

# 安塞低渗透油藏回注水中悬浮颗粒堵塞规律

罗莉涛<sup>1,2,3</sup>, 萧汉敏<sup>3</sup>, 刘卫东<sup>3</sup>, 孙灵辉<sup>3</sup>, 李继业<sup>4</sup>, 苟斐斐<sup>1</sup>

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065007
2. 中国科学院大学, 北京 100190
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007
4. 中国石油大庆油田分公司试油试采公司, 大庆 163412

**摘要** 回注水中的悬浮颗粒能严重堵塞储层, 造成渗透率下降, 导致安塞油田注水难、采油难。为了提高注水效果, 急需确定安塞油田合理的回注水悬浮颗粒指标。以5种不同的粒径的悬浮颗粒在3种不同浓度条件下, 分别对安塞天然岩心进行室内流动实验。结果表明: 岩心渗透率开始随着悬浮颗粒溶液的注入缓慢下降, 达到一定注入量后, 能够较长时间处于某一平稳值; 悬浮颗粒溶液浓度 $\rho > 2.0$  mg/L, 渗透率损失大于30%;  $\rho \leq 1.0$  mg/L且粒径 $d < 0.730$   $\mu\text{m}$ , 渗透率损失小于30%;  $1.0$  mg/L  $< \rho < 2.0$  mg/L, 且 $d < 0.730$   $\mu\text{m}$ , 渗透率损失有大于30%, 也有小于30%, 由浓度与粒径二者共同作用;  $0.730$   $\mu\text{m} \leq d \leq 2.100$   $\mu\text{m}$ , 渗透率损失大于30%。各油田回注水时, 颗粒粒径范围区间应尽量小, 其平均值应与储层的平均孔喉相差较大; 安塞低渗透油藏注入悬浮颗粒溶液 $\rho < 1.0$  mg/L,  $d < 0.730$   $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 回注污水; 低渗透; 悬浮颗粒; 粒径

**中图分类号** TE341

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.15.010

## The Suspended Particles in Reinjection Sewage of Ansai Low Permeability Reservoir

LUO Litao<sup>1,2,3</sup>, XIAO Hanmin<sup>3</sup>, LIU Weidong<sup>3</sup>, SUN Linghui<sup>3</sup>, LI Jiye<sup>4</sup>, GOU Feifei<sup>1</sup>

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China
4. Oil Testing and Perforating Company, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163412, China

**Abstract** The suspended particles in a reinjection sewage might plug the reservoir and reduce the permeability. This makes it difficult for the Ansai low permeable oil field to inject water and produce oil at present. In order to improve the effect of water flooding, a reasonable index of suspended particles for Ansai oil field has to be determined. For this purpose, five different particle sizes are considered with three different suspended particle concentrations in the Ansai natural core flow experiment. The results show that the permeability of the cores is reduced slowly with the increase of the injection of the suspended particles. When the injection reaches a certain amount, the permeability tends to be a stable value for a long time. When the concentration  $\rho > 2$  mg/L, the permeability is reduced more than 30%; when  $\rho \leq 1.0$  mg/L and the particle size  $d < 0.730$   $\mu\text{m}$ , the permeability is reduced less than 30%; when  $1.0$  mg/L  $< \rho < 2.0$  mg/L and  $d < 0.730$   $\mu\text{m}$ , the two factors act together, the permeability may be reduced more or less than 30%; when  $0.730$   $\mu\text{m} \leq d \leq 2.100$   $\mu\text{m}$ , the permeability is reduced more than 30%. It is therefore suggested that the range of the suspended particle size should be limited and stay away from the throat size of the reservoir in the water injection process.  $\rho < 1.0$  mg/L and  $d < 0.730$   $\mu\text{m}$  for the Ansai low permeable oil field.

**Keywords** reinjection sewage; low permeability; suspended particles; size

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-04-17

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05031)

作者简介: 罗莉涛, 博士研究生, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: mhlpphl6184@126.com

引用格式: 罗莉涛, 萧汉敏, 刘卫东, 等. 安塞低渗透油藏回注水中悬浮颗粒堵塞规律[J]. 科技导报, 2014, 32(15): 69-72.

目前,国内近87%的油田采用注水开发方式驱油<sup>[1,2]</sup>。国内大多陆上油田进入中后开发期,采出液含水率不断上升,有的区块已达90%以上<sup>[3]</sup>。随着油田开发时间的增长,采出水量不断增多,污水已成为油田注水的主要水源。污水回注既可以补充地层能量、保持油田稳产、提高采收率;又可以避免污水外排对人类和生态系统造成的危害,因而油田污水回注被广泛采用<sup>[4-7]</sup>。但污水若处理不好,对于油藏储层存在着严重的负面影响,例如:油层吸水能力变差、地层渗透率下降等<sup>[8]</sup>。污水中悬浮颗粒堵塞储层是造成储层伤害的主要原因<sup>[9]</sup>。

安塞油田主力含油层为长6层,其埋深为1000~1400 m,油层厚度为10~15 m,储层平均有效孔隙度为11%~15%,平均空气渗透率为 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ <sup>[10]</sup>;孔隙类型属于小孔细喉型,平均喉道半径为0.47  $\mu\text{m}$ ,中值半径为0.25  $\mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>。安塞油田为典型的低孔、低渗油藏。

油田回注污水不可避免,而安塞低渗透油田因注入水中悬浮颗粒堵塞储层而造成注水难、采油难的现象明显。本研究设计不同浓度、粒径的悬浮颗粒溶液的室内岩心流动实验,以确定安塞油田合理的悬浮颗粒指标,为改善安塞油田注水效果提供技术支持。

## 1 岩心流动实验

### 1.1 实验材料

石英砂(5000目2.6  $\mu\text{m}$ 左右,河北灵寿县佳豪矿物粉体厂),氯化钠NaCl(天津市天力化学试剂有限公司),安塞油田天然岩心(甘肃庆阳西峰岩心库),微孔滤膜圆片膜(0.10、0.45、0.65、0.80、1.20、3.00  $\mu\text{m}$ ,北京海成世洁过滤器材有限公司),蒸馏水。

### 1.2 实验设备

100DX型双计量泵(TELEDYNE 美国ISCO公司),活塞容器ZR-3(400 mL/70 MPa,海安发达石油仪器科技有限公司),不锈钢岩心夹持器(海安发达石油仪器科技有限公司),

电热鼓风干燥箱(0~300℃,上海市实验仪器总厂),电子天平JA5003,单相电容运转电动机(天津市中环天虹微电机有限公司),过滤设备,Winner 2000ZD激光粒度仪(济南微纳颗粒仪器股份有限公司),试管,秒表,量筒,烧杯。

### 1.3 实验步骤

1) 配置悬浮溶液。模拟地层水:采用90 g/L NaCl 溶液(现场地层水矿化度为89.8 g/L),消除岩心对矿化度的敏感性,保证颗粒作为单一影响因素。

制备浓度为2 mg/L、粒径为0.275  $\mu\text{m}$ 的悬浮溶液。(1) 将5000目石英砂溶于蒸馏水,静置36 h后,取上清液;(2) 先用孔径为0.45  $\mu\text{m}$ 的滤膜过滤上清液,再用孔径为0.10  $\mu\text{m}$ 的滤膜过滤;(3) 将0.10  $\mu\text{m}$ 的滤膜及上面附有0.10~0.45  $\mu\text{m}$ 的颗粒一起烘干称重;(4) 用一定体积的模拟地层水漂洗0.10  $\mu\text{m}$ 的滤膜,再次将其及上面的颗粒烘干称重,计算出漂洗下来的颗粒质量,从而得到一定质量浓度的悬浮溶液;(5) 用Winner 2000ZD激光粒度仪<sup>[12]</sup>验证所配溶液中悬浮颗粒的粒径是否在两种滤纸的孔径之间;(6) 将悬浮容易稀释至2.0 mg/L,粒径处于0.10~0.45  $\mu\text{m}$ ,取平均值0.275  $\mu\text{m}$ 作为实验粒径。

2) 岩心选取。取气测渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的天然岩心,在80℃的烘箱中烘48 h,称干重,测定长度及直径,抽真空24 h后,用模拟地层水进行饱和12 h,再放入中间容器中加压20 MPa饱和24 h,称湿重,计算孔隙度。

利用模拟地层水在常温、围压20 MPa、流速0.1 mL/min的条件下,测定多块岩心的水测渗透率值。选取水测渗透率值接近的15块岩心,岩心参数如表1所示,参考《SY/T 5329—1994碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》<sup>[13]</sup>和油田现场相关数据,选取1.0、1.5、2.0 mg/L 3种浓度,0.275、0.550、0.730、1.000、2.100  $\mu\text{m}$  5种粒径的悬浮颗粒溶液在相同的实验条件下进行流动实验。

表1 岩心参数  
Table 1 Core parameters

| 岩心 | 孔隙度/% | 初始渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 悬浮溶液                                   |                   | 岩心 | 孔隙度/% | 初始渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 悬浮溶液                                   |                   | 岩心 | 孔隙度/% | 初始渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 悬浮溶液                                   |                   |
|----|-------|--------------------------------|--|-------------------|----|-------|--------------------------------|--|-------------------|----|-------|--------------------------------|--|-------------------|
|    |       |                                | 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 粒径/ $\mu\text{m}$ |    |       |                                | 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 粒径/ $\mu\text{m}$ |    |       |                                | 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 粒径/ $\mu\text{m}$ |
| 1  | 17.06 | 0.219                          | 1.0                                    | 0.275             | 6  | 15.93 | 0.203                          | 1.5                                    | 0.275             | 11 | 14.02 | 0.138                          | 2.0                                    | 0.275             |
| 2  | 16.34 | 0.222                          | 1.0                                    | 0.550             | 7  | 13.51 | 0.202                          | 1.5                                    | 0.550             | 12 | 15.48 | 0.137                          | 2.0                                    | 0.550             |
| 3  | 15.03 | 0.222                          | 1.0                                    | 0.730             | 8  | 15.05 | 0.235                          | 1.5                                    | 0.730             | 13 | 14.93 | 0.158                          | 2.0                                    | 0.730             |
| 4  | 14.54 | 0.216                          | 1.0                                    | 1.000             | 9  | 14.68 | 0.210                          | 1.5                                    | 1.000             | 14 | 13.65 | 0.163                          | 2.0                                    | 1.000             |
| 5  | 14.11 | 0.191                          | 1.0                                    | 2.100             | 10 | 14.47 | 0.205                          | 1.5                                    | 2.100             | 15 | 15.63 | 0.198                          | 2.0                                    | 2.100             |

3) 流动实验。如图1所示组装实验设备,分组流动实验。

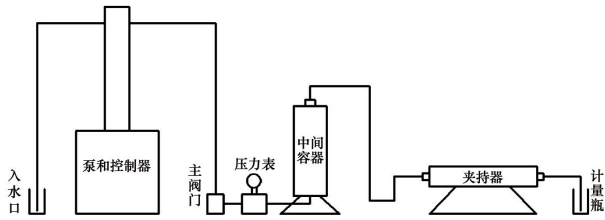


图1 实验流程

Fig. 1 Flow chart of the experiment

### 1.4 数据处理

测定初始岩心的水测渗透率为 $K_0$ ,注入一定孔隙体积(PV)的悬浮颗粒溶液后岩心的渗透率 $K_{PV}$ ,则渗透率损失为 $\alpha$ ,计算公式为

$$\alpha = \left(1 - \frac{K_{PV}}{K_0}\right) \times 100\%$$

$\alpha$ 越大,说明堵塞越严重。按照目前石油行业内普遍认为:当 $\alpha \geq 30\%$ 时,认为悬浮颗粒溶液对岩心产生了伤害。

## 2 结果及分析

### 2.1 注入量对渗透率的影响规律

从图2可以看出,注入不同浓度、粒径的悬浮颗粒溶液,岩心的渗透率随着悬浮颗粒溶液的注入而缓慢下降,并在注入量为30~35倍孔隙体积(PV)时,渗透率维持在某一确定值,此时认为颗粒已经无法进入岩心形成堵塞。

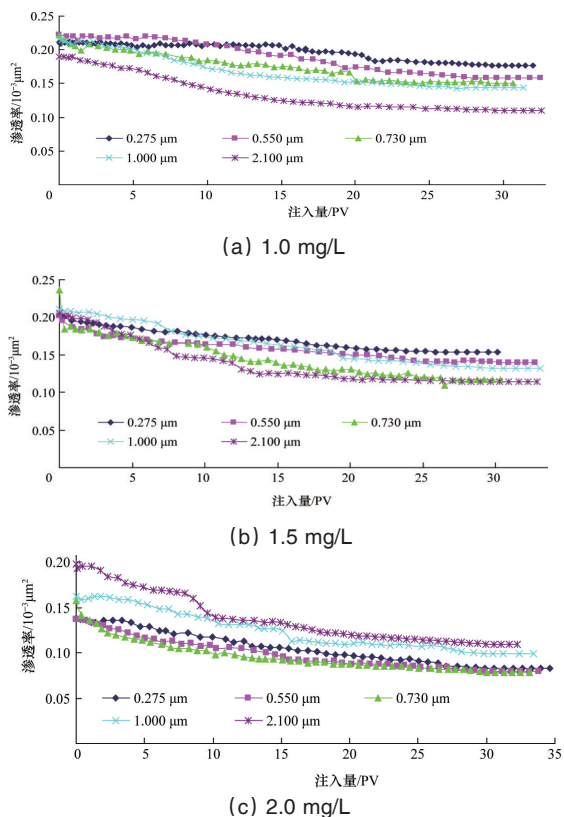


图2 不同粒径下渗透率随注入量的变化

Fig. 2 Permeability changed with the number PV of injected water by different particle size

当悬浮颗粒侵入岩心时,颗粒或被吸附在岩心基质上、或由于重力作用沉积在岩心内部、或卡死在孔喉处,这样造成岩心内部的孔隙度减少,有效流动孔道变小或者减少,岩心内部的孔喉结构发生了改变,宏观表现出岩心的渗透率随着注入量的增大而下降;同时由于安塞油田为典型的低孔、低渗油藏,实验中注入颗粒粒径为安塞油田岩心平均孔喉的1/3~2倍,悬浮颗粒的粒径与岩心的孔喉匹配关系较好,使得岩心在堵塞到一定程度后,无法进入岩心内部形成新的堵塞,这样就导致注入量在30~35 PV时,渗透率开始处于某一平稳值,而不再减小。

### 2.2 浓度、粒径对渗透率的影响规律

注入孔隙体积32 PV时,各个岩心的渗透率损失值见图3。由图3可见,对渗透率接近的岩心,当悬浮颗粒粒径相同时,渗透率损失值随悬浮颗粒浓度的增大而增大;当悬浮颗粒的浓度相同时,渗透率损失值并不是随着颗粒粒径增大而一直增大。浓度为1.0 mg/L时,随着粒径的增大,渗透率损失值一直增加,而浓度1.5、2.0 mg/L时,随着粒径增大,渗透率损失值先增大,到粒度为0.730  $\mu\text{m}$ 达到最大,随后略有所下降,然后再次略增加。

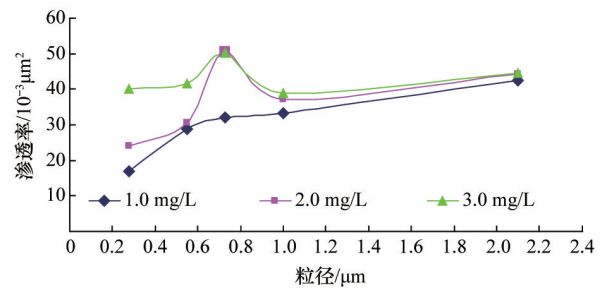


图3 不同浓度、粒径下渗透率损失值曲线

Fig. 3 Curve of permeability reductions under different concentrations and different particle sizes

由图3可见,在粒径由小变大的过程中,不同浓度的曲线间的落差在慢慢减小,0.730  $\mu\text{m}$ 之前,落差较大,0.730  $\mu\text{m}$ 之后,落差较小。这说明:在粒径小于0.730  $\mu\text{m}$ 时,与粒径相对比,浓度对渗透率损失值起主导作用;在粒径大于0.730  $\mu\text{m}$ 时,与浓度相对比,粒径起主导作用;在0.730  $\mu\text{m}$ 附近,浓度和粒径二者起协同作用,能同时较大发挥堵塞作用,此时渗透率损失值的最大值,曲线中出现了高峰。

建议在回注污水时,悬浮颗粒的粒径处于一定范围,且其分布属于一个正态分布,颗粒粒径范围区间应尽量小,其平均值应与储层的平均孔喉相差较大。

### 2.3 安塞油田合理的悬浮颗粒指标

对于安塞油田(气测渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、平均喉道直径为0.940  $\mu\text{m}$ )的天然岩心,正交实验结果如图3所示。由此实验结果可以做出合理地推断, $\rho > 2.0 \text{ mg/L}$ 且不论粒径,渗透率损失值都超过30%; $\rho \leq 1.0 \text{ mg/L}$ 且粒径 $d < 0.730 \mu\text{m}$ 时,渗透率损失值不超过30%;在 $1 \text{ mg/L} < \rho < 2.0 \text{ mg/L}$ 且 $d <$

0.730  $\mu\text{m}$  时, 渗透率损失有大于 30%, 也有小于 30%, 浓度与粒径二者共同作用造成岩心损伤; 0.730  $\mu\text{m} \leq d \leq 2.100 \mu\text{m}$  且不论浓度, 渗透率损失值都超过 30%。

在对实验结果推断下, 建议安塞特低渗透油藏注入悬浮颗粒浓度  $< 1 \text{ mg/L}$ , 粒径  $< 0.730 \mu\text{m}$ 。

### 3 结论

1) 当颗粒入侵到岩心时, 颗粒会因沉积、吸附而造成岩心孔隙度变小, 有效流动孔道变窄, 宏观表现出岩心的渗透率下降; 颗粒的粒径与孔喉的大小接近时, 颗粒恰当地卡死喉道且不易分离, 有效流动孔道变少。当注入量达到一定程度后, 后续的颗粒将处于仪器与岩心端面之间, 且无法入侵到岩心内部。宏观表现出渗透率能较长时间处于某一平稳值。

2) 实验结果表明: 在粒径小于 0.730  $\mu\text{m}$  时, 与粒径相对比, 浓度对渗透率损失值起主导作用; 在粒径大于 0.730  $\mu\text{m}$  时, 与浓度相对比, 粒径起主导作用; 在 0.730  $\mu\text{m}$  附近, 浓度和粒径二者起协同作用, 能同时较大发挥堵塞作用, 此时渗透率损失值的最大值, 曲线中出现了高峰。

3) 建议油田在回注污水时, 颗粒粒径范围区间应尽量小且其平均值应与储层的平均孔喉相差较大; 颗粒浓度在经济效益允许的条件下, 尽可能的小些。由实验结果推断, 建议安塞低渗透油藏注入悬浮颗粒浓度小于 1.0  $\text{mg/L}$ , 粒度小于 0.730  $\mu\text{m}$ 。

4) 为满足当前油田的注水现状, 碎屑岩油藏注水水质推荐主要指标 SY/T 5329—1994 面临修订, 此实验能为低渗透油藏注水中悬浮颗粒指标修订提供一定的依据。

#### 参考文献 (References)

- [1] 原晓珠. 冀东油田注水过程中储层保护技术研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012.  
Yuan Xiaozhu. Research on reservoir protection technique during water injection process of Jidong oilfield[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012.
- [2] 万仁薄, 罗英俊. 采油技术手册: 第 2 册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 40-41.  
Wan Renbo, Luo Yingjun. Production technical manual: vol 2 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 40-41.
- [3] 陈昊宇. 油田回注水微生物腐蚀控制研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011.  
Chen Haoyu. Research on the control measures of microbiological corrosion in oilfield injection water[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [4] 宋永亭, 杜春安, 王新, 等. 采油污水回用深度处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2009, 29(1): 1-5.  
Song Yongting, Du Chunan, Wang Xin, et al. Progress in the researches on advanced treatment technology of oil extraction wastewater recycling [J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(1): 1-5.
- [5] 刘维震. 关于油田注水水质标准及水质评价的探讨[J]. 石油工业技术监督, 2003, 19(7): 3-6.  
Liu Weizhen. An explorative discussion of the standard and evaluation of the quality of water for oilfield Injection [J]. Technology Supervision In

- Petroleum Industry, 2003, 19(7): 3-6.
- [6] 李虞庚. 油田地面工程设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 270-372.  
Li Yugeng. Oilfield ground engineering design [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 270-372.
- [7] Watanabe K, Kodama Y, Syutsubo K. Molecular characterization of bacterial pudinopulations in petroleum-contaminated groundwater discharged from underground crude oil storage cavities[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(11): 4803-4809.
- [8] 袁敏. 污水回注对地层损害程度实验研究[J]. 科技创新导报, 2009(9): 100-101.  
Yuan Ming. Study on the experimental for reinjection sewage to the degree of formation damage [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009(9): 100-101.
- [9] 潘爱芳, 曲志浩, 马润勇. 注水开发中油层结垢伤害机理与防治措施[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(4): 23-28.  
Pan Aifang, Qu Zhihao, Ma Runyong. Formation scaling formation damage and its prevention in water Injection [J]. Journal Of Chang'an University: Earth Science Edition, 2003, 25(4): 23-28.
- [10] 王勇, 郑奎, 曹俊峰, 等. 特低渗油田注水开发技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 3(5): 78-83.  
Wang Yong, Zhen Kui, Cao Junfeng, et al. Research on waterflooding technology of Low permeability oilfield[J] China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 3(5): 78-83.
- [11] 张志伟. 安塞油田低渗透油藏裂缝对水驱效果影响研究[D]. 北京: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2010.  
Zhang Zhiwei. Study on the effect of fractures on the water flooding in low permeability reservoir at Ansai oilfield[D]. Beijing: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [12] 王福贵. 油田采出水常规处理工艺出水中颗粒物粒径分布及分析[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 64-69.  
Wang Fugui. Particle size distribution and analysis of oilfield produced water treatment process[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(3): 64-69.
- [13] 油气田开发专业标准化委员会. SY/T5329—1994 碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1995.  
Oil And Gas Field Development Professional Standardization Committee. professional standardization committee SY/T 5329—1994 Clastic reservoir injection water quality indicators and analytical methods recommended [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.

(责任编辑 刘志远)

#### 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述该领域的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。