

基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集 (2003–2012)

陶 醉*, 周 翔, 马 胜

中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘 要: 研究海洋初级生产力, 对于理解全球生态系统健康状况、生物化学循环和气候变化具有重要意义。笔者于 2014 年发表了用于海洋初级生产力遥感监测的 ABPM 模型, 该模型利用 MODIS 卫星 2003–2012 年月度产品数据中的浮游植物吸收系数、真光层深度、490 nm 漫衰减系数和光合有效辐射 4 类产品数据和 2009 年世界海洋地图集中的氮浓度剖面观测数据, 计算出全球海洋初级生产力遥感监测数据集。该数据集包括了近 10 年来共 120 个月的全球海洋初级生产力 9 km 分辨率月度空间分布数据。为了检验定量反演的精度, 本文应用海表三个固定站点和三条海上走航的实测数据对数据集结果进行验证。三个固定站点包括美国夏威夷海洋站点、大西洋百慕大群岛站点和美国加利福尼亚站点; 三条海上走航数据包括地中海海域走航 (DYFAMED)、南极斯科舍海域走航 (AMLR) 和南极帕尔默站海域走航 (WAP) 数据。验证结果表明, 用 ABPM 模型计算得到的全球海洋初级生产力遥感监测数据比其他模型计算所得的数据精度较高。由于该数据反映了全球海表碳循环过程中海洋生物固碳量的时空变化特征, 因此, 可以为全球碳循环、气候变化和生物资源潜在生产力研究提供基础性的参考数据。

关键词: 全球; 海洋; 初级生产力; 遥感监测; 月度数据

DOI: 10.3974/geodp.2017.02.03

1 前言

海洋浮游植物光合作用作为海洋生态系统循环的动力和基础之一, 在全球海洋生物化学循环中扮演着十分重要的角色, 对全球碳循环、气候变化具有深远影响^[1–2]。海洋浮游植物通过光同化作用将无机碳转化为有机碳的能力称作海洋初级生产力, 其中除去呼吸作用消耗来维持自身生理需求的部分, 剩下积累的有机碳, 称为海洋净初级生产力 (Net Primary Production-NPP)。海洋中的初级生产力在全球碳循环中起着重要作用, 近 46% 的全球生物固碳来源于海洋初级生产过程^[3]。因此, 海洋初级生产力的快速准确监测对于全球碳循环过程研究、海洋碳循环研究、局地海域生态管理和海洋渔场管理具有重要意义。基于 MODIS 卫星 4 种产品数据 (浮游植物吸收系数^[4], 真光层深度^[5], 490 nm 漫衰减系数^[6]和光合有效辐射^[7]4 类产品数据), 利用基于浮游植物吸收的海洋初级生产力模型 (ABPM)

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-11-02; 出版日期: 2017-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41501389); 遥感科学国家重点实验室开放基金 (OFSLRSS201509)

*通讯作者: 陶醉 L-4530-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, taozui@radi.ac.cn

论文引用格式: 陶醉, 周翔, 马胜. 基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集 (2003–2012) [J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(2): 149–156. DOI: 10.3974/geodp.2017.02.03.

数据集引用格式: 陶醉, 周翔, 马胜. 基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集 (2003–2012) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014. DOI: 10.3974/geodb.2014.02.03.V1.

计算得到的 2003–2012 年 9 km 分辨率的全球海洋月度 NPP 数据集，能够较为准确地反映全球海洋初级生产力月度的空间分布特征。

2 数据集元数据简介

基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集(2003–2012)^[8] 的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 GlobalMarineABMP_NPP 元数据简表

条 目	描 述
数据库（集）名称	基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9km 分辨率月度数据集(2003–2012)
数据库（集）短名	GlobalMarineABMP_NPP
作者信息	陶醉 L-4530-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, taozui@radi.ac.cn 周翔 L-7359-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, zhouxiang@radi.ac.cn 马胜 L-4533-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, masheng@radi.ac.cn
地理区域	全球
数据年代	2003–2012 年
时间分辨率	月
空间分辨率	9 km
数据格式	.hdf, .xlsx
数据量	1,064 MB
数据集组成	本数据集由下列数据文件组成： (1) 全球海洋初级生产力数据组，共 120 个月度数据，每月一个数据文件，全部数据文件存放于 NPP_DATA/下 (2) 附带数据表 1, AttachFile1.xlsx 为应用的 MODIS 数据文件名及其来源表格 (3) 附带数据表 2, AttachFile2.xlsx 为数据成果文件组成表格 (4) 附带数据表 3, AttachFile3.xlsx 为用于验证的 3 个站点和 3 个走航数据获取的时间和地点（经纬度）表格
基金项目	国家自然科学基金（ 41501389 ）；遥感科学国家重点实验室开放基金（ OFSLRSS201509 ）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：(1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；(2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；(3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；(4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[9]

3 数据研发方法

3.1 算法原理

基于 ABPM 模型的海洋初级生产力遥感监测数据研发方法包括模型建立、参数值估算和模型检验三个步骤。在近几年对于海洋初级生产力遥感监测模型进行研究的基础上，笔者于 2014 年发表了用于海洋初级生产力遥感监测的 ABPM 模型，关于该模型的算法详见文献[10]。

ABPM 模型认为浮游植物光合作用必须经过光化学吸收反应，这个过程中通过光合作用吸收多少光能，则对应地会生成一定量的有机碳，监测浮游植物光合作用效率就可以通过监测浮游植物吸收光能的情况进行。因此，可以利用浮游植物吸收光量子数与光合量子产率（ ϕ , 单位摩尔光能参与光合作用后所固定的有机碳量）的乘积来计算浮游植物初级生产力。ABPM 模型的基本公式如下：

$$NPP = \int_0^{z_{eu}} Npp(z) dz \quad (1)$$

$$NPP(z) = \phi(z) \times \bar{a}_{ph}(z) \times PAR(z) \times \exp(-v \times PAR(z)) \quad (2)$$

$$\bar{a}_{ph}(z) \approx \frac{\int_{400}^{700} a_{ph}(\lambda) d\lambda}{700 - 400} \approx 0.952 \times \frac{\sum_{i=1}^s \left[\left(a_{ph}(\lambda_{i+1}) + a_{ph}(\lambda_i) \right) \times (\lambda_{i+1} - \lambda_i) / 2 \right]}{667 - 412} \quad (3)$$

$$PAR(z) = \int_{400}^{700} E_d(\lambda, 0) \times \exp(-K_d(\lambda) \times z) d\lambda \quad (4)$$

$$\phi(z) = \frac{K_m}{k_m + E(z)} \phi_{\max} \quad (5)$$

$$\phi_{\max} = \begin{cases} 0.03, & z < z_{no3} \\ 0.03 + 0.05 \times (1 - \exp(-0.025 \times (z - z_{no3}))), & z \geq z_{no3} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\bar{a}_{ph}(z)$ 为浮游植物光谱平均吸收系数； v 为光合抑制因子； $E_d(\lambda, 0)$ 是海表面波段 λ 的下行辐照度； $K_d(\lambda)$ 是波段 λ 的漫衰减系数； ϕ_{\max} 是最大光合量子产率； K_m 是当 $\phi(z)$ 达到最大光合量子产率一半时的太阳辐照度； z_{no3} 为氮压线深度，即海洋氮浓度剖面随着水深的增加首次达到 $0.5 \mu\text{mol}$ 的深度。

本文所用到的海洋初级生产力估算模型输入数据包括：浮游植物吸收系数（Phytoplankton Absorption Coefficient）、真光层深度（Euphotic Depth）、490 nm 漫衰减系数（Diffuse Attenuation Coefficient at 490 nm）和光合有效辐射（Photosynthetically Available Radiation）4 类卫星遥感数据（<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>），以及 2009 年 WOA（World Ocean Atlas）氮浓度剖面观测数据^[11]（<http://www.nodc.noaa.gov/>）。MODIS 数据作为本研究的基础数据，数据文件目录列于附录文件 1（AttachFile1.xlsx）。引用的数据文件均能直接链接数据来源网址（NASA）。

利用这些卫星遥感数据产品和 WOA 氮浓度观测融合数据，依据建立的海洋初级生产力遥感观测模型，可以获取全球海域海洋真光层内积分初级生产力遥感估算数据集。

表 2 浮游植物吸收系数数据集节选

序号	APH_DATA_Source_List
1	A20030012003031.L3m_MO_GIOP_aph_412_giop_9km.bz2
2	A20030012003031.L3m_MO_GIOP_aph_443_giop_9km.bz2
3	A20030012003031.L3m_MO_GIOP_aph_488_giop_9km.bz2
4	A20030012003031.L3m_MO_GIOP_aph_531_giop_9km.bz2
5	A20030012003031.L3m_MO_GIOP_aph_547_giop_9km.bz2
...	...
120	A20123362012366.L3m_MO_GIOP_aph_667_giop_9km.bz2

注：总计 120 个浮游植物吸收系数（APH）数据文件，每个数据来源网址可直接点击数据文件名。

表 3 真光层深度数据集节选

序号	ZEU_DATA_Source_List
1	A20030012003031.L3m_MO_KDLEE_Zeu_lee_9km.bz2
2	A20030322003059.L3m_MO_KDLEE_Zeu_lee_9km.bz2
3	A20030602003090.L3m_MO_KDLEE_Zeu_lee_9km.bz2
4	A20030912003120.L3m_MO_KDLEE_Zeu_lee_9km.bz2
5	A20031212003151.L3m_MO_KDLEE_Zeu_lee_9km.bz2
...	...
120	A20123362012366.L3m_MO_KDLEE_Zeu_lee_9km.bz2

注：总计 120 个真光层深度（ZEU）数据文件，每个数据来源网址可直接点击数据文件名。

表 4 490 nm 漫衰减系数数据集节选

序号	KD_DATA_Source_List
1	A20030012003031.L3m_MO_KDLEE_Kd_488_lee_9km.bz2
2	A20030322003059.L3m_MO_KDLEE_Kd_488_lee_9km.bz2
3	A20030602003090.L3m_MO_KDLEE_Kd_488_lee_9km.bz2
4	A20030912003120.L3m_MO_KDLEE_Kd_488_lee_9km.bz2
5	A20031212003151.L3m_MO_KDLEE_Kd_488_lee_9km.bz2
...	...
120	A20123362012366.L3m_MO_KDLEE_Kd_488_lee_9km.bz2

注：总计 120 个 490nm 漫衰减系数（KD）数据文件，每个数据来源网址可直接点击数据文件名。

表 5 光合有效辐射数据集节选

序号	PAR_DATA_Source_List
1	A20030012003031.L3m_MO_PAR_par_9km.bz2
2	A20030322003059.L3m_MO_PAR_par_9km.bz2
3	A20030602003090.L3m_MO_PAR_par_9km.bz2
4	A20030912003120.L3m_MO_PAR_par_9km.bz2
5	A20031212003151.L3m_MO_PAR_par_9km.bz2
...	...
120	A20123362012366.L3m_MO_PAR_par_9km.bz2

注：总计 120 个光合有效辐射（PAR）数据文件，每个数据来源网址可直接点击数据文件名。

4 数据结果与验证

4.1 数据结果组成

基于上述处理，形成全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集（2003–2012）（GlobalMarineABMP_NPP_YYYYMM.hdf）。起止日期是 2003 年 1 月–2012 年 12 月，空间分辨率是 9 km，时间分辨率是月。yyyy 代表数据时间（年），mm 代表数据时间（月）。数据格式为.hdf，总计数据文件包括 120 个，总数据量为 1,064 MB。数据文件组成列于表 6（AttachFile2），数据可视化图如图 1。

表 6 全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集（2003 年）数据文件组成表

数据文件名称	时间	数据量
GlobalMarineABMP_NPP_200301.hdf	2003.01	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200302.hdf	2003.02	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200303.hdf	2003.03	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200304.hdf	2003.04	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200305.hdf	2003.05	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200306.hdf	2003.06	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200307.hdf	2003.07	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200308.hdf	2003.08	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200309.hdf	2003.09	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200310.hdf	2003.10	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200311.hdf	2003.11	8.9 MB
GlobalMarineABMP_NPP_200312.hdf	2003.12	8.9 MB

注：2003–2012 年度历年月度数据集总计 120 个数据文件，全部列于附录数据文件 2（AttachFile2.xlsx）。

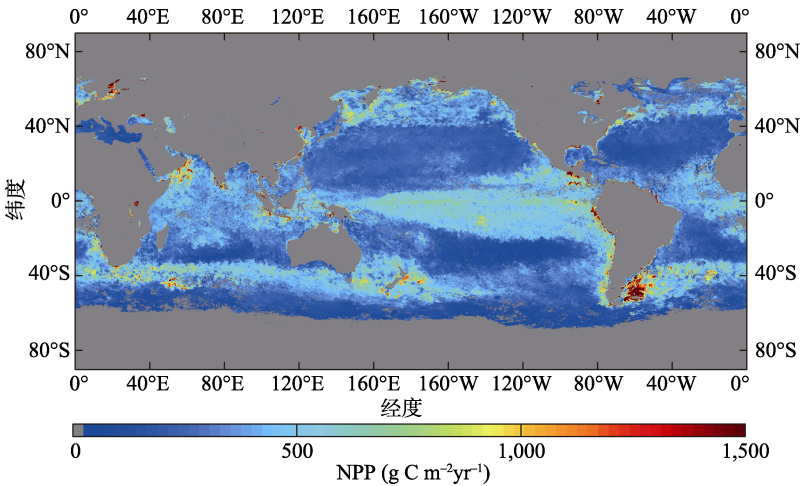


图 1 全球海洋初级生产力 2011 年 10 月分布图

4.2 数据结果验证

为了检验定量反演的精度，本文收集了全球海表三个固定站点和三条海上走航线的实测数据对数据集结果进行精度验证。三个固定站点名称分别为：

美国夏威夷海洋站点 (22.75°N, 158°W, Hawaii Ocean Time-series program-HOT)

HOT 数据取自网页 (<http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/>)。从该数据中, 选取了 2003 (11 d)、2004 (11 d)、2005 (9 d)、2006 (11 d)、2007 (9 d)、2008 (8 d)、2009 (10 d)、2010 (9 d), 总计 78d 的数据进行验证。

大西洋百慕大群岛站点 (31.668°N, 64.172°W, Bermuda Atlantic Time-series Study-BATS)

BAT 数据取自网站 (<http://bats.bios.edu/>)。从该数据中, 选取了 2003 (11 d)、2004 (12 d)、2005 (12 d)、2006 (11 d)、2007 (12 d)、2008 (11 d)、2009 (12 d)、2010 (10 d), 总计 91 d 的数据进行验证。

美国加利福尼亚站点 (32.428°N, 121.783°W, California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations—CALCOFI)

CALCOFI 数据取自网站 (<http://www.calcofi.org/>)。从该数据中, 选取了 2003 (4 d)、2004 (4 d)、2005 (4 d)、2006 (4 d)、2007 (4 d)、2008 (4 d)、2009 (4 d)、2010 (4 d)、2011 (4 d)、2012 (2 d), 总计 38 d 的数据进行验证。

详细的海洋实测验证数据时间 (年、月、日) 和地点 (经纬度) 列于附表 3 (Attach-File3.xlsx)。

三次海上走航实验数据分别为:

地中海海域走航 (Atmospheric Dynamics and Fluxes in the Mediterranean Sea-DYFAMED)。

DYFAMED 取自网页 (http://www.obs-vlfr.fr/cd_rom_dmtt/dyf_main.htm)。该走航试验数据由 30 个样点组成。

南极斯科舍海域走航 (Antarctic Marine Living Resources Program-AMLR)

AMLR 数据取自网站 (<http://www.bco-dmo.org>)。该走航试验数据由 171 个样点数据组成。

南极帕尔默站海域走航 (Western Antarctic Peninsula, Palmer Station Long-Term Ecological Research-WAP)

WAP 数据取自网页 (<http://pal.lternet.edu/data/>)。该走航试验数据由 370 个样点数据组成。

验证点 (包括站点和走航试验数据获取的时间和地点信息详细列于附件 3 (Attach-File3.xlsx))

Behrenfeld 等 1997 年建立的 VGPM (Vertically Generalized Production Model) 模型^[12]的基本思路是: 浮游植物初级生产力是现有叶绿素浓度代表的现存生物量与叶绿素归一化的光合作用增长率的乘积。Behrenfeld 等又于 2005 年建立了 CBPM (Cabon Based Production Model) 模型^[13], 其基本思想是: 浮游植物初级生产力是现有生物量与增长率的乘积。两种模型已经实现了基于 MODIS 数据的业务化运行, 并提供了数据的更新与发布 (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/>)。

为了验证 ABPM 模型的精度, 我们将 ABPPM 模型与上述两个模型进行了对比验证。利用 6 组海上实测采样数据集, 分别计算了 ABPM 模型、VGPM 模型和 CBPM 模型的平均对数偏差 (BIAS)、均方根差 (Root Mean Square Difference, RMSD)、无偏均方根差

（uRMSD）和相关系数（ R^2 ），精度验证结果见表 7 及图 2。从整体上看，ABPM 模型的精度比其他两个模型更高。

表 7 三种模型精度验证结果比对

站点	模型	Bias	uRMSD	RMSD	R^2
HOT (N=78)	ABPM	-0.06	-0.09	0.11	0.23
	VGPM	-0.31	-0.11	0.33	0.02
	CBPM	0.02	-0.12	0.12	0.01
BATS (N=91)	ABPM	-0.14	-0.19	0.24	0.16
	VGPM	-0.16	-0.24	0.28	0.13
	CBPM	-0.22	-0.31	0.38	0.13
CALCOFI (N=38)	ABPM	-0.02	-0.07	0.08	0.49
	VGPM	0.27	0.11	0.30	0.25
	CBPM	0.06	0.11	0.12	0.22
DYFAMED (N=30)	ABPM	0.04	-0.24	0.25	0.46
	VGPM	0.15	-0.25	0.26	0.40
	CBPM	-0.12	-0.27	0.27	0.36
AMLR (N=171)	ABPM	0.19	-0.17	0.24	0.72
	VGPM	-0.17	-0.18	0.25	0.67
	CBPM	0.17	-0.23	0.24	0.30
WAP (N=370)	ABPM	0.18	-0.23	0.29	0.37
	VGPM	-0.17	-0.22	0.28	0.38
	CBPM	0.15	-0.26	0.27	0.14

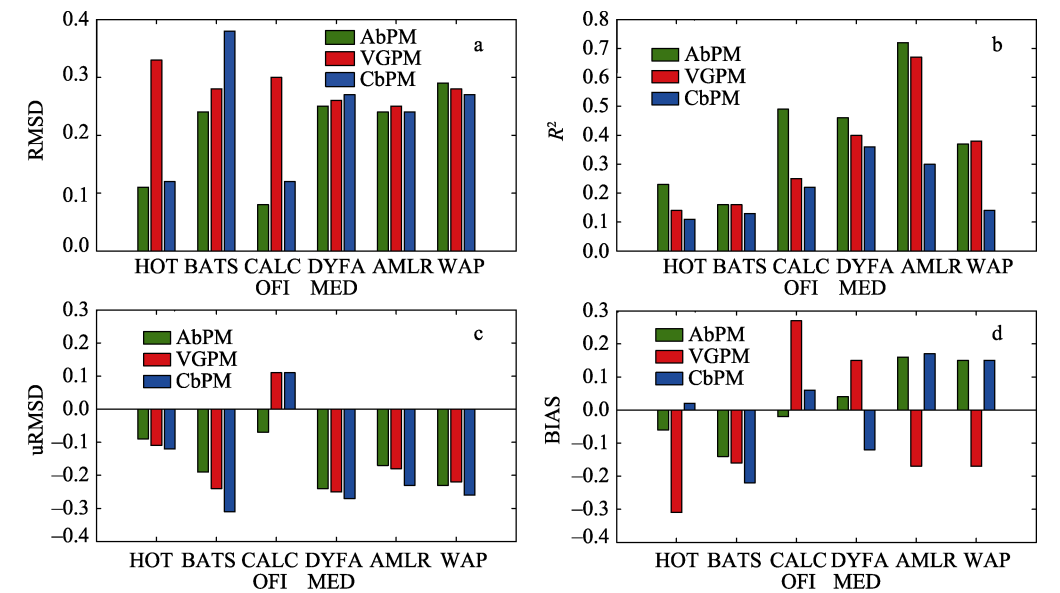


图 2 ABPM 模型、VGPM 模型和 CBPM 模型反演结果精度比对图

5 讨论和总结

基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集(2003–2012) 以美国地球观测卫星 TERRA/AQUA-MODIS 卫星数据产品及 2009 年 WOA 氮浓度剖面观测数据为基础, 通过 ABPM 模型计算得出。经过验证, 该数据集比运用 VGPM 和 CBPM 两个模型计算得到的结果总体精度高。

该数据集可以为研究全球海洋初级生产力时空分布和变化、全球生态系统健康状况、生物化学循环, 以及气候变化等提供重要参考。

作者分工: 陶醉负责数据集设计、方法研究、数据分析、数据论文撰写; 周翔负责方法研究、数据验证、数据论文撰写; 马胜负责数据采集、软件开发、数据论文撰写。

参考文献

- [1] Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, 281: 237–240.
- [2] Emerson, S. Annual net community production and the biological carbon flux in the ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(1): 14–28.
- [3] Reeburgh, W. S. Figures summarizing the global cycles of biogeochemically important elements [J]. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 1997, 78: 260–267.
- [4] Lee, Z. P., Carder, K. L., Arnone, R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755–5772.
- [5] Lee, Z. P., Weidemann, A., Kindle, J., *et al.* Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C3): 266–281.
- [6] Mueller, J. L. SeaWiFS Algorithm for the Diffuse Attenuation Coefficient, K(490), Using Water-Leaving Radiances at 490 and 555 nm [M]. Hooker, S. B. (ed). SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Goddard Space Flight Cent, Greenbelt, Maryland, 2000, 24–27.
- [7] Frouin, R., Chertock, B. A technique for global monitoring of net solar irradiance at the ocean surface . Part I: model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(9): 1056–1066.
- [8] 陶醉, 周翔, 马胜. 基于 ABPM 模型的全球海洋初级生产力遥感监测 9 km 分辨率月度数据集(2003–2012) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014. DOI: 10.3974/geodb.2014.02.03.V1.
- [9] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [10] Ma, S., Tao, Z., Yang, X., *et al.* Estimation of marine primary productivity from satellite-derived phytoplankton absorption data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7: 3084–3092.
- [11] Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., *et al.* World Ocean Atlas 2009, Volume 4: Nutrients (Phosphate, Nitrate, and Silicate) [M]. Levitus, S. (ed). NOAA Atlas NESDIS 71, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010, 398.
- [12] Behrenfeld, M. J., Falkowski, P. G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1479–1491.
- [13] Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A., *et al.* Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: GB1006. DOI: 10.1029/2004GB002299.