

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.017

# 一种改进的几何学波浪破碎指标

冯卫兵,曹海锦,张 俞

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:** 基于 Kjeldsen 等提出的波形不对称性波浪破碎几何学指标,研究了波浪浅水变形作用下波形的不对称性,并通过实验采集的波面数据,运用最小二乘法拟合参数,综合 2 种不同的波浪变形情况,提出了含权重系数  $\omega$  的不规则波浪的波形不对称性指标,并给出了浅水条件下权重系数  $\omega$  的取值函数。在高分辨率波面数据采集技术的前提下,提出一种新型的、能够在近岸浅水条件下作为波浪破碎判据的波形不对称性波浪破碎指标,提高了其在实际工程中的应用价值。

**关键词:** 波浪浅水变形;波形不对称性;波浪破碎指标;权重系数

中图分类号:P731.22 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2012)06-0692-06

## Extended geometric wave breaking indices

FENG Weibing, CAO Haijin, ZHANG Yu

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The depth-induced asymmetry of a wave profile in shallow water was studied based on the wave breaking indices proposed by Kjeldsen et al. With the experimental data, extended geometric wave breaking indices formulas for irregular waves were proposed, which depend on a weight coefficient  $\omega$ , with consideration of two types of wave transformation. The parameters of the indices were obtained by means of the least square error method. A function for determination of the value of  $\omega$  is given for application in shallow water. With the data collecting techniques of the wave profile with high resolution, the wave breaking indices, which consider the asymmetry of wave profile, are applicable to judgment of wave breaking in near-shore shallow water, and have high application value in practical engineering.

**Key words:** wave transformation in shallow water; asymmetry of wave profile; wave breaking index; weight coefficient

波浪破碎几何学指标有极限波陡指标、极限波峰顶角指标、相对水深指标(水深与波长之比值)和波形不对称性指标 4 种类型<sup>[1]</sup>。1849 年,Stokes 首先提出极限波陡值  $(H/L)_{lim}$  的概念,认为大于极限波陡值的波浪是不存在的。1893 年,Mitchell 准确地计算出 Stokes 提出的极限波陡值<sup>[2]</sup>,得到了深水时极限波陡值  $(H/L)_{lim}=0.141$ ,或  $(H/gT^2)_{lim}=0.027$ ,该结论已为许多实测数据结果所证实。关于相对波高(波高与水深之比值)这一波浪破碎几何学指标,最有代表性的属合田良实的成果<sup>[3]</sup>,他认为该指标与海底坡度  $i$  和浅水度  $d/L_0$  相关,该成果目前在国际上得到广泛的认可。近代关于波浪破碎几何学指标的研究中,Li 等<sup>[4]</sup>提出,极限波陡、极限相对波高与运动学准则  $(u/C=1)$  具有相同的物理意义,与所用的波浪理论无关,所以从物理意义的明确性及应用的方便性而言,采用  $H/d$  值作为判别波浪破碎指标是适宜的。Deo 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于神经网络算法的波浪破碎的预报统计方法。Akoz 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于神经网络算法的完全波浪破碎的几何学性质的预报方法。Liu 等<sup>[7]</sup>提出了一种新的规则波浪破碎的预测公式:

$$\psi'_b = (1.21 - 3.30\lambda_b)(1.48 - 0.54\gamma_b)\psi_b \tag{1}$$

其中

$$\psi_b = \frac{gH_b}{C_b^2}$$

在场模型及可渗透海床条件下,得到了较好的效果。而在不规则波波浪破碎的研究中,Ting<sup>[8]</sup>的实验研究得到了较好的结果,他指出,波浪的有效波高、波周期及水底坡度,对不规则波的波浪破碎影响较为明显。

本文研究的波形不对称性指标是由Kjeldsen等<sup>[9]</sup>根据实验数据及长期的现场观测资料提出,指标公式为

$$(\eta_c/H)/(T/T') = 3.5 \tag{2}$$

式中: $\eta_c$ ——波峰幅值; $H$ ——波高; $T$ ——波周期; $T'$ ——压缩变形段半波峰周期。波形不对称性指标要求能得到波面形态数据。目前实验条件的改进以及量测设备数据采集频率的提高,为该几何学指标的研究提供了有利条件。为此,本文开展了相关实验研究,通过实验室中采集到的波面形态数据,探讨应用波形不对称性指标判别波浪破碎的可能性,并提出相应的含权重系数 $\omega$ 的不规则波浪的波形不对称性指标。通过DJ800 数据采集系统,在实验室中采集波面形态数据,提出波形不对称性对波浪破碎的影响,并给出波形不对称性波浪破碎几何学指标在近岸浅水条件下的应用方法。

### 1 实验过程简介

图 1 为波浪浅水变形情况下的不对称性波形。实验在河海大学水利部河口海岸工程重点实验室航道实验大厅 80 m 长的不规则波浪水槽中进行。水槽宽 1 m,高 1.6 m,有效实验段宽 0.5 m。水槽一端安装了推板式不规则生波机,通过电机系统控制推板运动行程和频率;另一端设有斜坡消能装置,波高由电容式浪高仪测定,所有量测信号均通过计算机采集、记录和分析。实验模型距生波机约 50 m。不规则波采用 JONSWAP 谱模拟,取谱峰升高因子 $\gamma=3.3$ ,实验谱与期望谱之间有效波高误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,谱峰周期 $T_p$ 两者基本一致。实验段测试模型如图 2 所示。

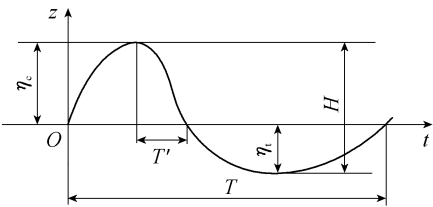


图 1 不对称性波形  
Fig. 1 Asymmetric wave profile

实验过程中采用前后 2 根电容式波高仪,波高仪量程为 30 cm,浪高仪数据采集点的水深分别设置为 27 cm, 25 cm, 23 cm, 21 cm, 19 cm, 17 cm, 15 cm, 13 cm, 并调整不同水深下的规则波要素,以满足波浪破碎条件。采用调整地形坡度 1 : 50, 1 : 20, 1 : 9, 1 : 7, 1 : 3 来进行不同坡度对拟合公式的验证。DJ800 波面数据采集系统的采样间隔为 0.01 s(即每秒采集 100 个波面位置数据),波高数值精确到 0.01 cm,由此来重现波浪传播的波面过程。

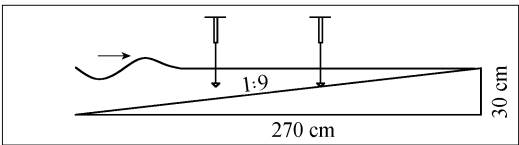


图 2 实验模型  
Fig. 2 Experimental model

### 2 实验数据处理及不对称性参数拟合分析

通过上述实验得到的波形图,选取其中较为完整平滑的波形,测量计算得到 $T, H$ ,并计算波长 $L_0$ :

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{3}$$

式中 $g$ 为重力系数。通过采集的实验数据,整理得到不对称性参数 $T/T', \eta_c/H$ 。

Kjeldsen 等<sup>[9]</sup>对深海海域现场观测的大波破碎进行了统计分析,提出的基于波形不对称性参数的波浪破碎条件为

$$\left(\frac{\eta_c}{H}\right)\left(\frac{T}{T'}\right)_b > 3.5 \tag{4}$$

其中

$$H = \eta_c + \eta_t$$

式中: $\eta_t$ ——静水面至波谷的距离; $b$ ——波浪出现破碎。

按照式(4),并通过文献[1]中给定的函数形式,对不规则波破碎不对称性参数运用最小二乘法来拟合数据的外包络线,以描述波浪的临界破碎情况,并与文献[1]中拟合曲线比较,结果见图 3。

得到数据外包络拟合曲线公式为

$$\left(\frac{\eta_c}{H}\right)\left(\frac{T}{T'}\right) = 0.654 \left[ \tanh\left(10 \frac{d}{L_0}\right) \right]^{-1} + 3.075 \quad R = 0.914, S = 0.089 \tag{5}$$

式中: $R$ ——相关系数; $S$ ——残差。

式(5)拟合结果与文献[1]中缓坡条件下由底部摩擦阻力引起的波形不对称性变化的实验结果拟合得到的不对称性指标比较,两者与 Kjeldsen 等<sup>[9]</sup>提出的指标值均有偏差,文献[1]得到的拟合值趋近于3,本文则趋向于4。究其原因主要是这2种波形不对称的波浪破碎形态不同,导致不对称性指标值也不同。笔者主要考虑海底坡度较大、波浪的浅水变形持续过程较短的情况。对于不规则波的情况,波高大小和频率各不相同,坡度及底部摩擦阻力对波浪破碎的影响程度也会有所变化。

由图3拟合关系曲线的趋势及表达式(5)的计算结果还可看出:

- a. 在相对水深  $d/L_0 \leq 0.2$  时,波浪破碎指标值随水深变浅而增大,这与薛鸿超<sup>[10]</sup>经过实验计算分析得到  $d/L_0 \leq 0.14$  时波浪传播波长发生浅水缩减的理论相符。
- b. 在  $d/L_0 > 0.2$  时,波浪破碎指标值趋于固定值,该值与  $\omega$  有关,其形式为

$$\left(\frac{\eta_c}{H}\right)\left(\frac{T}{T'}\right) > 3(1 - \omega) + 4\omega \tag{6}$$

可见,当  $\omega$  为 0.5 时,波浪破碎指标值与 Kjeldsen 等<sup>[9]</sup>提出的结果相同。

在外海深水区域,即  $d/L_0 > 0.5$  时, $\omega$  的取值主要取决于当地海域内的风场、流场等对海洋表面波浪的影响,而海底坡度及底部摩擦阻力则影响较小。近岸浅水区域,即相对水深介于 0.2~0.5 之间时, $\omega$  的取值主要受海底部坡度及底部摩擦阻力的影响。

3 浅水区域条件下  $\omega$  的取值方法

参考合田良实的波浪破碎指标公式<sup>[3]</sup>,本文给出了一种在近岸条件下,根据各参数间相互关系的  $\omega$  取值方法。由于:(a)合田良实公式中未考虑波浪传播过程中的摩擦损耗;(b)在不对称性参数中,已经考虑了浅水情况下的  $H$  和  $d$ ,在  $\omega$  值选取时,已保证了相对波高满足波浪破碎条件,所以  $\omega$  取值公式中没有参数  $H$  和  $d$ :

$$\omega = 1 - \exp[-A\pi(K_f + 15i^{\frac{4}{3}})] \tag{7}$$

式中  $A$  为常数,通过极限值和边界条件求得  $A$  为 0.22。 $K_f$  为底部摩擦阻力系数,取值公式<sup>[11]</sup>为

$$K_f = \left[ \frac{64\pi^3}{3g^2} \left( \frac{fH_0\Delta s K_s^2}{T^4 \sinh^3 \frac{2\pi d}{L}} \right) + 1 \right]^{-1} \tag{8}$$

式中: $f$ ——底部摩擦系数; $H_0$ ——初始波高; $s$ ——传播距离; $K_s$ ——浅水系数。 $\omega$  值随  $K_f$  和  $i$  变化情况见图4。

- a.  $K_f$  为 0.6, 0.8, 1.0 时, $\omega$  值与  $i$  的曲线关系见图5。由图5可见: $i < 0.5$  时, $\omega$  随  $i$  的变化趋势较为明显, $K_f$  值影响  $i=0$  时  $\omega$  的起始值, $\omega$  最大起始值为 0.5;当  $i > 0.5$  时, $\omega$  值接近于 1,  $K_f$  值对  $\omega$  取值影响较小。
- b.  $i$  为 0.01, 0.05, 0.10 时, $\omega$  值与  $K_f$  的关系见图6。由图6可见, $\omega$  与  $K_f$  的关系成近似的线性变化,当  $i$  增大时, $\omega$  随  $K_f$  的变化趋势变小。

由图(5)和图(6)可见, $i$  对  $\omega$  值的影响明显大于  $K_f$ 。

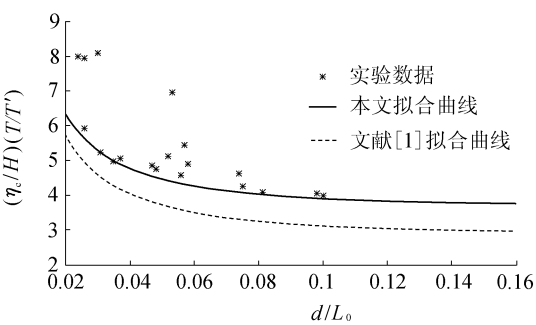


图3 坡度*i*=1:9 不对称性参数拟合曲线与文献[1]中拟合曲线比较

Fig. 3 Comparison of fitting curve with that in reference [1] in terms of asymmetry of wave profile (gradient  $i = 1 : 9$ )

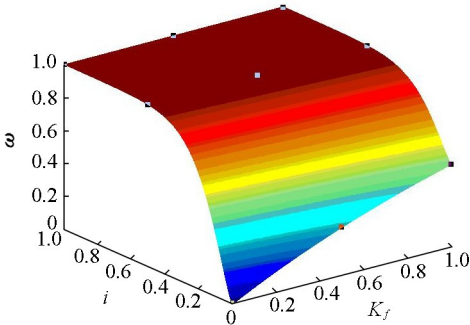


图4  $\omega$  的取值面

Fig. 4 Value of  $\omega$  determined by  $K_f$  and  $i$

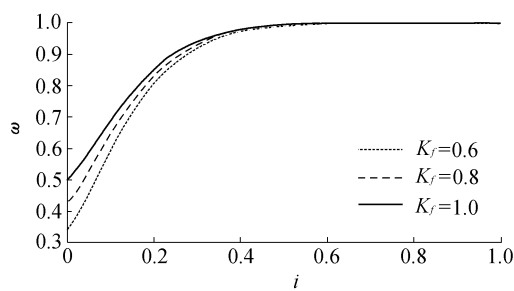


图 5  $K_f$  为 0.6,0.8,1.0 时, $\omega$  与  $i$  的关系

Fig. 5 Relationship between  $i$  and  $\omega$  when  $K_f = 0.6, 0.8, 1.0$

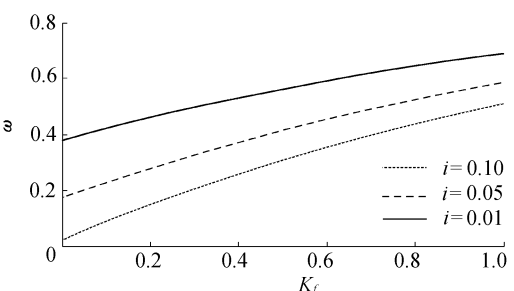


图 6  $i$  为 0.01,0.05,0.10 时, $\omega$  与  $K_f$  的关系

Fig. 6 Relationship between  $K_f$  and  $\omega$  when  $i = 0.01, 0.05, 0.10$

联立式(6)与式(7),得到  $0.2 < d/L_0 < 0.5$  条件下,含权重系数  $\omega$  不规则波浪的波形不对称性指标的优化形式:

$$\begin{cases} \left( \frac{\eta_c}{H} \right) \left( \frac{T}{T'} \right) > 3(1 - \omega) + 4\omega \\ \omega = 1 - \exp[ - 0.22\pi(K_f + 15i^{\frac{4}{3}}) ] \end{cases} \quad (9)$$

4 实验验证与对比

考虑在实验室条件下, $f$  无法完全准确确定,故在相同底部摩擦条件下,进行不同海底坡度的实验验证。 $i$  分别取为 1:3,1:7,1:20,1:50,图 7 为 4 个不同海底坡度条件下对实验数据外包络线的拟合情况。由拟合结果得到不同海底坡度条件下拟合的近似波浪破碎指标值。

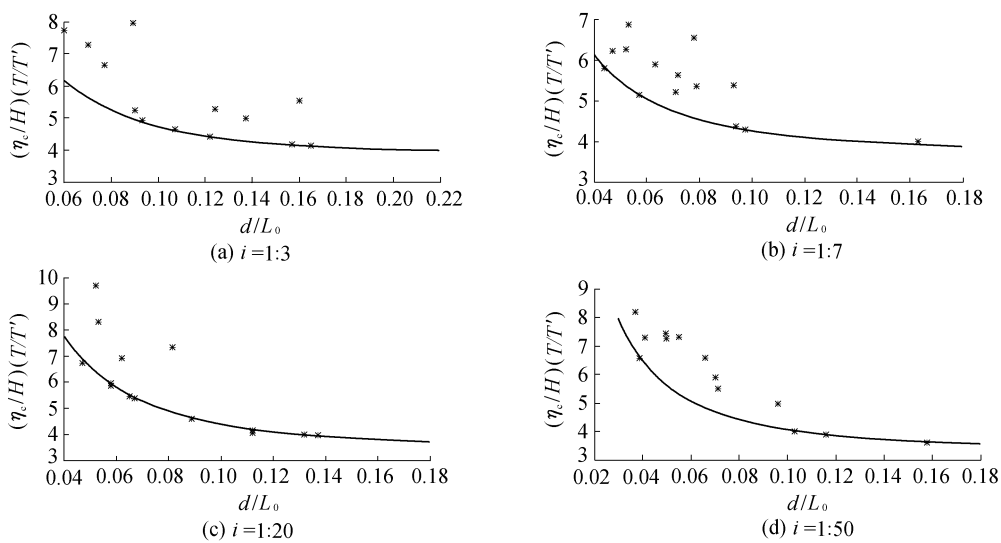


图 7 不同  $i$  值波浪破碎指标值

Fig. 7 Wave breaking indices with different values of  $i$

在实验过程中,采用水泥平板作为坡底,故  $K_f$  值应接近于 1,取为 0.95。通过式(9) 计算得到  $\omega$  值,图 8 为  $\omega$  实验值与式(9)曲线比较。

实验验证结果表明,在海底坡度相对较小时,实验值与式(9) 计算值较接近,而在海底坡度较大的情况下,实验值偏小。因而在海底坡度较大情况下,波浪破碎过程在相对较短时间内完成,瞬时产生较大波浪力,根据 Zelt<sup>[12]</sup> 的研究和 Hemming 等<sup>[13]</sup> 的水滚模型,波浪在破碎过程中的延续时间对波浪破碎的动力模型有很大的影

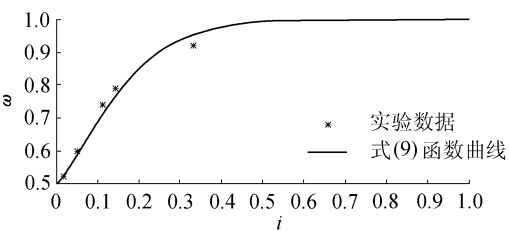


图 8  $K_f=0.95$  时,实验值与式(9) 曲线比较

Fig. 8 Comparison of experimental data and formula (9) when  $K_f = 0.95$

响,所以在破碎较为迅速的情况下需特别考虑波浪在破碎过程中的延续时间。

合田良实波浪破碎指标公式:

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} = \frac{B \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \frac{\pi d_b}{L_0} (1 + 15 i^{\frac{4}{3}}) \right] \right\}}{\frac{d_b}{L_0}}$$

(10)

式中  $B$  为常数,取 0.17。对于不规则波,李玉成等<sup>[14]</sup>指出,对于破碎大波, $B$  值为 0.15。表 1 为各坡度下临界破碎波高比较。

由于笔者考虑了波形不对称性对波浪破碎的影响,得到的临界破碎波高与合田良实指标相比较小,与李玉成等<sup>[14]</sup>指出的不规则波波浪破碎的改进值接近,且更接近于波浪破碎的实测结果(临界破碎)。

表 1 不同坡度下各指标临界破碎波高计算值比较

Table 1 Critical values of predicted breaking wave heights at different slopes by different formulas

| 坡度     | 临界破碎波高/cm |          |      |      |
|--------|-----------|----------|------|------|
|        | 合田良实指标    | 改进合田良实指标 | 本文指标 | 实测结果 |
| 1 : 3  | 39.8      | 35.1     | 34.1 | 34.4 |
| 1 : 7  | 20.3      | 17.9     | 15.8 | 16.5 |
| 1 : 9  | 13.8      | 12.2     | 11.6 | 11.5 |
| 1 : 20 | 11.9      | 10.5     | 10.4 | 10.5 |
| 1 : 50 | 10.0      | 9.2      | 8.8  | 8.9  |

5 结 论

a. 本文对陡坡地形引起的波形不对称性波浪破碎指标进行了实验研究,并对实验结果进行了拟合分析,实验结果及拟合曲线趋势与文献[1]中给出的波形不对称性结构的波浪破碎指标有所差异,其原因主要是不同地形条件下波浪破碎形态的不同。

b. 提出了考虑不规则波浪的波形不对称性的含权重系数  $\omega$  的波形不对称性破碎指标,并在浅水条件下进行了实验验证,在与合田良实的指标公式比较后,指出波浪在传播过程中波形不对称性对波浪破碎有一定影响。

c. 给出了  $0.2 < d/L_0 < 0.5$  条件下  $\omega$  的取值方法,指出  $\omega$  在近岸的适用范围。在陡变地形条件下,因波浪破碎过程持续较短,对波浪破碎过程中的波面形态数据的量测很有影响,需进一步研究。

参考文献:

[ 1 ] 于洋,李玉成,杨建民. 基于波形不对称性的波浪破碎指标[J]. 海洋工程,2006,24(2):89-94. (YU Yang, LI Yucheng, YANG Jianmin. Wave breaking indices based on asymmetry of wave profiles[J]. The Ocean Engineering,2006,24(2):89-94. (in Chinese))

[ 2 ] MARSHALL P T,JIYUE J L. On the breaking of energetic waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1992,2(1):46-53.

[ 3 ] GODA Y. A synthes is of breaker indices[J]. Trans of Japan Soc Civil Engrs,1970,2:227-230.

[ 4 ] LI Yucheng,DONG Guohai. Wave breaking phenomena of irregular waves combined with opposing current[J]. China Ocean Engineering,1993,7(2):197-206.

[ 5 ] DEO M C,JAGDALE S S. Prediction of breaking waves with neural networks[J]. Ocean Engineering,2003,30:1163-1178.

[ 6 ] AKOZ M S,COBANER M,KIRKGOZ M S,et al. Prediction of geometrical properties of perfect breaking waves on composite breakwaters[J]. Applied Ocean Research,2011,33:178-185.

[ 7 ] LIU Yu,NIU Xiaojing,YU Xiping. A new predictive formula for inception of regular wave breaking[J]. Coastal Engineering, 2011,58:877-889.

[ 8 ] FRANCIS C,TING K. Laboratory study of wave and turbulence characteristics in narrow-band irregular breaking waves[J]. Coastal Engineering,2002,46:291-313.

[ 9 ] KJELDTSEN S P,MYRHAUG D. Wave-wave interactions,current-wave interactions and resulting extreme waves and breaking

waves[C]//Proceedings of 17th Coastal Engineering Conference. Sydney, Australia:[ s. n. ],1980:2277-2303.

[10] 薛鸿超. 浅水波长计算问题[J]. 海洋工程,2006,24(2):95-99. (XUE Hongchao. Calculation problem of wave length in shallow water[J]. The Ocean Engineering,2006,24(2):95-99. (in Chinese))

[11] 徐宏明. 港口工程中有关波浪问题的实用计算系统[J]. 海洋工程,1992,1(1):59-68. (XU Hongming. A practical calculation system for wave problem in harbor engineering[J]. The Ocean Engineering,1992,1(1):59-68. (in Chinese))

[12] ZELT J A. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves[J]. Coastal Engineering,1991,15:205-246.

[13] HEMMING A S, PER A M,ROLF D. A Boussinesq model for waves breaking in shallow water[J]. Coastal Engineering,1993,20:185-202

[14] 李玉成,滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京:海洋出版社,2002.

+++++

欢迎订阅 2013 年《水资源保护》

中国科技核心期刊    RCCSE 核心期刊  
ISSN 1004-6933 CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利研究会主办的科技期刊。杂志针对我国水资源短缺、用水效率不高、水污染严重等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、防治技术、宏观管理及水环境治理问题,关注重点是水环境、水资源和大江大湖的环境生态问题和可持续发展。主要栏目有科学研究、应用技术、综述评、管理研究等。

《水资源保护》是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库统计源期刊,已被美国化学文摘(CA)、波兰哥白尼索引(IC)数据库、“中国期刊网”、“中国数字化期刊群”、“水信息网”、“北极星网”、“中华期刊网”、“中文科技期刊数据库”“中文科技期刊数据库”等收录和引用,长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,2012 年被评为中国高校特色期刊。

《水资源保护》主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生,邮发代号:28-298,双月刊,96 页,12 元/期,全年共计 72 元,每逢单月出版。欲订购者,请向当地邮局订购。若无法从邮局订阅,亦可登陆本刊网站下载征订单。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 河海大学《水资源保护》编辑部  
邮政编码:210098 电话/传真:(025)83786642 E-mail:bh@ hhu. edu. cn  
[http://kkb. hhu. edu. cn/web/indexbh. asp? d\\_id=37](http://kkb. hhu. edu. cn/web/indexbh. asp? d_id=37)