

滤层配置特征对砂滤池过滤性能的影响

张建锋¹, 张栋喆¹, 周超¹, 王小佺², 杨宏伟², 解跃峰²

(1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

2.清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 滤料粒径、层厚和颗粒分布等滤层配置特征, 是保证滤池高效运行的关键因素之一。根据实际应用构造了三种典型的模拟滤层, 进行系统的过滤对比试验, 研究滤层构造特征对过滤性能的影响。试验结果表明, 均质滤料滤层在水头损失增长率、滤后水平均浊度、颗粒物截留效果、滤层产水率以及过滤性能指标 F 值等多个方面具有优势; 滤后水颗粒物截留效果主要决定于滤层厚度, 与滤层厚径比 L/d 值没有相关性; 砂滤层对于水中 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间的颗粒物截留效果差; “细粒径、浅滤层”的滤层配置尽管避免了过滤末期浊度值的上升, 但存在水头损失增长率高、滤后水平均浊度高、残留颗粒总数大等弊端, 采用“深滤层、均质滤料”的滤层配置方式应是今后水厂滤池设计和技术改造的主要技术措施。

关键词: 滤层构造特征; 过滤性能; 颗粒物截留

中图分类号: TU991.24

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0737-05

2012年7月1日, 国家《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》开始进入强制实施阶段, 水质监测参数由以往的35项增加到106项, 其中出厂水浊度限值提高到1.0 NTU, 由于砂滤池是常规给水处理过程中去除胶体颗粒和悬浮物的最后一道屏障, 因此1.0 NTU的浊度限值对水厂新建滤池以及老旧滤池改造的设计提出了更高的要求。

在目前的设计中, 一般通过滤料级配和滤层厚度两个指标来完成滤层系统设计, 由于粒径级配和层厚之间存在不同的组合, 因此会造成滤层配置特征的差异, 而这种差异对投产后滤池过滤性能的影响目前仍缺乏系统深刻的认识。在滤池的实际运行中, 一般采用滤后水浊度、水头损失和运行时间来进行系统控制。目前生产中多采用在线浊度仪, 当浊度值 ≤ 0.1 NTU时已漂移出浊度仪监测下限, 无法真实准确反映水质的变化情况。为了弥补浊度仪的不足, 一些发达国家开始采用灵敏度更高的颗粒物计数器作为辅助监测手段^[1-2]。浊度仪对小于 $1.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒物比较敏感, 对大于 $1.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒灵敏度较低, 而颗粒计数器对大于 $1.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒检测灵敏度高, 水体中“两虫”的尺寸均大于 $1.0\ \mu\text{m}$ 。因此浊度仪和颗粒计数器联用, 是目前提高水质安全控制水平的重要手段^[3-4]。

基于滤池生产目标需要和实际运行监控特点, 本文通过粒径、层厚和沿深度方向的粒径级配等三个参数的组合, 构建了有代表性的三种不同配置特征的滤层, 以出水浊度、颗粒物截留和水头损失三个参数为主, 进行了滤层配置对过滤性能影响的研究, 以为滤池的设计和运行控制提供基础支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

(1) 试验系统

实验在济南鹊华水厂中试科研基地完成, 原水来自鹊山水库, 水温 $12\sim 25^\circ\text{C}$, 混凝剂为聚合氯化铝铁(PAFC), 投加量 $2.0\ \text{mg/L}$ (以铝离子计), 沉后水浊度控制在 $2.0\ \text{NTU}$ 左右(与实际水厂生产运行相符)。试验装置流程见图1。

(2) 模型滤柱

水流在多孔介质滤层中流动, 主要受水力条件的影响。滤层中的流动只要满足水力相似条件, 就可以用模型滤柱来研

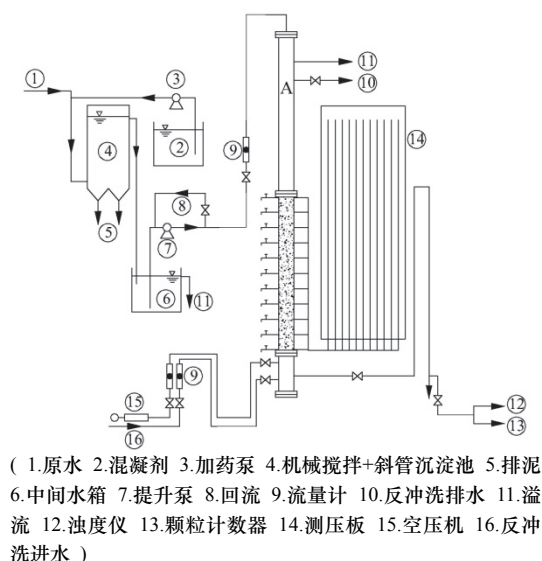


图1 试验装置流程图

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

收稿日期: 2013-12-13

修改稿日期: 2014-07-25

项目基金: 国家重大水专项(2012ZX07408001)

作者简介: 张建锋(1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水处理与节水技术、水资源保护。E-mail: zhangjianfeng@xauat.edu.cn

究实际运行滤池的运行^[5]. 实验确定了三种规格试验滤柱, 分别用来模拟国内均质滤料滤池(滤柱 A)、国内级配滤料滤池(滤柱 B)^[6]、美国级配滤料滤池(滤柱 C)^[2]. 通过调整层厚, 实现不同厚径比(滤层厚度/有效粒径, 与滤料的体积比表面积成正比)和纵向粒径分布的滤层配置^[7]. 试验采用有机玻璃滤柱, 内径 100 mm、高度 5 000 mm, 布置 1 个小阻力长柄滤头, 各滤柱主要参数见表 1.

1.2 试剂与仪器

采用美国哈希 1720E 低量程在线浊度仪监测滤后水浊度, 采用美国哈希 PCX2200 在线颗粒计数器监测水中颗粒数, 颗粒尺寸分区为: 2~3 μm、3~5 μm、5~7 μm、7~10 μm、10~15 μm、15~20 μm、20~25 μm、>25 μm, 滤层水头损失通过测压板直接读取.

1.3 试验运行条件

滤柱 A、B 滤速范围为 6~10 m/h, 滤柱 C 滤速范围为 4~8 m/h. 滤后水浊度限值为 1.0 NTU, 过滤极限水头损失取 1.5 m, 过长的过滤周期可能造成滤料表面沉积物不宜剥离, 一般过滤周期不宜超过 48 h. 由此形成三个触发条件同时并行的控制模式, 当滤后水浊度大于 1.0 NTU、或水头损失达到 1.5 m、或过滤周期达到 48 h 时, 停止过滤进行反冲洗.

1.4 试验滤柱反冲洗参数

滤柱 A (均质滤料) 采用气水反冲洗, 滤柱 B (国内级配滤料)、滤柱 C (美国级配滤料) 采用单独高速水冲洗, 各滤柱反冲洗参数见表 2. 其中滤柱 A、B 反冲洗参数同实验水厂实际条件, 反冲洗采用实验滤柱出水.

表 1 试验滤柱主要参数

Tab.1 Configuration of filter media			
滤柱编号	滤柱 A	滤柱 B	滤柱 C
有效粒径 d_{10}/mm	0.85	0.6	0.5
$K_{80}(K_{60})$	$K_{80}=1.4$	$K_{80}\leq 2.0$	$K_{60}=1.4$
滤层厚度 L/m	1.2	0.8	0.76
L/d (厚径比)	1410	1330	1520
配置特征	均质滤层	级配滤层	级配滤层

表 2 滤柱反冲洗控制参数

Tab.2 Backwashing methods for model filter				
项 目	滤柱 A		滤柱 B	滤柱 C
冲洗时间/min	气 5	气、水 5	水 8	5
冲洗强度/ $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气 15.3	气 15.3、水 4.7	水 4	15

2 结果与讨论

2.1 水头损失增长率的变化

在 4~10 m/h 的滤速范围下, 三种滤层中 10 cm 厚度滤层水头损失平均增长率 ($\Delta H/\Delta t$) 按照从大到小的顺序排列为: 滤柱 C (美国级配滤料) > 滤柱 B (国内级配滤料) > 滤柱 A (均质滤料). 这一顺序与滤料粒径大小排序相反, 即粒径越小的滤料单位厚度滤层水头损失增长率越大 (见图 2). 在一定滤速条件下, 小粒径滤料滤层的水头损失增长限值可能成为终止滤池运行、启动反冲洗的触发条件. 滤层的厚径比 L/d 值, 与水头损失增长率没有直接关系.

2.2 滤后水浊度的变化情况

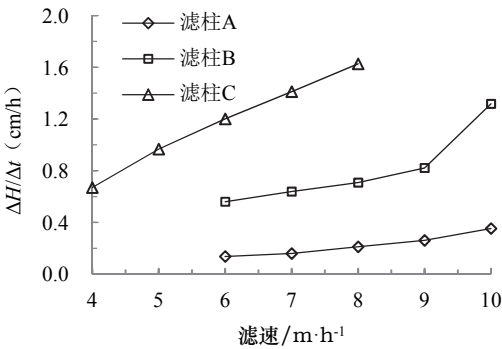


图 2 滤速对滤层水头损失增长率的影响
Fig.2 Increasing rate of head loss with filtration rate

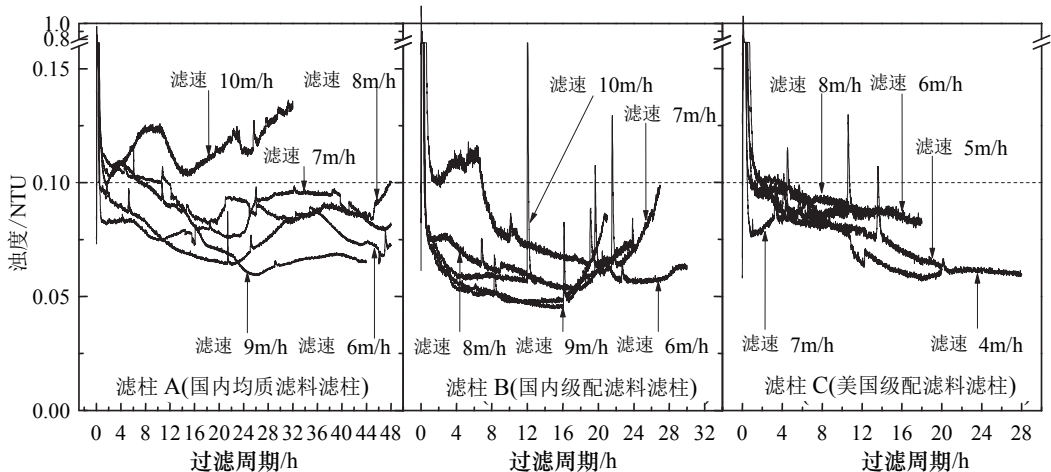


图 3 各滤柱不同滤速条件下滤后水浊度对比
Fig.3 Filtered water turbidity with different filtration rate

待滤水浊度在 2.0 NTU 左右,不同滤速下各滤柱滤后水浊度变化情况见图 3. 可以看出在 4~10 m/h 滤速范围内,各滤柱整个过滤周期内滤后水浊度基本保持稳定,滤柱 A、B 在过滤周期末段浊度有不同程度的上升趋势,但均未发生穿透. 除滤柱 A 在 10 m/h 滤速条件下,滤后水浊度介于 0.1~0.15 NTU 之间以外,各滤柱成熟期以后滤后水浊度均能控制在 0.1 NTU 以下. 从浊度变化情况来看,具有“细粒径、浅滤层”构造特征的滤柱 C 出水浊度持续下降,在水质保障和滤池运行管理上具有一定的优势,由于目前国内众多水厂在实际生产中并没有对初滤水进行处理,因此根据检测结果计算出滤后水平均浊度见图 4. 按照平均浊度由大到小排序为滤柱 C>滤柱 A>滤柱 B,这一顺序恰好与 L/d 值顺序相反,即 L/d 值大的滤层,出水平均浊度较大. 尽管按照过滤理论^[7],滤层厚径比 L/d 值与过滤效率成正比,但试验结果表明保证一定的滤层厚度在实际生产中更有必要.

2.3 滤速对各滤柱滤后水颗粒数的影响

不同滤速条件下各滤柱滤后水中颗粒总数的变化情况见图 5 (待滤水中颗粒物计数为~15900). 随滤速

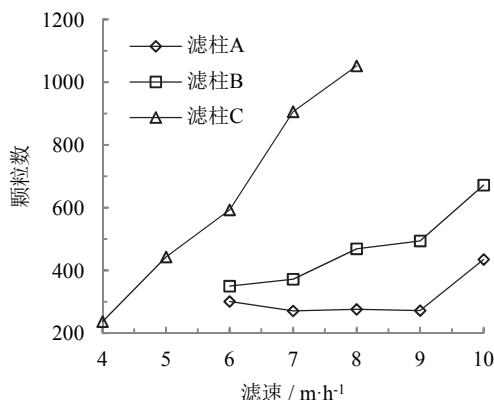


图5 不同滤速条件下滤后水中颗粒总数

Fig.5 Number of particles effluent with filtration rate

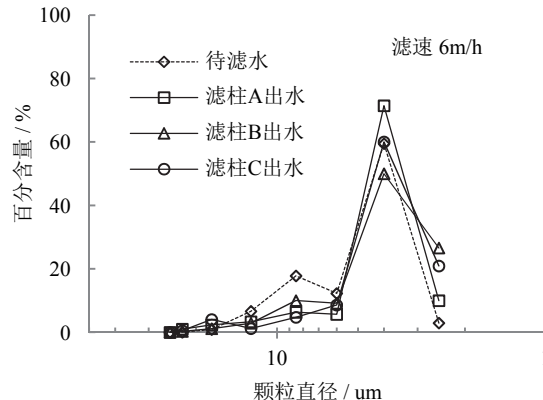


图6 颗粒粒径分布特征

Fig.6 Distribution of particles in water

增加,滤后水中颗粒数呈上升趋势,但各滤柱对滤速影响的响应程度有所不同. 从颗粒物截留效率来看,均质滤料滤层(滤柱 A)应对滤速变化的能力最强,两种级配滤料(滤柱 B、C)比较,采用“大粒径、深滤层”的滤柱 B 效果更好. 三种滤层对颗粒物截留效果的差异与滤层厚度顺序一致,即采用最大滤层厚度的滤柱 A 对颗粒物截留效果最好,表明深滤层有利于颗粒物的截留,这一点在滤池设计参数确定中尤其具有重要的指导意义.

比较待滤水和滤后水中颗粒物粒径分布特征,可以发现三种滤后水中 2~5 μm 的小颗粒比例随着滤速上升而增加,表明增大滤速会降低滤池对小颗粒的截留效率. 三种滤层对大于 7 μm 颗粒的截留效果明显,在 6 m/h 滤速条件下运行,水中残留的 7~10 μm 颗粒含量由 17.8%降低至 6.3% (滤柱 A),颗粒粒径分布的“双峰”分布转化为“单峰”分布,见图 6. 相同滤速条件下,与待滤水中 62.4%的比例水平相比,各滤柱滤后水中 2~5 μm 之间颗粒比例增加至 80.9%~84.22%,而 7~10 μm 之间颗粒的比例减少,由 17.8%减少至 3.32%~8.06%,说明砂滤池对 7 μm 以上大颗粒去除效率高,这与以往的普遍认识相吻合.

不同滤速条件下,各滤柱滤后水中 2~5 μm 之间的颗粒含量较高,这一方面与待滤水中此范围内颗粒比例高有关,另一方面也说明砂过滤对水体中 2~5 μm 之间颗粒的截留效果差,而这一粒径范围内的颗粒计数结果与水中隐孢子虫卵囊的密度呈现良好的相关性^[8],因此提升过滤效果的关键在于强化对 2~5 μm 粒径范围内颗粒的截留.

从颗粒物粒径分布变化情况看,厚径比 L/d 值不同的三种滤层没有明显的差异,但从颗粒总数截留效果来看,较深的滤层构造有利于提升滤后水质的卫生安全性.

2.4 过滤产能的对比分析

产水效率是衡量滤池制水能力的重要指标,与滤速、过滤周期、反冲洗强度及冲洗时间等因素有关,

数值等于一个过滤周期内净产水量(过滤水量扣除反冲洗水量)与过滤水量之比^[2],各滤柱产水效率见图7。

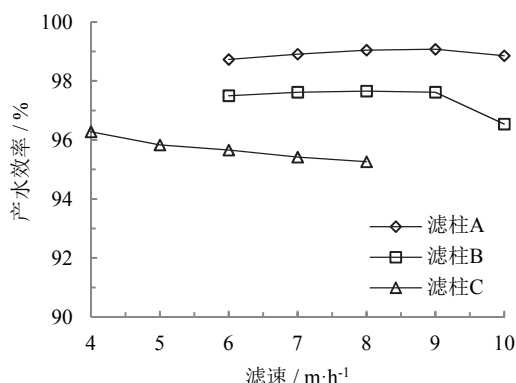


图7 各滤柱不同滤速条件下的产水效率
Fig. 7 Production efficiency under filtration rate

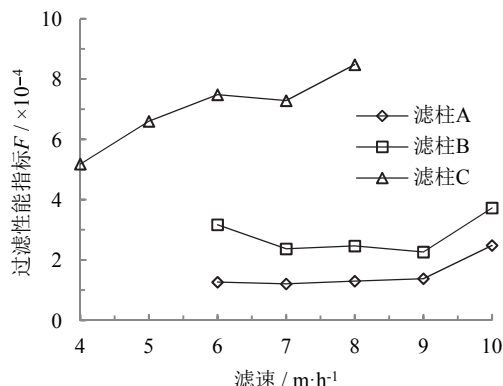


图8 各滤柱不同滤速条件下过滤性能指标
Fig. 8 Comparison of performance assess index

在相同的滤速下,均质滤料滤层产水效率最高,采用美国级配滤料的滤层产水效率最低。均质滤料滤池产水效率最高是因为其过滤周期长,过滤周期内产水量大,同时采用气水联合反冲洗,反冲洗耗水量小^[6]。

2.5 过滤性能综合评价

在综合评价滤池的过滤性能时多采用过滤性能指标 F 值, F 值与滤池进水浊度、出水浊度、过滤周期、滤速、水头损失有关, Ievs^[9] 给出的 F 值计算公式如下:

$$F = \frac{HC}{C_0 VT} \quad (1)$$

式中: H 为过滤周期末的水头损失增长量, m; V 为过滤速度, m/h; T 为过滤周期, h; C 为滤池的平均出水浓度, mg/L; C_0 为滤池的平均进水浓度, mg/L。

F 值越小,说明滤池过滤性能越好。各滤柱不同滤速条件下过滤性能指标 F 值的变化见图6。在试验滤速范围内,滤柱A(均质滤料)过滤性能指标 F 值最小,并且在6~9 m/h滤速范围内性能指标稳定,表明这种滤池构造在应对水厂水力负荷波动的方面具有突出的优势。另一方面,采用较“小粒径、浅层厚”配置的滤柱C,尽管其厚径比 L/d 值在三种滤层中最大,但其综合性能指标值最差。

3 结论

通过滤层水头损失增长率、滤后水平均浊度、颗粒物截留效果、滤层产水率以及过滤性能指标 F 值等多个角度的对比,可以发现国内目前水厂设计中广泛采用的均质滤料滤层具有明显的优势。从提升供水水质安全性出发,较深的厚度有利于强化滤层对水中颗粒物和浊度截留效率,9 m/h以下的滤速对砂过滤截留能力没有明显的影响,均质滤料滤层耐水力负荷波动冲击的能力较强,这在实际生产运行中非常关键。

针对具体的滤层构造控制参数,以往关注的滤层厚径比 L/d 值与浊度、颗粒数控制没有相关性,滤层厚度和滤料沿深度方向的级配特征对于滤后水水质影响显著,采用“深滤层、均质滤料”的滤层配置方式可以有效提升滤后水的水质安全性,应是今后水厂滤池设计和技术改造的首选方案。

参考文献 References

- [1] 朱洁, 陈洪斌, 孙博雅. 颗粒物计数法用于给水处理的评述[J]. 净水技术, 2009, 28(1):1-6.
ZHU Jie, CHEN Hongbin, SUN Boya. Application of particles counting in water treatment[J]. Water Purification Technology, 2009, 28(1):1-6.
- [2] CLEASBY John L, LOGSDON Gary S. Granular bed and precoat filtration. In: AWWA. water quality and treatment—a handbook of community water supplies[M]. 5th ed. New York: Mc Graw Hill, 2000.
- [3] 杨艳玲, 李星, 丛丽, 等. 优化监测与净水工艺提高致病原动物去除率[J]. 给水排水, 2003, 29(6):22-26.
YANG Yanling, LI Xing, CONG Li, et al. Optimizing of water quality monitoring and removal of pathogenic protozoa in waterworks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(6):22-26.
- [4] 周超, 张建锋, 何华, 等. 砂滤池对水中颗粒物截留效果及反冲洗效果的分析[J]. 给水排水, 2013, 39(9):24-29.
ZHOU Chao, ZHANG Jianfeng, He Hua, et al. Analysis on the effects of retaining particles and back-washing in sand filter[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(9):24-29.
- [5] 王利平, 张世华, 王峰慧, 等. 均质石英砂滤料过滤性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1996, 28(1):65-69.

- WANG Liping, ZHANG Shihua, WANG Fenghui, et al. Study on the performance of filtration by uniform quartz sand media[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 1996, 28(1):65-69.
- [6] 张建锋, 王磊波. 滤池气水反冲洗强度控制指标的建立与分析[J]. 给水排水, 2008, 34(2):15-18.
- ZHANG Jianfeng, WANG Leibo. Establishment and analysis of strength index for air scour and water backwash of filter[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(2):15-18.
- [7] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京:中国建筑工程出版社, 2000.
- XU Baojiu. Water treatment theories and principles[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [8] HSU Bingmu, YEH Hsuan-hsien. Removal of Giardia and Cryptosporidium in drinking water treatment: a pilot-scale study[J]. Water Research, 2003, 37(5):1111-1117.
- [9] LEKKES T D. A Modified Filterability Index for Granular Bed Water Filter[J]. Filtration and separation, 1981, 18(3): 214-216.

Effect of filter media configuration characteristics on the performance efficiency in quartz sand filter

ZHANG Jianfeng¹, ZHANG Dongzhe¹, ZHOU Chao¹, WANG Xiaomao², YANG Hongwei², XIE Yuefeng²

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The particle size, bed depth and configuration of filter media play a key role in filtration process. Based on the practice, three typical monomedium sand configurations were selected to conduct performance comparison with several focuses. The results revealed that homogeneous sand media have some advantages in head-loss increasing control, filtered water average turbidity, particles removal efficiency, filter net production ratio and performance index F value. The particle count control depended on the bed depth mainly, and the effect of filter media equivalent depth L/d on particle removal was proved. The particles with size 2~5 μm was the most groups difficult to remove with sand filter. The less size and depth of media configuration means higher head loss increasing, higher filtered water turbidity and particles count, although this configuration could avoid the detrimental effect from turbidity increasing at the end of run. All of above, the media configuration with deeper bed depth and more uniform size distribution along depth should be regarded as the prior alternative choice for filter design and prompting in the future.

Key words: filter media configuration; filtration performance; particles count control

(本文编辑 桂智刚)

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 收录证书

西安建筑科技大学学报. 自然科学版

依据文献计量学的理论和方法, 通过定量与定性相结合的综合评审,
贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊, 特颁发此证书。

证书编号: CSCD2013C-0746

有效期: 2013年-2014年

发证日期: 2013年7月

查询网址: www.sciencechina.ac.cn

中国科学院文献情报中心
中国科学引文数据库

