料. 初级生产力数据实际上是源自中国科学院南海海洋研究所历年来在南海各海区多次调查和分析的平均结果, 采用单位为 $\text{mgC/m}^2\cdot\text{d}$, 其含义是每平方米每天的真光层海水中平均碳毫克量. 真光层的厚度(深度)在不同的区域因海况与天气条件等的不同而异. 初级生产力的调查站位多数与放射虫取样站位相同, 故可直接取得对应的分析数据. 仅 NE7919,

NE7921, NE7953 和 NE7955 站的初级生产力调查位置略微偏离放射虫取样站位, 因此这 4 个站位的初级生产力是用数据内插方法求取的. 以此尝试推导初级生产力与放射虫分布的关系转换计算公式.

表1 分析站位表

序号	站号	经度	纬度	水深/m	序号	站号	经度	纬度	水深/m
1	S14	115°00' E	21°09' N	100	24	NS8619	111°17. 65' E	5°10. 34' N	121
2	S183	114°00' E	21°00' N	92	25	NS8633	117°43. 76' E	10°07. 75' N	1 480
3	S188	114°00' E	20°10' N	118	26	NS8658	112°06. 02' E	6°03. 32' N	1 229
4	S338	113°00' E	20°30' N	86	27	NS8701	117°58' E	10°58. 41' N	1 759
5	S493	112°00' E	20°20' N	74	28	NS8710	114°59. 95' E	7°01. 28' N	2 772
6	NE7903	118°28' E	23°29' N	40	29	NS8718	113°42. 58' E	5°54. 18' N	95
7	NE7906	117°58' E	22°56' N	36	30	NS8729	112°16. 88' E	4°59. 30' N	100
8	NE7919	116°01' E	21°59' N	85	31	NS8733	111°15. 55' E	3°30. 70' N	53
9	NE7921	116°59' E	22°01' N	84	32	NS8744	109°59. 57' E	4°59. 93' N	133
10	NE7923	118°51' E	22°01' N	482	33	NS8746	109°59. 67' E	4°00. 17' N	100
11	NE7942	117°58' E	21°00' N	1 685	34	NS8751	109°25. 17' E	5°39. 99' N	145
12	NE7948	115°00' E	19°58' N	680	35	NS8753	110°27. 68' E	7°01. 07' N	1 740
13	NE7950	118°04' E	20°00' N	3 000	36	NS8771	112°37. 11' E	3°46. 87' N	36
14	NE7953	116°02' E	19°51' N	1 500	37	NS8404	110°36. 65' E	9°31. 75' N	2 935
15	NE7955	116°58' E	19°49' N	2 180	38	NS8741	111°00. 00' E	6°37. 40' N	1 640
16	NE7964	115°05' E	19°02' N	2 070	39	NS8909	114°12. 85' E	9°26. 91' N	2 609
17	NE8208	116°00' E	21°00' N	102	40	NS8912	115°08. 55' E	9°34. 49' N	2 156
18	NS8405	109°40. 18' E	8°55' N	1 100	41	NS8951	111°17. 08' E	8°14. 15' N	1 950
19	NS8409	108°50. 05' E	7°00. 41' N	140	42	NS89124	112°15. 08' E	8°29. 67' N	1 780
20	N8532	117°01. 26' E	9°10. 19' N	2 140	43	NS9070	108°39. 90' E	8°52. 02' N	94
21	NS8602	111°32. 66' E	11°00. 33' N	3 828	44	NS9082	113°54. 51' E	8°38. 33' N	1612
22	NS8603	111°31. 19' E	10°00. 11' N	3 553	45	NS90103	110°21. 13' E	11°10. 37' N	1 506
23	NS8617	111°19. 83' E	6°02. 64' N	1 473	46	NS9304	112°43. 00' E	10°25. 00' N	2 540

1.2 种类选择

首先对该海区的放射虫进行生物分类学研究, 对每一个被鉴定的种类均根据模式种特征进行判别, 在分析了一些同物异名等误差之后, 从种级确定每个鉴定标本的基本区别与归类, 从中确定南海表层沉积物中放射虫的种类组成为 286 种^[9, 10], 进而对全部分析站位的种类进行鉴定与相对丰度统计. 在此基础上进行初步的种类选择, 种类选择的主要原则与依据是种类特征可靠、生态意义明确和沉积分布广泛. 据此, 挑选 100 个种类作为因子分析的预选种.

为了客观的反映所挑选种类的丰度在每一个样品中占整个放射虫类群的比例, 对每个样品均做全群分析, 统计每一个种类的丰度, 累计总数为 400~ 500 个, 取被选种的个体数作为基本分析数据. 因此, 各个种在每个站中数据的统计意义是代表该种在该站位中的相对丰度, 在不同区域具有统一的统计意义并与不同的环境参数相对应.

1.3 分析方法

转换函数公式的建立采用南海古温度转换函数分析的类似方法^[11], 即利用标准的多元线性与非线性回归技术从主分量因子分析中得出的主因子原始得分(方差极大因子矩阵, Varimax factor matrix)作为回归因子与初级生产力的实测数据进行最佳回归方程分析, 给出各自的转换函数计算公式的系数与截距, 并讨论它们的共同度、复相关系数和标准误差.

2 结果与讨论

2.1 数据处理与因子分析

首先将初选的 100 个种类的统计丰度分别与初级生产力数据进行相关分析, 结果显示除个别相关性较小的种类为正相关外, 绝大部分的放射虫在沉积物中的含量与现代上覆水体中的初级生产力呈负相关关系. 根据相关分析的结果, 从中选取 42 个相关性较好的种类作因子分析. 在主分量因子分析过程中首先对种类做进一步萃取, 即逐步删去共同度指标相对较小的种类, 保留共同度较大的种类共 26 种(表 2), 最终使因子分析的方差累计总贡献最大达到 83.613 79%(取 6 个因子). 其中因子 1 的特征值明显高于其他各因子, 为 13.912 8%, 第 2 个因子仅为 2.029 16%, 其余 4 个因子的特征值均介于 1.836 57% 和 1.003 61% 之间, 表明主分量分析的结果较好的突出了因子的含义和代表了因子组合互补与统一的特征. 各个种类变量的共同度均在 0.940 347 以上, 说明主分量因子分析的结果较好地解释了各个变量的信息, 而且最后所选取的种类变量之间也具有较好的相互关系. 因子分析的结果主要获得因子载荷矩阵和因子得分矩阵(表 3).

表 2 因子分析中的 26 个放射虫种类名称及代号

F11: <i>Actinomma arcadophorum</i> Haeckel	F15: <i>Amphispyris costata</i> Haeckel
F17: <i>Anthocyrtidium ophirens</i> (Ehrenberg)	F21: <i>Botryocyrtis scutum</i> (Harting)
F22: <i>Buccinosphaera invaginata</i> Haeckel	F30: <i>Druppattractus testudo</i> (Ehrenberg)
F31: <i>Druppula cocos</i> Haeckel	F32: <i>Euchitonia furcata</i> Ehrenberg
F34: <i>Euchitonia triangulum</i> (Ehrenberg)	F35: <i>Eucyrtidium hexagonatum</i> Haeckel
F46: <i>Lamprocyclus maritimus maritimus</i> Haeckel	F50: <i>Lithelius nautiloides</i> Popofsky
F55: <i>Lithostrobilus seriatus</i> Haeckel	F56: <i>Lophophaenoma witjazii</i> Petrushevskaya
F58: <i>Lophospyris pentagona pentagona</i> (Ehrenberg)	F66: <i>Pterocanium praetextum</i> (Ehrenberg)
F67: <i>Pterocanium trilobum</i> (Haeckel)	F68: <i>Pterocorys campanula</i> Haeckel
F73: <i>Sethocorys odyseus</i> Haeckel	F74: <i>Sethopyramis quadrata</i> Haeckel
F75: <i>Siphocampe corbule</i> (Harting)	F79: <i>Spongaster tetras</i> Ehrenberg
F81: <i>Spongocore diplocylindrica</i> Haeckel	F96: <i>Theoconus junonis</i> Haeckel
F97: <i>Theocorythium trachelium</i> (Ehrenberg)	F102: <i>Tristyluspyris palmipes</i> Haeckel

2.2 因子意义

由于采用与初级生产力相关性较好的种类做主分量分析, 结果给出的因子表示与初级生产力密切相关的意义. 第 1 个因子为主分量, 其特征值较突出, 其他 5 个因子的特征值明显较小. 主分量分析的含义表明它们一起组成与初级生产力相关的因子群, 互为补充信息, 共同说明初级生产力影响的因素.

按照主分量因子分析的方法, 本文仅寻求与初级生产力有关的因子, 因子数量的确定是为解释变量的信息含量和对因子的贡献程度服务. 因此, 所分析得出的各个因子只代表与初级生产力有关的主成分或主分量, 按主次之分可分别称为 F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 和 F_6 , 而不给出每个因子的其他含意及相应名称. 由于各因子只有主次之分, 不存在代表不同的环境因素, 所以这种不冠以其他非初级生产力名称的做法是较为符合客观实际的, 是采用主分量因子分析的必然结果. 它将在以下回归分析中保持完全一致的思路与含义, 最终求出的转换函数公式具有明确的分析意义和应用价值.

表3 因子得分矩阵

序号	站号	FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3	FACTOR4	FACTOR5	FACTOR6
1	S14	- 0.517 13	- 0.773 91	- 0.412 97	- 0.251 79	- 0.163 67	- 0.199 09
2	S183	- 0.459 73	- 0.888 27	- 0.380 41	- 0.293 33	- 0.148 22	- 0.222 71
3	S188	- 0.356 50	- 763 62	- 0.453 59	- 0.345 84	- 0.126 57	- 0.247 24
4	S338	- 0.524 65	- 742 01	- 0.426 94	- 0.298 26	- 0.169 80	- 0.186 37
5	S493	- 0.504 24	- 880 35	- 0.421 63	- 0.317 34	- 0.135 72	- 0.165 02
6	NE7903	- 0.465 28	- 912 76	- 0.413 23	- 0.282 34	- 0.170 03	- 0.148 66
7	NE7906	- 0.521 68	- 0.795 56	- 0.428 45	- 0.333 84	- 0.129 53	- 0.172 22
8	NE7919	- 0.308 93	- 0.486 31	- 0.486 69	- 0.339 69	- 0.297 72	- 0.342 52
9	NE7921	0.315 8	- 0.884 47	- 0.369 29	- 0.165 98	- 0.166 66	- 0.852 12
10	NE7923	- 0.443 82	- 0.843 66	- 0.364 38	- 0.239 45	- 0.108 07	- 0.285 72
11	NE7942	- 0.524 65	- 0.742 01	- 0.426 94	- 0.298 26	- 0.169 80	- 0.186 37
12	NE7948	0.234 49	0.601 02	- 0.956 59	0.483 93	- 0.116 26	- 0.624 26
13	NE7950	- 0.457 91	0.261 07	- 0.765 62	2.211 9	- 0.468 12	0.611 05
14	NE7953	- 0.038 84	0.162 22	- 0.545 14	1.926 28	- 0.804 27	0.600 36
15	NE7955	- 0.360 31	- 0.706 06	0.733 53	3.491 96	- 0.429 44	- 0.028 65
16	NE7964	0.550 96	0.684 24	- 0.670 14	1.602 92	0.66937	- 0.612 93
17	NE8208	- 0.504 24	- 0.880 35	- 0.421 63	- 0.317 34	- 0.135 72	- 0.165 02
18	NS8405	- 0.161 83	0.921 84	- 0.411 87	- 0.626 70	0.031 65	0.019 59
19	NS8409	- 0.549 26	- 0.142 48	- 0.482 69	- 0.491 93	- 0.192 49	- 0.235 80
20	NS8532	0.097 16	0.195 06	4.938 14	- 0.313 54	- 0.770 15	0.150 27
21	NS8602	0.458 49	- 0.080 22	1.787 74	- 1.120 82	- 0.529 18	2.266 77
22	NS8603	- 0.694 15	0.567 82	1.290 52	- 0.544 61	0.635 08	1.611 01
23	NS8617	- 1.305 96	2.491 07	- 0.113 90	1.558 72	- 0.562 89	- 0.448 54
24	NS8619	- 0.653 47	0.352 14	0.599 61	- 0.357 52	0.111 33	- 0.831 19
25	NS8633	0.1737 2	0.118 40	0.903 80	- 0.746 88	1.263 66	- 0.279 47
26	NS8658	- 0.786 57	1.221 03	0.665 30	- 0.332 99	0.076 93	- 0.610 65
27	NS8701	2.930 54	- 0.814 92	1.566 26	0.172 20	- 0.721 20	- 2.544 98
28	NS8710	0.570 84	- 0.675 74	0.042 47	- 0.482 98	- 0.395 44	0.477 16
29	NS8718	- 0.510 68	- 0.827 13	- 0.41730	- 0.284 56	- 0.149 69	- 0.182 05
30	NS8729	- 0.517 57	0.128 02	- 0.45848	- 0.502 88	- 0.198 41	- 0.370 81
31	NS8733	- 0.355 92	- 0.997 76	0.258 95	- 0.177 00	- 0.519 69	- 0.142 74
32	NS8744	- 0.757 94	- 0.042 20	- 0.122 19	- 0.465 90	- 0.153 71	- 0.204 95
33	NS8746	- 0.610 95	- 0.314 37	- 0.303 32	- 0.519 91	- 0.042 79	- 0.132 84
34	NS8751	- 0.764 49	1.470 88	0.249 24	- 0.435 56	- 0.205 04	- 0.691 03
35	NS8753	- 0.582 94	0.55737	0.889 61	- 0.507 55	- 0.322 94	- 0.103 33
36	NS8771	- 0.504 24	- 0.880 35	- 0.421 63	- 0.317 34	- 0.135 72	- 0.165 02
37	NS8404	0.046 25	0.537 44	0.087 40	0.072 57	0.02944	- 0.068 77
38	NS8741	- 0.627 11	4.077 26	- 0.636 38	- 1.023 54	- 0.773 76	- 0.460 67
39	NS8909	1.453 60	- 0.168 12	- 1.087 83	- 0.234 84	- 1.389 76	3.701 06
40	NS8912	- 0.544 54	- 0.052 15	- 0.105 73	- 0.712 15	5.091 36	1.626 01
41	NS8951	1.734 16	- 0.206 75	0.145 74	- 0.375 10	- 0.293 87	0.705 03
42	NS89124	1.159 85	0.14773	0.584 53	1.929 21	3.174 94	- 1.219 74
43	NS9070	- 0.504 24	- 0.880 35	- 0.421 63	- 0.317 34	- 0.135 72	- 0.165 02
44	NS9082	3.282 76	1.645 25	- 1.409 54	- 1.232 59	0.173 68	0.501 62
45	NS90103	2.764 43	0.096 96	- 0.737 05	- 0.291 74	0.131 09	- 1.257 81
46	NS9304	0.646 69	0.145 07	0.330 34	2.450 42	- 0.156 52	2.284 39

根据因子载荷矩阵的分析结果, 变量中的放射虫种类 *Actinomma arcadophorum*, *Lophophaenoma witjazii*, *Lophospyris pentagona pentagona*, *Pterocanium praetextum*, *Pterocanium trilobum* 和 *Theocorythium trachelium* 对因子 1(F_1) 贡献较大, 这些种类的组合成为第 1 个因子的代表. 由于第 1 个因子的特征值明显高于其他各因子的特征值, 因此这一放射虫种类组合实际上也代表了放射虫与海洋中初级生产力关系的主因子(或主成分). 在第 2 个因子中, 载荷较高的种类是 *Euchitonina trianglulum*, *Spongaster tetras* 和 *Euchitonina furcata*, 其他种类在该因子中的载荷均很低. 在第 3 个因子中, 载荷较高的类型为 *Lithelius nautiloides* 和 *Sethocorys odysseus*, 其他种类均明显载荷较低. 与此相似, 在因子 4、因子 5 和因子 6 中, 各自的代表种仅有一种, 分别为 *Theoconus junonis*, *Buccinosphaera invaginata* 和 *Amphispyris costata*, 这 3 个种在对应的 3 个因子中载荷明显较高, 贡献较大, 是各因子的主要代表.

上述分析结果表明, 第 1 因子中载荷较高的相关种类较多, 有 6 个种. 第 2 因子和第 3 因子中的相关种类明显减少, 分别为 3 个种和 2 个种, 而在第 4~6 因子中, 具有明显代表性的种类各自仅有 1 个种. 随着因子重要性的次序排列, 与特征值表明的情況类似, 具有代表性的种类数量也相应减少.

2.3 回归分析

建立南海初级生产力的转换函数, 采用最小二乘最佳拟合的方法对因子分析的各因子得分(表 3)与相应站位的初级生产力进行多元线性与非线性的回归分析. 依据复相关系数等参数指标, 两种类型的分析结果表明: 放射虫的含量分布与初级生产力之间的非线性函数关系比线性函数关系明显得多, 前者具有较大的复相关系数和较小的估计误差.

放射虫组合因子与初级生产力的线性回归分析结果显示两者间的复相关系数仅为 $R = 0.541\ 564\ 37$, 显著性 $P < 0.027\ 47$, 标准估计误差为 118.56, 其线性函数关系可用以下公式表示:

$$P_L = 366.1957 - 21.6138F_1 - 17.2291F_2 - 20.4577F_3 - 45.9013F_4 - 27.4339F_5 - 31.8365F_6.$$

利用该公式对南海 46 个站位的初级生产力进行检验计算, 结果显示各站位的实测值与估算值差别普遍较大, 估计误差(残差)的范围为 $-206.836 \sim 327.542$, 中间值是 -13.883 , 准确性较差. 估算值与观测值的相关关系较小, 尤其在数值大于 380 时误差较大, 所以该线性关系公式对应用于推算古初级生产力存在明显的问题.

但是, 放射虫组合因子与初级生产力却显示了较好的非线性函数关系. 其中的分段回归分析效果较好, 结果表明它们的复相关系数为 0.848 88, 方差解释为 72.059%.

在统计的 46 个站位中, 仅有 2 个站位的估计误差超过 $100\text{ mgC}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 其他各站位的误差绝对值均在 $100\text{ mgC}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ 以下. 46 个站位的估计误差绝对值平均仅有 $53.778\ 1\text{ mgC}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, 而且估计值与实测值也显示了较好的相关

图1 利用转换函数计算的初级生产力估算值与实测值关系

关系(图1). 因此, 南海沉积物中放射虫含量与初级生产力有着较好的非线性函数关系, 其转换计算公式如下(具断点的分段回归, 断点为: 366. 195 7):

< 366. 1957(mgC/m²·d) 为

$$P_{NL} = 266.6163 + 7.458862F_1 + 5.988272F_2 - 11.7289F_3 - 10.0128F_4 - 21.1232F_5 - 27.9156F_6,$$

> 366. 195 7(mgC/m²·d) 为

$$P_{NL} = 469.3732 - 17.1084F_1 - 23.7288F_2 - 3.17435F_3 + 30.83993F_4 - 46.5912F_5 + 63.28339F_6,$$

式中 $F_1, F_2, \dots, F_6$ 分别代表主分量分析结果得出的得分矩阵中每个样品的 6 个因子得分参数(表3). 因子得分矩阵与上述式子共同定义并组成了南海放射虫与初级生产力的转换函数. 用于回归分析的初级生产力实测值范围是: 110~ 720 mgC/m²·d, 平均为 366. 估计误差平均值占实测平均值的 14. 69%, 系统计算精确度为 85. 31%.

3 主要结论

(1) 南海放射虫在表层沉积物中的分布与现代海洋环境中的初级生产力的回归分析显示, 两者间的线性函数关系不显著, 而非线性函数关系明显较好, 表明它们之间实质上是一种非线性关系.

(2) 南海放射虫组合与初级生产力的非线性转换函数公式具有较好的参数指标, 其中因子分析的方差累计总贡献为 83. 6%, 共同度均大于 0. 940 347; 回归分析中的复相关系数为 0. 848 88, 解释方差 72. 059%; 转换函数公式的平均估计误差 53. 778 mgC/m²·d, 占实测平均值的 14. 69%, 计算准确度为 85. 31%.

(3) 南海沉积物中放射虫的分异度和各个种类分别与初级生产力的相关分析显示它们普遍存在负相关关系, 表明它们之间在生态上可能既互相影响, 又互相制约, 也受到沉积环境的作用, 为不同的环境主因子所控制.

(4) 分析观测海洋初级生产力与海底表层沉积物中放射虫组合的相关性, 并建立转换函数公式, 旨在寻找利用放射虫化石群研究古海洋环境中古初级生产力的有效方法和手段.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49476285)、中国科学院资源与生态环境研究重大项目(编号: KZ951-A1-402)和国家专项(编号: 97-926)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Sarnthein M, Winn K. Reconstruction of low and middle latitude export productivity, 30 000 years to present: implications for global carbon reservoirs. In: Schlesinger M, ed. Climate-Ocean Interaction. Kluwer Academic Publishers, 1990. 319~ 342
- 2 Corliss B H, Chen C. Morphotype patterns of Norwegian Sea and deep-sea benthic foraminifera and ecological implications. *Geology*, 1988, 16: 716~ 719
- 3 卞云华, 王律江, 汪品先. 底栖有孔虫指示含氧量与古生产力. 见: 业治铮, 汪品先主编, 南海晚第四纪古海洋学研究. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992. 227~ 233
- 4 Sarnthein M, Winn K, Puppessy C. Global variations in surface ocean productivity in low and midlatitudes: influence on CO₂ reservoirs of the deep ocean and atmosphere during the last 21 000 years. *Paleoceanography*, 1988, 3: 361~ 399

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-3-327>

- 5 Siesser W G. Paleoproductivity of the Indian Ocean during the Tertiary period. *Global & Planetary Change*, 1995, 7(1-2): 71~ 88
- 6 Guo Y J. Primary productivity and Phytoplankton in China Seas. In: Zhou D, et al. eds. *Oceanology of China Seas*, 1994, 1: 227~ 242
- 7 黄良民. 南沙群岛海区的光合色素和初级生产力的分布特征初探. 见: 中国科学院南沙综合科学考察队编, 南沙群岛及其邻近海区海洋生物研究论文集(2). 北京: 海洋出版社, 1991. 34~ 49
- 8 Huang L, Chen O, Yuan W. Characteristics of chlorophyll distribution and estimation of primary productivity in Dava Bay. *Asian Marine Biology*, 1989. 6: 115~ 128
- 9 陈木宏, 谭智源. 南海中、北部沉积物中的放射虫. 北京: 科学出版社, 1996. 1~ 271 (附 54 个图版)
- 10 Chen M, Tan Z. Radiolarian distribution in surface sediments of the northern and central South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 173~ 194
- 11 陈木宏, 涂霞, 蔡慧梅, 等. 南海放射虫的古温度转换函数研究. 见: 北京大学地质学系编, 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 1998. 1 053~ 1 066

(1998-04-05 收稿, 1998-09-17 收修改稿)

全球定位系统遥感水汽总量

李成才 毛节泰 李建国 夏青^④

(北京大学国家暴雨监测与预报重点实验室, 北京 100871; ④国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要 介绍了全球定位系统(GPS)地基遥感水汽的基本原理和方法. 利用 1997 年夏季共 3 周的东亚地区 GPS 跟踪站数据和 IGS 星历, 应用 GAMIT 软件进行了解算. 结合相应的地面气象资料反演了上海和武汉 GPS 遥感水汽总量 30 min 间隔的变化曲线, 与探空资料进行对照均方根偏差为 0.50 cm 左右.

关键词 全球定位系统 遥感 水汽

水汽监测在天气预报和气候研究领域越来越占有重要的地位. 全球定位系统(Global positioning system, GPS)技术的发展为遥感水汽提供了新的手段. Bevis 等人^[1]提出了采用地基 GPS 技术探测大气水汽含量的原理. Yuan 等人^[2]、Gorbunow 等人^[3]论证了结合掩星技术通过对大气折射率的遥感来反演大气的温湿特性的可行性. Rocken 等人^[4]在美国 Kansas 和 Oklahoma 组织了 GPS/STORM 观测试验, 并提出在参考站引入水汽微波辐射计(Water vapor radiometer, WVR)以消除差分法所带来的系统误差的“相对 GPS 方案”, 应用 Bernese 软件和 IGS 轨道处理了数据. Duan 等人^[5]利用 MIT 的 GAMIT/GLOBK 软件, 也处理了这批数据, 提出引入距离观测网遥远的 GPS 跟踪站的数据以降低系统误差的“绝对 GPS 方案”(无需 WVR 定标)可以得到良好的结果. GPS 遥感水汽总量具有不受降水的影响、时间分辨率高、设备维护简单、不需校准等优势. 研究在我国利用东亚地区跟踪站和一般观测站的观测数据来反演水汽的试验方案和反演技术, 可为将来的气象业务应用提供重要参考依据.

1 基本原理和处理方法

GPS 技术通过观测 GPS 卫星信号传输到 GPS 接收机的时间来测量接收机天线的位置,

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-3-327>