

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.007

热带印度洋海温与海表面高度相关关系分析

谢骏成^{1,2}, 张国胜³, 徐青², 张彪⁴

(1. 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

3. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 4. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 为了研究热带印度洋偶极子(IOD)与海平面异常之间的相关性,采用经验正交函数分析方法(EOF)及 Hilbert-Huang 变换等统计方法,分析热带印度洋的海表面温度(SST)与海平面高度异常(SLA)的相关关系。通过对热带印度洋偶极子指数(DMI)与南方涛动指数(SOI)和 SLA 的相关性分析,得出 IOD 与 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)之间可能存在一定相关关系,此外,IOD 与海平面变化有很好的相关性。通过对 IOD 爆发年的 DMI 以及海平面变化的分析,证实 IOD 具有季节锁相的重要特征,并探讨了该季节变化与海平面变化的相关关系。结果表明,IOD 事件与海平面的变化这两者之间存在很强的一致性。

关键词: 热带海洋环境;印度洋海域;IOD;SST;ENSO;海平面变化;Hilbert-Huang 变换

中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)01-0039-06

Correlation analysis of sea surface temperature and sea surface height in tropical Indian Ocean

XIE Juncheng^{1,2}, ZHANG Guosheng³, XU Qing², ZHANG Biao⁴

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. College of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to study the correlation between the tropical Indian Ocean dipole (IOD) and sea level anomalies, the correlation between the sea surface temperature (SST) and the sea level anomaly (SLA) in the tropical Indian Ocean was analyzed using the empirical orthogonal function (EOF) method and Hilbert-Huang transform method. Based on correlation analysis of the tropical Indian Ocean dipole mode index (DMI) and the Southern Oscillation Index (SOI) and SLA, it is concluded that there may be a certain correlation between the IOD and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). In addition, there is a strong correlation between the IOD and sea level changes. Analysis of the DMI and sea level changes in the IOD years proved the seasonal phase locking of the IOD, and the correlation between the season change and sea level change was examined. The results show that there is a strong correlation between the IOD events and sea level changes.

Key words: tropical ocean environment; Indian Ocean; IOD; SST; ENSO; sea level change; Hilbert-Huang transform

收稿日期: 2015-01-12

基金项目: 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室开放基金(LTO1206)

作者简介: 谢骏成(1990—),男,浙江桐庐人,博士研究生,主要从事卫星海洋学研究。E-mail:langlangxie@yeah.net

通信作者: 张国胜,博士后。E-mail:zgsheng001@gmail.com

在热带印度洋海域存在一个类似于 ENSO 的海表面温度(SST)异常现象,这种现象被称为印度洋偶极子(IOD)^[1-2]。IOD 对印度洋地区气候以及全球气候都有着不同程度的影响,该现象引发了人们对印度洋海、气相互作用以及 IOD 与全球气候变化之间相关关系的研究。

自 Saji 等^[3]提出了 IOD 概念后,许多学者从不同的角度对 IOD 现象进行分析。谭言科等^[4]指出实际观测的 IOD 现象中偶极子指数包含单极性与偶极性的混合信息。IOD 的一个重要特征就是季节锁相,即春季开始发展,秋季达到强盛阶段,冬季迅速减弱。IOD 在 9—10 月达到最大值,然后迅速消亡^[4-6,7]。

对于 IOD 形成的物理机制,目前国内外学者有不同的观点。例如,IOD 是对 ENSO 的响应^[3];IOD 是印度洋局地海气耦合作用的结果^[8];IOD 可能是一个相对独立的耦合系统,同时又通过 Walker 环流与 ENSO 联系在一起^[7]。利用多变量经验正交函数,Chen^[9]分析了 ENSO 与 IOD 之间的关系,发现在整个热带印度洋-太平洋地区,海表面温度异常(SSTA)和海表面高度异常(SSHA)均表现出一种三极子结构。本文将利用 1993—2012 年连续 20 a 的 SST 数据和海平面高度异常(SLA)数据,对 IOD 特征进行深入分析,探讨热带印度洋海域 SLA 与 SST 的相关关系和关联机理以及 IOD 期间的 SLA 月均特征。

1 数据与研究方法

1.1 数据来源

本文使用的 SST 来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的最优化插值数据,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率是 1 个月。SLA 数据来源于法国空间局(CNES)卫星海洋学存档数据中心(AVISO)的多卫星(Jason-1 & 2, T/P, Envisat, GFO, ERS-1 & 2 和 Geosat)融合高度计月均资料,空间分辨率为 $1/4^{\circ}$ 墨卡托网格形式。SST 与 SLA 都选取热带印度洋区域($20^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)。此外,南方涛动指数(SOI)来自东英吉利大学的气候研究中心。为了匹配高度计的卫星资料,上述数据同时选取 1993 年 1 月至 2012 年 12 月的月均数据,共 240 个月。

1.2 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换(HHT)是一种新型非线性非稳态信号处理方法^[10-11],可以给出复杂数据的最显著特征。这种变换主要由经验模态分解(EMD)和 Hilbert 谱分析 2 部分组成。先对数据进行 EMD 分解,得出本征模态函数(IMF),再进一步对 IMF 进行 Hilbert 谱分析。HHT 是一种局地的自适应频谱分析方法,在提取数据的固有特性方面比其他统计分析方法(如小波分析、Wigner-Vile 分布等)更准确^[12]。

2 海面高度(SSH)与 SST 异常的时空分布特征

2.1 SST 的时空分布

先对处理成距平矩阵的海温资料进行 5 个月的滑动平均,然后进行 EOF 分解,得到热带印度洋海温的空间与时间模态。对前 5 个模态进行检验,检验方法采用 North 等的特征值误差显著性检验方法。结果显示,前 5 个模态通过 North 方法的检验,方差贡献率分别是 36.90%、15.34%、7.65%、6.27%和 5.04%。

图 1 为热带印度洋 SSTA 第二模态的时空分布,空间模态呈现东西符号相反的特征,这与 Saji 等^[13]的描述一致,主要呈现热带西南印度洋和苏门答腊-爪哇海区的偶极子分布。从第二模态的时间序列上可以看出其年际振荡信号比较明显。时间序列经 HHT 后的波谱显示存在一个准 2 a 周期。

2.2 SSH 的时空分析

SSH 的处理方法与 SST 类似,其前 5 个模态方差贡献率分别是 23.17%、17.68%、17.12%、11.82%和 5.54%,并通过 North 的显著性方法检验。

如图 2 所示,印度洋 SLA 第一模态的空间分布呈现东西符号近似相反的分布特征,东极点 SLA 降低,西极点 SLA 升高。时间序列呈现不规则的年际振荡信号,变化比较均匀。经 HHT 波谱分析,SLA 变化周期约为 2 a,与第二模态的 SST 异常变化周期相似。

3 SSH 和 SST 的相关分析

通过对 SST 和 SLA 的时空分析,SST 的第二模态和 SLA 的第一模态有类似的偶极型空间分布。对 SST 和 SLA 的相似特征做进一步的相关分析。

对 SST 和 SLA 前 5 个模态的时间系数做相关分析。对照相关系数显著性检验表, 相关系数基本都通过了 95% 的显著性检验。如表 1 所示, SLA 第一模态和 SST 第二模态的时间系数相关性最大, 而且当 SLA 滞后 SST 2 个月时, 两者的相关系数达到 0.58。

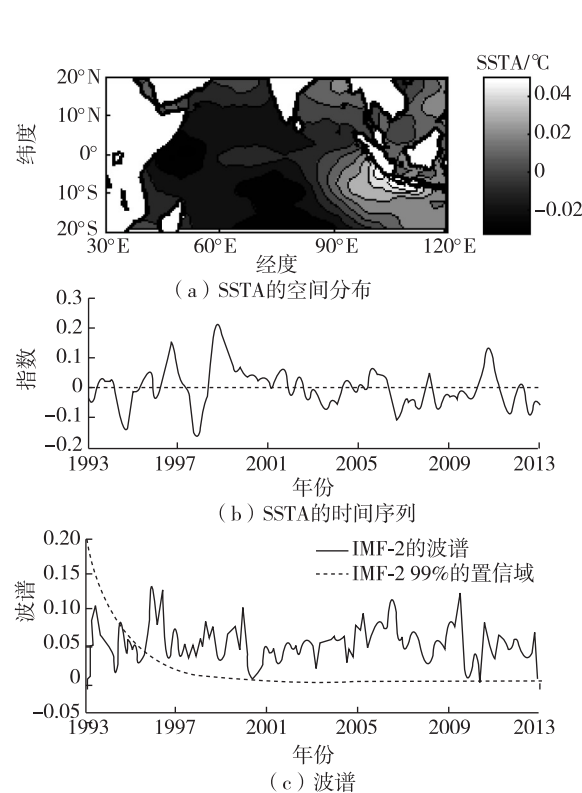


图 1 热带印度洋 SSTA 的 EOF 分解第二模态及其时间序列经 HHT 后 IMF-2 的波谱

Fig. 1 EOF-2 of SSTA of tropical Indian Ocean and spectrum of IMF-2 of its time series after HHT

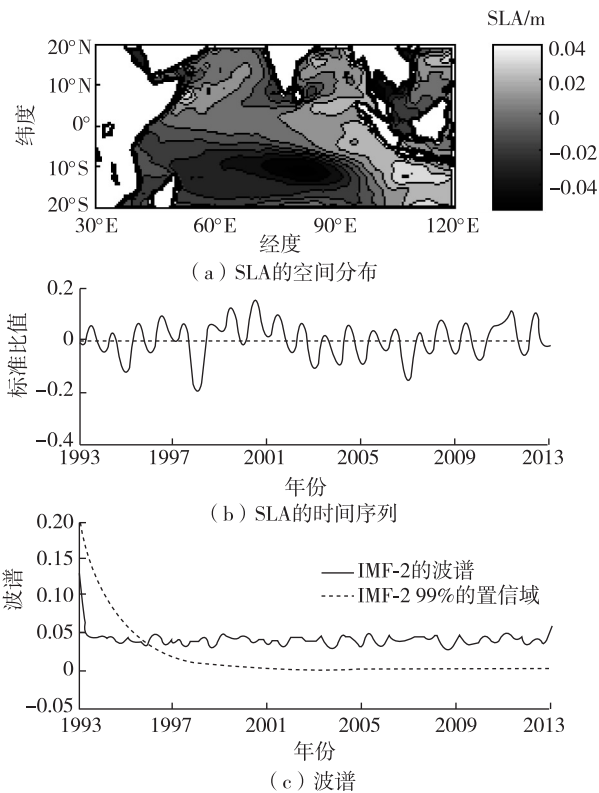


图 2 热带印度洋 SLA 的 EOF 分解第一模态及其时间序列经 HHT 后 IMF-2 的波谱

Fig. 2 EOF-1 of SLA of tropical Indian Ocean and spectrum of IMF-2 of its time series after HHT

模态	相关系数				
	SSTA 第一模态	SSTA 第二模态	SSTA 第三模态	SSTA 第四模态	SSTA 第五模态
SLA 第一模态	-0.28	0.50	-0.08	-0.12	-0.21
SLA 第二模态	-0.03	-0.19	0.37	-0.04	0.22
SLA 第三模态	-0.21	0.44	0.01	0.02	-0.06
SLA 第四模态	-0.43	0.16	0.24	-0.08	0.42
SLA 第五模态	-0.21	-0.43	-0.18	-0.47	-0.16

综上所述,SLA 和 SSTA 偶极型在空间上都为东西反相分布,时间序列之间的相关性较好,且具有 2 个月的滞后相关,这与王璐华等^[14]的研究成果一致。

4 IOD 年际变化与 SLA 变化、ENSO 事件的相关性

根据 Saji 等^[1]定义的偶极子指数,选取赤道西印度洋 (10°S~10°N,50°E~70°E) 和赤道东印度洋 (10°S~0°,90°E~110°E) 区域的海表温度距平资料,计算 DMI。图 3 分别给出了 1993—2012 年 DMI、SLA 指数和 SOI 的标准化数值。在数据处理过程中,已对这 3 组数据进行了 5 个月的滑动平均去除年信号。

本文定义 DMI 的绝对值大于或等于 0.2 的年份为 IOD 爆发年,其中 DMI 为正值则为 IOD 正值年,否则为 IOD 负值年。据此可在图 3 中发现,1994 年、1997 年、2006 年、2007 年、2012 年为 IOD 正值年,而 1996 年、

1998年、2005年、2010年是IOD负值年,这与Saji等^[1,13]以及肖莺等^[15]叙述的一致。IOD和ENSO存在一定的反相关,但在1997年,IOD与ENSO同时发生;而在1994年,IOD发生,但ENSO未发生。

1993—2012年的SLA指数与DMI之间的相关性较好。从图3可以看出两者之间的趋势大致相同。在IOD爆发年,DMI与SLA指数有极好的相关性,相关系数达到0.95,由此可以推断出SLA的变化可能对IOD有很好的响应和反馈。

对DMI进行HHT,得到8个本征模态函数(IMF)以及1个残值(Residual)。IMF-3的振幅及对应的Hilbert波谱如图4所示,IOD存在1个2.8a的年际振荡周期,为准2a振荡(QBO)。从相关分析结果可知,IMF-3与SOI的相关关系最好。1997年,IMF-3的振幅明显增大,这与前面提到的ENSO与IOD同时发生的年份大致吻合,表明IOD可能存在着固有的受ENSO影响的QBO,这与张国胜等^[16]得出的结果一致。

受篇幅限制,其余的IMF函数与振幅图在本文未给出,其中IMF-1主要为0.8a的振荡信号,在1997年有一次大的振荡,1997年为IOD爆发年;IMF-2主要为1.2a的振荡信号。IMF-4表现为长周期的振荡(3~8a),2005年之后振荡信号明显加强,在7a的振荡中只有强ENSO事件才能影响到IOD的发展;IMF-5、IMF-6为1~12a的振荡周期,振幅比较均匀;最后的残值显示了DMI的变化趋势,表明IOD的年际变化是在增强的,呈上升趋势,并且残值与SOI的相关性良好,表明ENSO事件在影响IOD的发展。

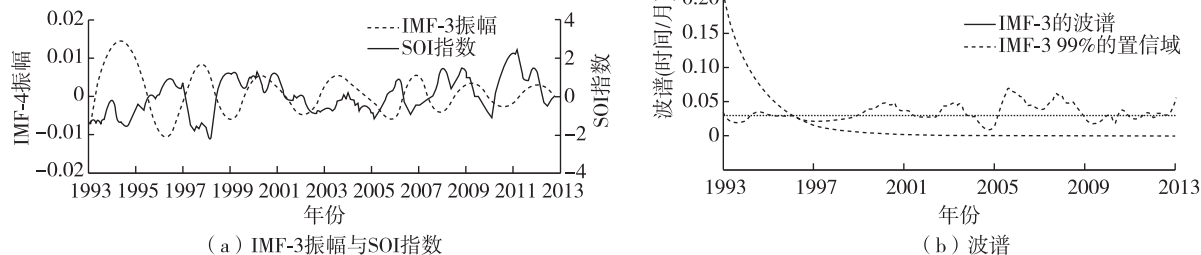


图4 对DMI进行EMD分解后的IMF-3与SOI指数及DMI经HHT后的IMF-3波谱

Fig. 4 IMF-3 and SOI of DMI after EMD and spectrum of IMF-3 of DMI after HHT

5 IOD季节锁相及其与SLA的相关关系

在IOD正值年DMI与SLA指数相关性良好,相关系数是0.79,在DMI达到最大值的前一个月,SLA达到最大;而在IOD负值年,两者的相关系数为0.71,SLA在11月达到负的最大值,出现在DMI最大值的后2个月。在讨论SLA与SST异常的相关关系时,得出的结论与上述相符,由此可进一步说明SLA与IOD事件有很强的相关关系。

图5为IOD正值年5月、7月、9月、11月的SLA分布,从图5中可以看出,5月份,亚丁湾附近和孟加拉湾海域的SSH开始升高,而苏门答腊-爪哇西南海区的SSH开始降低,此时IOD开始生成;到了8月份,SSH升高的海域继续扩大,而苏门答腊-爪哇东北海区的SSH负异常持续发展,此时热带印度洋大部分SSH升高,SLA达到最大值;在9月,IOD发展到了成熟期,SLA出现了明显的偶极型,但是亚丁湾海域SSH开始降低,这对应IOD达到成熟期后迅速开始衰减;11月,SSH异常降低的海区扩大,此时IOD衰亡,但在南热带印度洋还是存在SSH异常偶极型分布。IOD生成—发育—成熟—衰亡的整个过程,与热带印度洋的SSH变化有着很好的相关关系。IOD正值年与IOD负值年的月均SSH异常分布情况相似,但是反相。在IOD负值年,相对来说没有正值年时的相应相关性好。

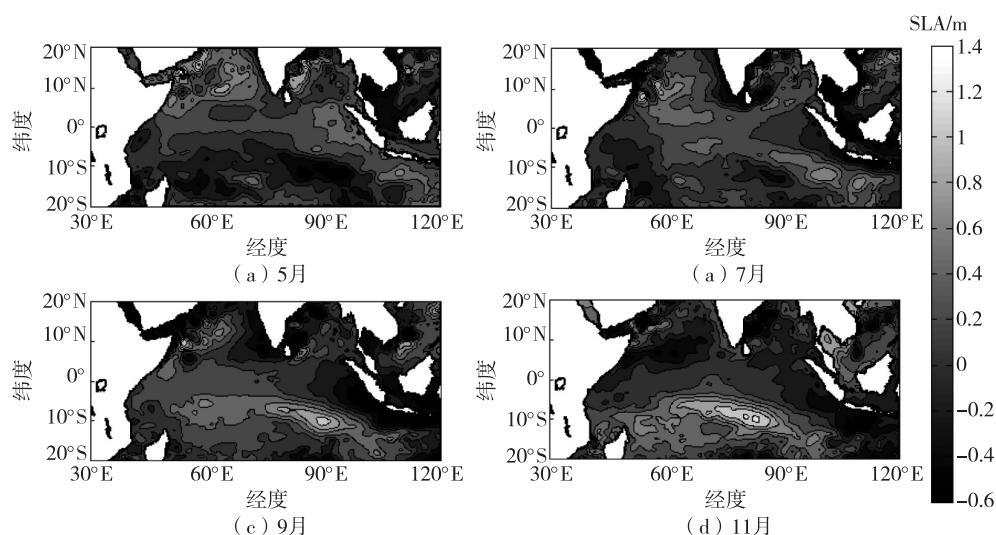


图5 IOD正值年印度洋月均SLA

Fig. 5 Monthly average SLA of Indian Ocean in positive IOD years

6 结 语

基于对1993—2012年连续20a的热带印度洋月均海面温度和海面高度数据的分析,发现在热带印度洋存在海面高度的偶极振荡,它可能是一个相对独立的耦合系统,同时又与ENSO事件有一定的联系,而且DMI与SLA存在类似的结构特征,但是SLA实际上代表的是次表层热含量的偶极子信息,而DMI反映的是海温的单极型与偶极型信息。

在IOD事件期间,SSH的变化过程与SST的变化过程有一定的关联,在IOD正值年,SSH异常的变化比IOD提前1个月;IOD负值年,SSH异常相对IOD滞后2个月。将SOI、DMI以及SLA联系起来,通过IOD、ENSO事件期间印度洋SLA的变化入手,分析了IOD的季节锁相特征。此外,还发现SSH与SST从苏门答腊右侧开始发展,这是否与西太暖池的发展有关,还需要进一步讨论。

参考文献:

- [1] SAJI N H, GOSWAMI B N, VINAYACHANDRAN P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. Nature, 1999, 401: 360-363.
- [2] YAMAGATA T, BEHERA S, RAP S A. Comments on “dipoles, temperature gradient and tropical climate anomalies” [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, 84: 1418-1422.
- [3] SAJI N H, YAMAGATA T. Possible impacts of Indian Ocean dipole mode events on global [J]. Climate Research, 2003, 25: 151-169.
- [4] 谭言科, 刘会荣, 李崇银, 等. 热带印度洋偶极子的季节性位相锁定可能原因 [J]. 大气科学, 2008, 32(2): 197-205. (TAN Yanke, LIU Huirong, LI Chongyin, et al. Possible causes for seasonal phase locking of the tropical Indian Ocean Dipole [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 197-205. (in Chinese))
- [5] LATIF M, DOMMENGET D, DIMA M. The role of Indian Ocean sea surface temperature in forcing east African rainfall anomalies during December-January 1997/1998 [J]. Climate, 1999, 12(12): 3497-3504.
- [6] LI Chongyin, MU Mingquan. The Dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(4): 433-443.
- [7] XIE Shangping, ANNANMALAI H, SCHOTT F A, et al. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability [J]. Climate, 2002, 15: 864-878.
- [8] 晏红明, 李崇银. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响 [J]. 大气科学, 2007, 31(1): 64-76. (YAN Hongming, LI Chongyin. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian Ocean and its influence on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(1): 64-76. (in Chinese))
- [9] CHEN Dake. Indo-Pacific tripole: an intrinsic mode of tropical climate variability [J]. Adv Geosci, 2001, 24: 1-18.

- [10] HUANG Ronghui, ZHANG Renhe, ZHANG Qingyun. The 1997/98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17:348-362.
- [11] NORDEN E H, ZHENG Shen, STEVEN R L, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454:903-995.
- [12] PAN Jiayi, YAN Xiaohai, ZHENG Quanan, et al. Interpretation of scatterometer ocean surface wind vector EOFs over the Northwestern Pacific[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84:53-68.
- [13] SAJI N H, YAMAGATA T. Structure of SST and surface wind variability during Indian ocean dipole mode years: COADS observations[J]. Climate, 2013, 16:2735-2751.
- [14] 王璐华, 张韧, 黎鑫, 等. 热带印度洋海面温度与高度的相关性分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(6): 698-703. (WANG Luhua, ZHANG Ren, LI Xin, et al. Analysis of related characteristics of sea surface temperature and sea surface height in tropical Indian Ocean[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(6): 698-703. (in Chinese))
- [15] 肖莺, 张祖强, 何金海. 印度洋偶极子研究进展综述[J]. 热带气象学报, 2009, 25(5): 621-627. (XIAO Ying, ZHANG Zuqiang, HE Jinhai. Progresses in the studies on Indian Ocean dipoles[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, 25(5): 621-627. (in Chinese))
- [16] 张国胜, 徐青, 程永存, 等. 热带印度洋偶极子区域海表面温度特征与海流相关性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 450-455. (ZHANG Guosheng, XU Qing, CHENG Yongcun, et al. Correlation analysis of SST and ocean current in tropical Indian Ocean dipole region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(4): 450-455. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学再增一支江苏省“双创团队”

2015年江苏省“双创计划”资助对象名单正式公布,由我校“千人计划”特聘教授李凌领衔的“高强度人类活动下滨海地下水系统水文生态过程”研究团队成功入选“双创团队”项目。

团队领军人才李凌教授于2010年入选国家“千人计划”创新人才项目。他长期从事陆地、海洋交界带生态环境系统特征及过程等方面的研究工作,其领衔的团队将以服务江苏乃至国家滨海资源保护与开发为导向,着重开展高强度人类活动下滨海地下水系统的演变规律及水文生态反馈机制的研究,旨在深入完善滨海地下水系统的理论体系,加快提升我国在滨海水生态环境研究领域的国际影响力,为有效缓解沿海和滨海地区面临的系列环境问题做贡献。

“双创团队”项目是由江苏省人才工作领导小组会同科技、人社、教育等主管部门启动实施的重点团队引进项目,旨在通过实现人才经费和项目资金、产业资金的合作,集中引进和支持一批高层次人才团队来苏创新创业。经过申报初审、资格审查、技术评审、综合评审和现场答辩等环节,此次共有10支教育类团队入选“双创团队”项目。

至此,河海大学已连续3年成功获批江苏省“双创团队”,另2支团队分别由“千人计划”特聘教授余钟波、邵建富领衔组建。

(本刊编辑部供稿)