

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.02.010

基于灰色理论预测电沉积处理后的混凝土抗碳化性能

储洪强^{1,2} 蒋林华² 张 研²

(1.河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098 ; 2.河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要 : 选用 ZnSO_4 、 MgSO_4 2 种溶液,对带裂缝的砂浆试件进行了修复,测定了 7d、14d、21d、28d、35d 龄期试件裂缝处的碳化深度,并就采用 MgSO_4 溶液进行电沉积处理后混凝土裂缝处的碳化深度进行了灰色预测。结果表明,带裂缝的砂浆试件经电沉积处理后,其抗碳化能力均有所提高,而且采用 MgSO_4 溶液处理后,抗碳化能力的提高程度要高于 ZnSO_4 溶液。 $\text{GM}(1,1)$ 模型预测精度比较高,可以用于电沉积处理后混凝土抗碳化性能的灰色预测。

关键词 : 灰色预测 ; 电沉积 ; 裂缝修复 ; 碳化

中图分类号 : TQ153.2 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2010)02-0170-06

电沉积方法是修复混凝土裂缝的一项新技术,特别适用于传统修复技术难以奏效或修复价格太高的混凝土结构。日本、美国对电沉积方法修复混凝土裂缝进行了探索性试验研究^[1-3],而国内对该项技术的研究才刚刚起步^[4-8]。研究表明,带裂缝的混凝土结构经电沉积处理后,其抗碳化能力均有所提高^[9]。但对经电沉积处理后混凝土抗碳化性能的预测,国内外均未作过研究,没有认知经验,所能提供的数据较少。而利用模型实现对系统未知数据的预测,可以缩短试验周期,减少试验损耗,在实际中具有良好的应用价值。灰色理论是针对既无经验、数据又少的不确定性问题^[10-11],而且灰色理论 $\text{GM}(1,1)$ 模型建模所需样本量少,计算方法简单,对系统已知数据的模拟和未知数据的预测精度均较高,所以本文采用灰色理论预测混凝土结构经电沉积处理后裂缝处的碳化深度。

1 灰色预测原理与步骤

1.1 预测原理

灰色预测是现有状态向未来延伸的预测,不仅是指系统中含有灰元、灰数时的预测,而且是从灰色系统的建模、关联度及残差辨识的思想出发获得关于预测的概念、观点和方法,简言之,就是关于灰色动态模型(grey dynamic model, GM)的预测。一般预测模型是因素模型,而 $\text{GM}(1,N)$ 模型表示对一个变量 N 阶微分方程建立的模型。 $\text{GM}(1,N)$ 是多维灰色模型的符号,其中包括 1 个行为变量 x_1 及 $N-1$ 个因子变量 x_i ($i=2,3,\dots,N$)。 $\text{GM}(1,N)$ 为分析模型、因子模型,不具有全信息,一般不适合预测。由于客观世界是一个整体,各因素之间总存在着某种直接或间接的联系,若按因素的变化来预测系统的行为,则由于因素中又含有因素,最后分析者将坠入因素的海洋而不能自拔,所以灰色理论主张用单因素模型 $\text{GM}(1,1)$ 进行预测,而把基于 $\text{GM}(1,1)$ 模型的预测称为灰色预测。 $\text{GM}(1,1)$ 的含义为一阶(order) 1 个变量(variable)的灰色模型(grey model),是基本预测模型,具有全信息。本文对电沉积处理后混凝土裂缝处的碳化深度进行灰色预测,只有时间 1 个因素,所以可以采用 $\text{GM}(1,1)$ 模型。

设 $x^{(0)}$ 为原序列, $x^{(1)} = \text{AGO}x^{(0)}$, $X^{(1)}$ 是 $x^{(1)}$ 的等间隔子序列集。在 $X^{(1)}$ 上,模仿白微分方程

$$\frac{dx}{dt} + ax = b \tag{1}$$

并满足下述条件的方程,称为灰微分方程:

收稿日期 : 2009-02-14

基金项目 : 河海大学自然科学基金(2008427811) ; 教育部博士学科点专项科研基金(20020294012) ; 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放研究基金

作者简介 : 储洪强(1978—) 男,江苏宜兴人,讲师,博士研究生,主要从事新材料及结构耐久性研究。E-mail : chq782009@126.com

a. 结构条件. 具有 $X^{(1)}$ 上信息浓度最大的灰导数. 因为没有导数就不能称为微分方程, 所以这是由结构决定的条件.

b. 材料条件. 即灰导数 $x_k^{(0)}$ 的白化背景值与灰导数成分满足平射. 该条件涉及用什么样的数据构造灰微分方程, 属构造方程的材料条件.

c. 品质条件. 灰导数白化背景值位于单调增的背景集中. 与灰导数成分满足平射的数据非唯一, 可是只有背景集中的数据才能保证灰微分方程的质量.

上述 3 个条件又称为建模的三条件, 满足这些条件, 则 $X^{(1)}$ 上(亦即 $x^{(1)}$ 上)的灰微分方程见式(2), 称式(2)为灰模型 GM(1, 1) 的定义型, 记为 GM(1, 1, D).

$$\begin{aligned} x_k^{(0)} + az_k^{(1)} &= b \\ z_k^{(1)} &= 0.5x_k^{(1)} + 0.5x_{k-1}^{(1)} \\ x_k^{(1)} &= \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m) \end{aligned} \tag{2}$$

式中: a ——发展系数, 其大小及符号反映 $x^{(0)}$ 及 $x^{(1)}$ 的发展态势; b ——灰作用量, 其内涵为系统的作用量, 然而 b 不是可以直接观测的, 是通过计算得到的具有灰的信息覆盖的等效作用量. $z_k^{(1)}$ 的序列 $z^{(1)} = (z_2^{(1)}, z_3^{(1)}, \dots, z_n^{(1)})$, $z_k^{(1)} = 0.5(x_k^{(1)} + x_{k-1}^{(1)})$ 称为白化背景值序列. 基于每个白化背景值 $z_k^{(1)}$ 都是 $x_k^{(1)}$ 与 $x_{k-1}^{(1)}$ 的平均值, 故记 $z^{(1)}$ 为 $\text{MEAN}x^{(1)}$, 即 $z^{(1)} = \text{MEAN}x^{(1)}$.

对于原始序列 $x^{(0)}$ ($x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$) 及其 AGO 序列 $x^{(1)}$ ($x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$) GM(1, 1) 白化模式的响应式为

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(0)} - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a} \\ \hat{x}_{k+1}^{(0)} = \hat{x}_{k+1}^{(1)} - \hat{x}_k^{(1)} \end{cases} \tag{3}$$

1.2 预测步骤

设原始序列 $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$.

a. 对原始数列 $x^{(0)}$ 作 1-AGO:

$$x_k^{(1)} = x_1^{(0)} + x_2^{(0)} + \dots + x_k^{(0)} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

最后有
$$X^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}) \tag{4}$$

b. 构造数据矩阵 B 及数据向量 y_N :

$$z_k^{(1)} = 0.5(x_k^{(1)} + x_{k-1}^{(1)}) \quad (k = 2, \dots, n)$$

则
$$B = \begin{bmatrix} -0.5(x_1^{(1)} + x_2^{(1)}) & 1 \\ -0.5(x_2^{(1)} + x_3^{(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5(x_{n-1}^{(1)} + x_n^{(1)}) & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$y_N = (x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^T \tag{6}$$

- c. 计算 $(B^T B)^{-1}$.
- d. 计算 $B^T y_N$.
- e. 计算参数列 $\hat{a}$.

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T y_N \tag{7}$$

f. 列出微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \tag{8}$$

g. 求时间响应函数:

$$\hat{x}_k^{(1)} = \left(x^{(1)}(0) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a} \tag{9}$$

令 $x_0^{(1)} = x_1^{(0)}$, 代入得

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(0)} - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a} \tag{10}$$

则白化响应式为

$$\hat{x}_{k+1}^{(0)} = \hat{x}_{k+1}^{(1)} - \hat{x}_k^{(1)} \tag{11}$$

2 试验方法与结果

2.1 试验方法

试验采用水泥砂浆试件,尺寸 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,水泥为 32.5 级普通硅酸盐水泥,水灰质量比为 0.60,胶砂质量比为 1:2.5.在试件中预先插入钢片以预制出 70.7 mm×35 mm×0.5 mm 的裂缝,标准条件下养护 28 d 后取出试验.为保证沉积物只在裂缝所在面沉积,其他面上均涂上硅橡胶,3 个试件 1 组,用于本次试验的试件共有 72 个.试件表面及裂缝情况见图 1.

电沉积处理装置见图 2.带有裂缝的水泥砂浆试件放入电解槽中,试件表面用导电胶与钢片(50 mm×35 mm×0.3 mm)相粘,引出导线与电源的负极相连作为阴极,同时将片状钛网板放入电解槽底部,并与电源的正极相连作为阳极,然后注入电沉积溶液.

电沉积处理时采用 ZnSO₄ 和 MgSO₄ 溶液,浓度为 0.05 mol/L,电流密度为 0.25 A/m².除裂缝所在面,其他面上均涂上硅橡胶,裂缝所在面朝下,辅助电极为片状钛网板,每 5 d 更换 1 次溶液.对比试件浸泡在相同浓度的溶液中,除未进行电沉积处理,其余条件均与电沉积处理的试件保持一致.30 d 后取出所有的试件.电沉积处理后部分试件表面及裂缝处情况见图 3.



图 1 试件表面及裂缝情况
Fig. 1 surface and cracks of mortar specimens

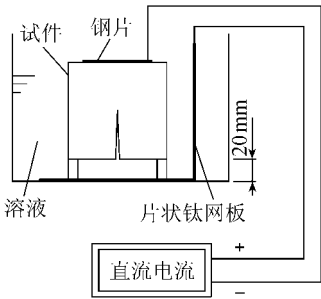


图 2 试验装置示意图
Fig. 2 Experimental devices

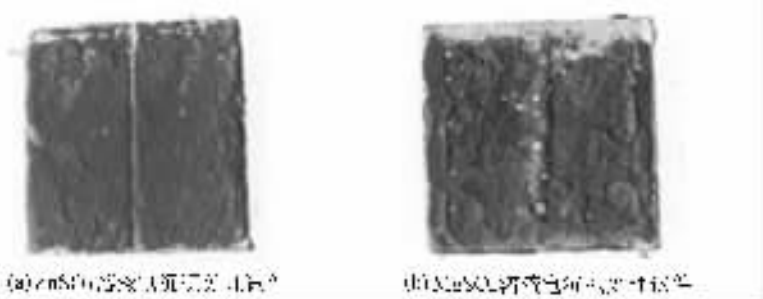


图 3 试件表面及裂缝的沉积情况
Fig. 3 Electrodeposition on surface and cracks of mortar specimens after 30 days

碳化试验按照 GBJ 82—85《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》^[12]的要求进行,电沉积处理试件和对比试件 30 d 后取出,进行碳化试验,测定龄期为 7 d,14 d,21 d,28 d,35 d.到达龄期后取出试件垂直于裂缝破型,刷去断裂面上的粉末,随即喷上 1% 酚酞乙醇指示液以测定其碳化深度.带裂缝的砂浆试件碳化情况见图 4.

2.2 试验结果

电沉积处理试件和对比试件裂缝处的碳化深度 Y 随碳化时间的变化见图 5.电沉积处理后砂浆试件裂缝处的碳化深度与对比试件相比,其降低情况见图 6.

由图 5 可以看出,采用 ZnSO₄ 和 MgSO₄ 溶液,电沉积处理后的砂浆试件裂缝处的碳化深度对比试件要小,原因可能是^[8](a)砂浆试件裂缝里的沉积物在一定程度上阻止了 CO₂ 向其内部扩散,(b)沉积物填充了试件内部的部分孔隙,总孔体积、各孔径范围内的孔体积,特别是孔径 20 nm 以上的孔体积减小,孔分布发生了一定的变化,砂浆更加

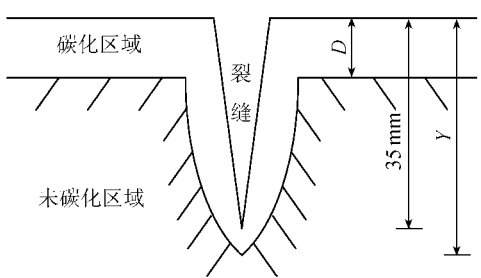


图 4 带裂缝的混凝土结构碳化示意图
Fig. 4 Carbonation of mortar specimens with cracks

密实,从而使得 CO₂ 渗入试件内部的阻力加大.

■ ZnSO₄ 溶液电沉积处理试件 ○ MgSO₄ 溶液电沉积处理试件
▲ ZnSO₄ 溶液电沉积未处理试件 * MgSO₄ 溶液电沉积未处理试件

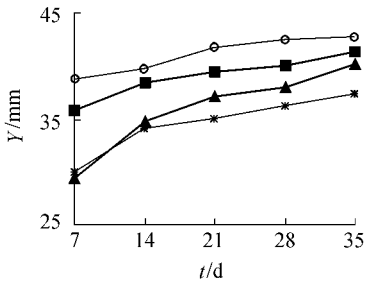


图 5 裂缝处的碳化深度随时间的变化
Fig. 5 Carbonation depth Y of cracks in mortar specimens with time

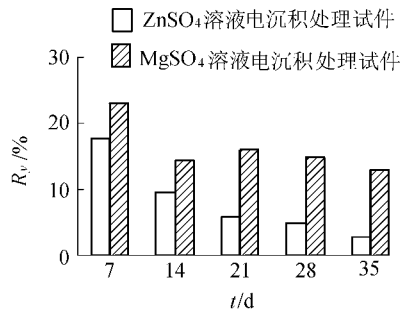


图 6 裂缝处碳化深度的降低程度
Fig. 6 Decrease of carbonation depth Y of cracks

3 电沉积处理后混凝土裂缝处碳化深度的灰色预测

由图 6 可知,带裂缝的砂浆试件采用 MgSO₄ 溶液电沉积修复后,其抗碳化性能提高效果比 ZnSO₄ 溶液好,所以本文对采用 MgSO₄ 溶液进行电沉积处理后的混凝土裂缝处碳化深度进行预测.以碳化时间 7 d,14 d,21 d,28 d 电沉积处理后混凝土裂缝处碳化深度组成数列 $X^{(0)}$,建立 GM(1,1)模型,进而对 35 d 的碳化深度进行预测.

原始数列: $X^{(0)} = (29.94, 34.10, 35.20, 36.30)$.

a. 对原始数列 $x^{(0)}$ 作 1-AGO:

$$x_1^{(1)} = 29.94 \quad x_2^{(1)} = 64.04 \quad x_3^{(1)} = 99.24 \quad x_4^{(1)} = 135.54$$

可得 $X^{(1)} = (29.94, 64.04, 99.24, 135.54)$

b. 构造数据矩阵 B 及数据向量 y_N :

$$z_2^{(1)} = 0.5(x_1^{(1)} + x_2^{(1)}) = 44.99$$

$$z_3^{(1)} = 0.5(x_2^{(1)} + x_3^{(1)}) = 81.64$$

$$z_3^{(1)} = 0.5(x_2^{(1)} + x_3^{(1)}) = 117.39$$

则

$$B = \begin{bmatrix} -46.99 & 1 \\ -81.64 & 1 \\ -117.39 & 1 \end{bmatrix}$$

$$y_N = (34.10, 35.20, 36.30)^T$$

c. 计算 $(B^T B)^{-1}$:

$$(B^T B)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.000403505 & 0.033090131 \\ 0.033090131 & 3.046944731 \end{bmatrix}$$

d. 计算 $B^T y_N$:

$$B^T y_N = \begin{bmatrix} -8737.344 \\ 105.6 \end{bmatrix}$$

e. 计算参数列 $\hat{a}$:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} -0.031244157 \\ 32.63751478 \end{bmatrix}$$

f. 列出微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} - 0.031244157x^{(1)} = 32.63751478 \quad (12)$$

g. 求时间响应函数:

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(0)} - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} = (29.94 + 1044.595787) e^{0.031244157k} - 1044.595787 = 1074.535787 e^{0.031244157k} - 1044.595787$$

则白化响应式为

$$\hat{x}_1^{(0)} = 29.94 \quad \hat{x}_2^{(0)} = 34.10294956 \quad \hat{x}_3^{(0)} = 35.18528781 \quad \hat{x}_4^{(0)} = 36.30197610$$

h. 残差检验公式为

$$e_k^0 = \frac{\hat{x}_k^{(0)} - x_k^{(0)}}{x_k^{(0)}}$$

可得 $e_1^{(0)} = 0$, $e_2^{(0)} = 0.0086497\%$, $e_3^{(0)} = -0.0417959\%$, $e_4^{(0)} = 0.0054438\%$, $e^{(0)} = 0.01397235\%$, $p^0 = 99.9860\%$, p^0 为式(11)的精度.

i. 预测. 令 $k = 4$ 代入式(11):

$$\hat{x}_5^{(0)} = \hat{x}_5^{(1)} - \hat{x}_4^{(1)} = 37.45410619$$

4 预测结果与分析

灰微分方程的模型非常接近真正的微分方程模型. 由于式(11)精度 p^0 高达 99.9860% ,表明用序列建立近似微分方程的初衷已经达到. 因为式(11)是真正的微分方程式(12)的解. 通过灰微分方程式(2)得到的参数 a 与 b ,代入式(12)可以获得的精度高达 99.9860% ,表明灰微分方程

$$x_k^{(0)} - 0.031244157z_k^{(1)} = 32.63751478$$

非常接近式(12)模型预测值 $\hat{x}_5^{(0)} = 37.45410619$ 非常接近 $x_5^{(0)}$ 实际值 37.45.

综上所述 GM(1,1)模型预测精度比较高,可以用于电沉积处理后混凝土抗碳化性能的灰色预测.

5 结 语

选用 $ZnSO_4$ 和 $MgSO_4$ 2 种溶液,对带裂缝的砂浆试件进行了修复,测定了 7 d,14 d,21 d,28 d,35 d 龄期试件裂缝处的碳化深度,并就采用 $MgSO_4$ 溶液进行电沉积处理后混凝土裂缝处的碳化深度进行了灰色预测. 采用 $ZnSO_4$ 和 $MgSO_4$ 溶液对带裂缝的砂浆试件进行电沉积处理后,其抗碳化能力均有所提高. GM(1,1)模型预测值 $\hat{x}_5^{(0)} = 37.45410619$ 非常接近实际值 37.45,预测精度比较高,表明 GM(1,1)模型可以用于电沉积处理后混凝土抗碳化性能的灰色预测.

参考文献:

[1] OTSUKI N ,RYU J S. Use of electrodeposition for repair of concrete with shrinkage cracks[J]. Materials in Civil Engineering ,2001 ,13 (2) :136-142.

[2] RYU J S ,OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique[J]. Cement and Concrete Research ,2002 ,32 (1) :159-164.

[3] RYU J S ,OTSUKI N. Experimental study on repair of concrete structural members by electrochemical method[J]. Scripta Materialia , 2005 ,52 :1123-1127.

[4] 储洪强 ,蒋林华. 利用电沉积方法修复混凝土裂缝试验研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 ,33 (3) :310-313.(CHU Hong-qiang ,JIANG Lin-hua. Experimental study on electrodeposition method for repair of concrete cracks[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2005 ,33 (3) :310-313.(in Chinese))

[5] 蒋林华 ,储洪强. 混凝土参数对沉积效果的影响[J]. 水利水电科技进展 ,2005 ,25 (2) :23-25.(JIANG Lin-hua ,CHU Hong-qiang. Influence of concrete parameters on electrodeposition effect[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2005 ,25 (2) :23-25.(in Chinese))

[6] 储洪强 ,蒋林华. 辅助电极及电极距离对沉积效果的影响[J]. 建筑材料学报 ,2005 ,8 (4) :456-461.(CHU Hong-qiang ,JIANG Lin-hua. Influence of accessorial electrode and electrode distance on electrodeposition effect[J]. Journal of Building Materials ,2005 ,8 (4) :456-461.(in Chinese))

[7] 储洪强 ,蒋林华 ,杨彪. 电沉积效果评价中图像处理方法的探讨[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 ,33 (5) :567-570.(CHU Hong-qiang ,JIANG Lin-hua ,YANG Biao. Application of image processing method to evaluation of electrodeposition effect[J].

Journal of Hohai University (Natural Sciences 2005 33(5) 567-570.(in Chinese))

[8] 储洪强 蒋林华. 电沉积处理对砂浆比表面积及微孔结构的影响[J]. 建筑材料学报 2006 9(5) 627-632.(CHU Hong-qiang , JIANG Lin-hua. Effect of electrodeposition on BET surface area and microstructure of cement mortar[J]. Journal of Building Materials , 2006 9(5) 627-632.(in Chinese))

[9] 储洪强. 电沉积方法修复混凝土裂缝技术研究[D]. 南京 河海大学 2005.

[10] 易德生 郭萍. 灰色理论与方法[M]. 北京 : 石油工业出版社 ,1992 :1-5.

[11] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉 : 华中科技大学出版社 2002 :2-6.

[12] GBJ82—85 ,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].

Forecast of carbonation of concrete after electrodeposition treatment based on grey theory

CHU Hong-qiang^{1 2} , JIANG Lin-hua² , ZHANG Yan²

(1. Key Laboratory of Coastal Disasters and Defence of Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The mortar specimens with cracks were repaired by adopting two kinds of solution , ZnSO₄ and MgSO₄ . The carbonation depths of the cracks in the mortar specimens were measured after the age of 7 d , 14 d , 21 d , 28 d and 35 d , respectively . The grey forecast of carbonation depth of the cracks in concrete after electrodeposition treatment by use of MgSO₄ was performed . The results indicate that the capability of the mortar specimens with cracks against carbonation after electrodeposition treatment is improved . The capability against carbonation by using MgSO₄ is higher than that by using ZnSO₄ . The GM(1 , 1) model is of high forecast precision and can be applied to the grey forecast of carbonation of concrete after electrodeposition treatment .

Key words : grey forecast ; electrodeposition ; crack repair ; carbonation

· 简讯 ·

河海大学赵永乐教授荣获“中国人才学研究突出贡献奖”

由国家人力资源和社会保障部批准、中国人才研究会主办的“中国人才学研究突出贡献奖表彰大会暨创业型人才开发高层论坛”近日在北京举行，河海大学博士生导师赵永乐教授被授予“中国人才学研究突出贡献奖”。

赵永乐教授是我国最早从事人才学研究的著名学者之一，主要从事人才市场学、人才规划学、区域人才发展、人才体制论、人才素质测评以及组织规划和人力资源管理等领域的研究，在人力资源管理的教学、科研和实践方面做出了突出贡献，在人才学研究领域积累了丰硕的成果；出版专著 45 部，发表文章 210 余篇，主持或参与国家和省部级研究课题 51 项，获省部级以上一等奖 6 项、二等奖 7 项，兼任中央人才工作协调小组国家人才中长期发展规划纲要编制工作专家顾问组成员、国家人力资源和社会保障部 CETIC 面试官认证专家委员会副主任、中国人才研究会常务理事、中国人力资源开发研究会常务理事、江苏省人大常委会立法咨询专家、江苏省人才学会副会长等职。

全国共有 13 名专家获“中国人才学研究突出贡献奖”，其中理论工作者 11 名，实践工作者 2 名，48 名专家获贡献奖。

(本刊编辑部供稿)