

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.006

滦河冲洪积扇上部河流与地下水相互作用模拟

马红宇,黄 勇

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:利用 Feflow 软件对滦河滦县段主要污染物硝酸盐氮的区域进行数值模拟,同时对监测井数据进行溶质拟合验证并模拟预测。研究表明,河道两侧地下水在山前上游附近污染不明显,河流在出山口后,沿河流两岸地下水出现了一定程度的污染,下游相对上游污染较严重,预测该地区未来 5 年中,由于黏土层的阻隔致使地下水污染物扩散逐渐减缓。

关键词:硝酸盐氮;Feflow 软件;数值模拟;滦河

中图分类号:P641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)04-0032-05

Simulation on interaction between river and groundwater on Luanhe River Alluvial Fan

MA Hongyu, HUANG Yong

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Numerical simulation was made to the section of Luanhe County, Luanhe River, where there are the major pollutants of nitrate nitrogen, by the software Feflow. And in the meantime, solvend fitting verification and simulation forecast to the data of monitoring well were made. The results show that the groundwater in both sides of the river is polluted unclearly around the upstream before the mountain; after the river runs out of the mountain, the groundwater along the river banks is polluted at a certain degree; the groundwater in downstream is polluted more seriously than the one in upstream. We can forecast that the clay barrier will make the diffusion of pollutants in the groundwater slowdown gradually in the coming 5 years.

Key words: nitrate nitrogen; Feflow software; numerical simulation; Luanhe River

滦河发源于河北省丰宁县西北小梁山大古道沟,流经内蒙古转回河北省,经承德、下游流经唐山市的迁西、迁安、滦县、滦南、乐亭入渤海。滦河是河北省也是我国北方流量较大、常年有水的河流之一,为沿岸的工农业生产、居民生活提供了水源。然而,20 世纪 60 年代以来,滦河两岸森林砍伐速度过快,造成汛期泛滥成灾,冬春季流量锐减;沿岸各种工业发展迅速,居民人数急剧增长,生产废水和生活污水任意排放,已严重影响和制约了滦河流域的工农业生产和居民生活。本文选取滦河与其周边地区作为研究区,采用数值模拟方法研究滦河与地下水的相互作用,在二维剖面的基础上使用区域模型^[1],在滦河冲

积扇区域范围内对地下水污染进行了模拟及预测。
由于滦河冲积扇地下水与河流交互属于典型的山前平原区交互机理^[2-4],关于山前平原区地下水层直接相通时,地下水近似呈水平流。河水与地下水的补排关系取决于河水水位和含水层的测压水位,当河水水位高于地下水水位时,河水补给地下水;当河水水位低于地下水水位时,河水排泄地下水^[5-6]。

1 地质及水文地质条件概况

1.1 研究区位置

研究区位于滦县京山铁路以下(即山前平原区的起点)约 5.5 km 的河段上,具体位置为从滦县老

基金项目:国家自然科学基金(51079043)
作者简介:马红宇(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水文地质。E-mail:MHY_510@163.com

站至下游岩山部分,河流近似呈南北向,水流方向由北向南。该区以滦县为顶点发育了晚更新世晚期和全新世冲积扇^[7],研究区位于滦河冲积扇上部。为了研究滦河与地下水的相互作用,在研究区共设置了3条监测断面,并布设了13口监测井。其中研究区左边较深色边界为滦河区域内一、二级阶地的分界线,左边较浅色边界为一级阶地与弱富水分界线,右侧为滦河边界(图1)。

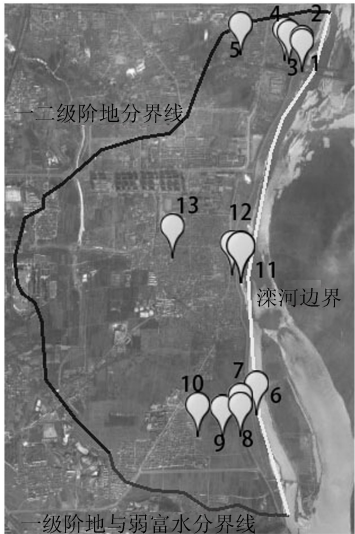


图1 研究区位置及钻孔布置

1.2 水文地质条件

- a. 地层结构。钻孔过程中,对研究区地层从上到下进行了描述和编录,发现研究区地层岩性主要为粉细砂、黏土和砂卵石层。
- b. 含水层类型。研究区含水层结构类型在垂向上表现为二元结构。上部为粉细砂、黏土组成的弱透水层,颗粒粒径较小,渗透性较小,其中粉细砂厚度约为1~4.5 m,在研究区分布连续,黏土厚度约为0~7 m,分布不连续;下部为砂卵石组成的强透水层,颗粒粒径较大,渗透性较强,砂卵石层厚度一

般20~28 m(图2)。

多年来的地质与水文地质勘查表明,平原内埋藏着分布非常复杂的古河道带,这些古河道带的沉积物多为较粗颗的砂、细砂与黏土层交错叠置。这些埋藏的古河道带砂层常赋存着丰沛的地下水。

c. 地下水动态变化。水源地地下水水位年内变化过程受气象、水文及人为等因素的影响,表现为降水与河流混合型。地下水水位年内变幅0.22~1.92 m,其在年内季节变化过程中可分为3个阶段。

地下水的相对稳定期:自当年10月至次年2月,地下水补给、排泄处相对平衡状态,此期间地下水变化较为平衡。

地下水下降期:自3月至5月,由于降水较少,又是农业春灌集中开采期,地下水补给不充分,造成地下水的消耗量大于补给量,地下水水位呈缓慢下降态势。但在岩山渠首引水期间,河道渗漏水量增加,地下水水位急剧上升,上升幅度0.2~0.5 m。引水过后,地下水水位重新呈现回落之势。

地下水回升期:每年6—9月期间,雨季来临,降水量和河道径流增加,且农业用水量较少,地下水得到充足补给,补给量大于排泄量,使水位回升,上升幅度0.4~1.5 m,并达到年内最高值。高水位过后,地下水水位又转入下降阶段。

- d. 地下水补给、径流和排泄关系:研究区内地下水的补给来源主要为大气降水、侧向的渗流补给以及河道渗漏补给。地下水与滦河水关系密切,升降同步,特别是靠近滦河的观测点更为明显,滦河水位高于西岸地下水水位,以渗漏补给^[8]地下水为主。
- 水源地地表岩性多为粉土、粉细砂,有利于大气降水的入渗补给,滦县地区多年平均降水量610.5 mm,为地下水的形成提供了充足的水源保证。地下水流向自西北向东南方向流动,与地面倾斜方向基

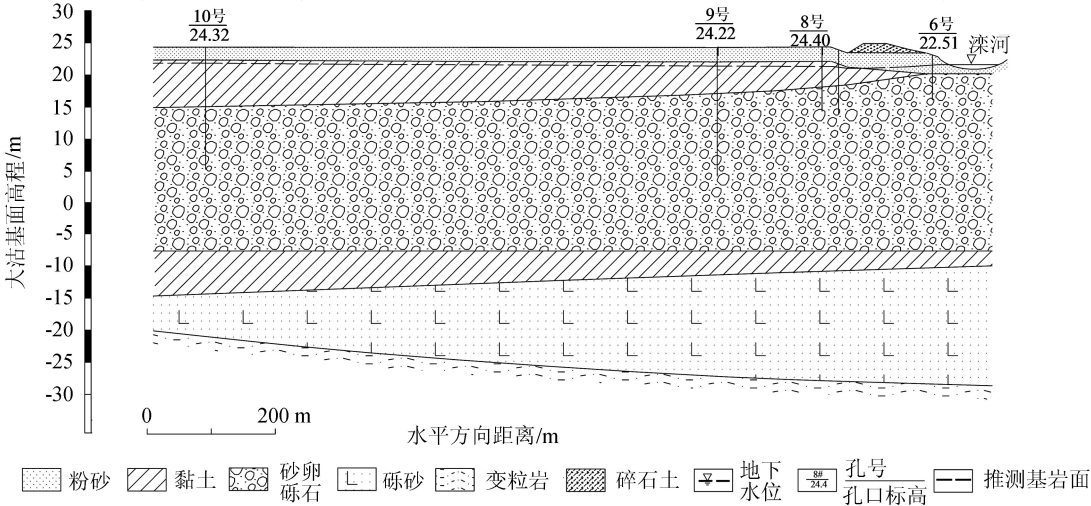


图2 滦河下游区域水文地质剖面

本一致,枯水期水力坡度 0.002 33,丰水期由于地下水补给充分,水力坡度增大,达 0.005 03,地下水流向也略有改变。

2 地下水数值模型的建立与参数反演

2.1 模型的建立

2.1.1 数学模型

溶质在地下水中的运移符合 Fick 定律,研究区的潜水污染数学模型由地下水水流模型和溶质运移模型通过运动方程耦合而成。溶质运移方程如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = D_x \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)^2 + D_z \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)^2 - u_x \frac{\partial c}{\partial x} - u_y \frac{\partial c}{\partial y} - u_z \frac{\partial c}{\partial z} - R \frac{\partial c}{\partial t} + I & x,y,z \in \Omega, t \geq 0 \\ c(x,y,z,t) \Big|_{t=0} = c_0 & x,y,z \in \Omega, t \geq 0 \\ c = c_1 & x,y,z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K_n \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = c(x,y,t) & x,y,z \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases}$$

式中: D_x, D_y, D_z 为 x, y, z 方向的弥散系数; u_x, u_y, u_z 分别为 x, y, z 方向的流速分量; c 为溶质浓度; R 为吸附系数; I 为溶质源汇项, n 为边界面的法向方向, K_n 为边界面法向方向的渗透系数,m/d。方程右端前 3 项表示扩散效应引起的溶质运动,中间 3 项为水流对流引起的运动,倒数第二项为吸附项。 Γ_1 为浓度边界; Γ_2 为溶质通量边界。

2.1.2 网格剖分

研究区三维空间模型由 4 个片和 3 个层构成。其中,第 1 个片是潜水面,由于其高程是随地下水水位变化的。研究区地面高程等值线由 13 个观测井的地面高程来确定,其中 1~5 号井设在研究区上游位置,6~10 号井设在研究区下游位置,11~13 号井设置在研究区中游,采用阿基玛-内插外推法(Akima inter/extrapolation)插值生成。第 2 个片是砂层底板,第 3 个片是黏土层底板,第 4 个片是潜水含水层的隔水底板,由于研究区潜水含水层的厚度约为 30 m,则隔水底板的高程由地面高程减去 30 m 的距离即可得到。由于研究区粉细砂、砂卵石层没有缺失,厚度分布稳定,而黏土层部分地区缺失,厚度分布不均,在模拟过程中假设黏土层缺失的地区厚度为 1 m。计算区面积为 9.5 km²,采用 Feflow 软件进行自动三角形网格剖分,剖分单元 29 181 个,结点 20 364 个(图 3)。

2.1.3 边界条件

使用 Feflow 软件^[9],选取 2010 年 11 月 11 日的

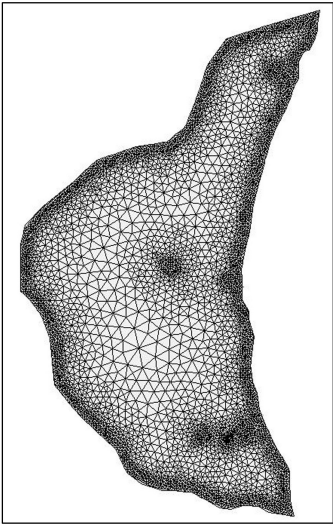


图 3 研究区有限元三角网格剖分

流场作为地下水模拟的初始流场,选取 2011 年 11 月 11 日作为模拟截止日期。研究区的划定根据水头边界以及一、二级阶地边界得出,研究区左边界为滦河,右边界、上边界及下边界为区域内一级阶地和二级阶地的分界线,故不考虑水力联系,水力联系为零。由于滦河在一年四季内的水位变化幅度较大,故将滦河水头边界设置为动态边界,本文拟定 12 个数据,把每个月 15 日测得的水位作为平均水位从而组成动态水位。考虑到研究区特殊情况,将污染源考虑为线源及东部滦河边界,但污染物上中下游不尽相同,故在右边界进行分段赋值。上游河水中 NO₃-N 质量浓度平均值为 5.4 mg/L;下游河水中 NO₃-N 质量浓度平均值为 6.0 mg/L。中游部分取二者的平均值。

2.2 水文地质参数反演结果

根据图 4 所示,由于模拟只能大致反映研究区域概况,故导致模拟结果与实际情况有一定误差。7 号井中 NO₃-N 质量浓度的模拟值与观测值趋势基本一致。由于 7 号井附近有供水水源地,抽水量较大,NO₃-N 离子随着地下水被抽出,从而导致井中污染物浓度降低。7 号井中 NO₃-N 质量浓度的观测值与模拟值差值部分是由附近排污口排放污水而引起的。8 号和 9 号井中 NO₃-N 质量浓度的观测值略高于模拟值,这是由于该两口观测井位于农田中,地表施肥导致井中污染物浓度较高。区域拟合基本反映出了 NO₃-N 质量浓度的变化趋势。模拟值与实际监测值之间的差别,主要是由于人工补给或地表灌溉造成的。识别后的模型能够反映研究区 NO₃-N 的运移情况。

由于沿河流方向 7 号井附近降落漏斗^[10]的存在,使得河流入渗水的范围至距河较近的井,而内陆

表 1 反演后的主要水文地质参数值

观测井	粉砂含水层		砾石含水层	
	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度
1 号	5.8	0.08	350.5	0.25
2 号	4.7	0.07	347.6	0.18
3 号	4.5	0.06	345.0	0.22
6 号	1.2	0.06	246.8	0.04
13 号	3.2	0.05	354.8	0.15

表 2 反演后的主要水文地质参数值

观测井	粉砂含水层		黏土含水层		砾石含水层	
	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	储水系数
4 号	4.0	0.05	0.06	0.03	207.7	1.25×10^{-5}
7 号	1.5	0.05	0.03	0.02	172.8	1.38×10^{-5}
8 号	1.8	0.04	0.05	0.02	245.5	0.80×10^{-5}
9 号	2.0	0.08	0.02	0.04	177.1	0.75×10^{-5}
10 号	2.2	0.03	0.01	0.02	138.5	0.78×10^{-5}
11 号	2.5	0.07	0.06	0.03	260.5	1.50×10^{-5}
12 号	2.8	0.06	0.07	0.03	270.7	1.42×10^{-5}

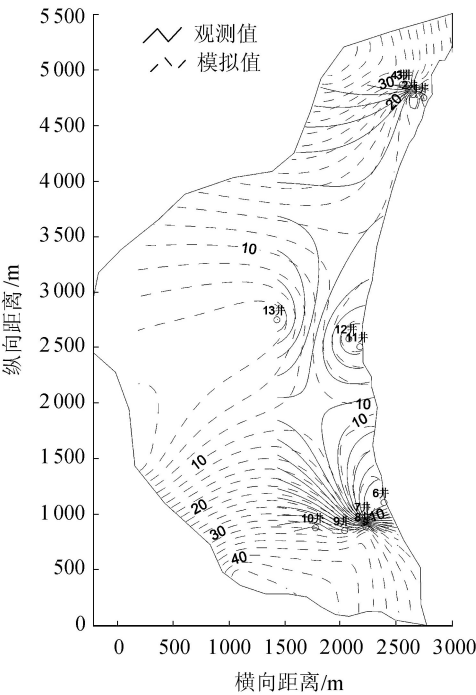


图 4 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度的模拟值与观测值
流场对比 (单位: mg/L)

观测井中较高浓度的污染物主要是由地表灌溉或者施肥引起的。河岸附近水井非开采状态下入渗河水在含水层中运移表明,无抽水情况下井中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度明显高于抽水情况下的浓度,污染物向内陆扩散明显,主要水文地质参数反演结果^[11]见表 1 与表 2 所示。

3 河流水位变化条件下地下水中污染物迁移规律分析

本文对监测值进行拟合后,继续对研究区 $\text{NO}_3\text{-N}$ 进行了 5 年的运移模拟研究(图 5)。随着时间的增长,井中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 污染物浓度逐年升高,且河水中污染物向内陆扩散范围逐渐增大。在洪水期河流水位上涨 10 m 条件下,其水位远高于河岸附近地下水水位,污染物主要在水力梯度作用下随水流向内陆运

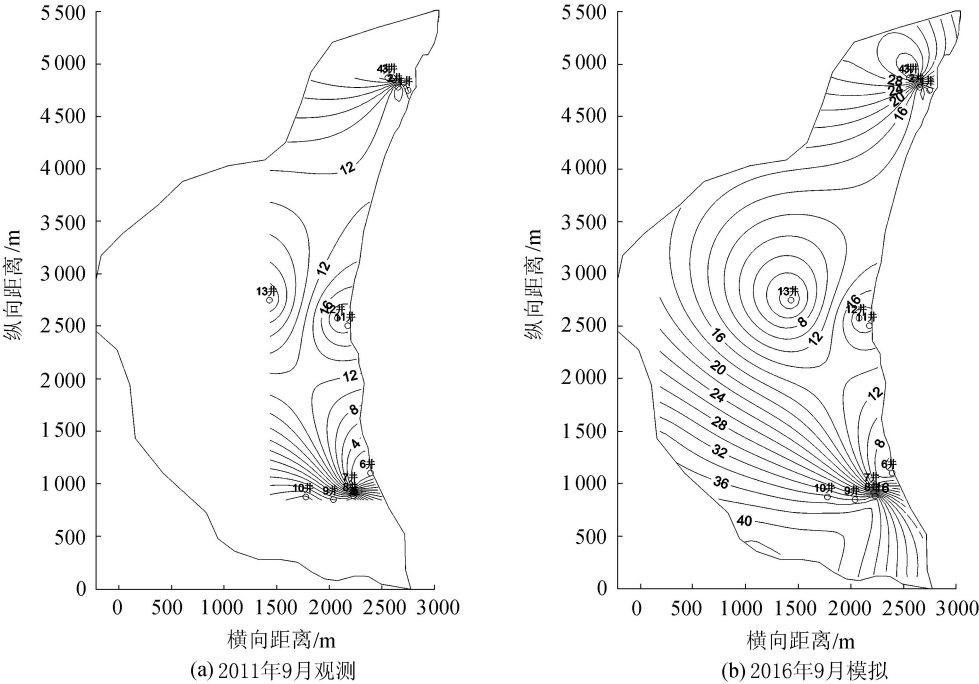


图 5 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度流场对比 (单位: mg/L)

移和扩散。在2号、12号和7号井附近由于水位降落漏斗的存在,使得河水中的污染物不易扩散到漏斗中心^[12]左侧区域。在枯水期河水位下降10m条件下,河水位低于河岸附近地下水位,使得地下水补给河水,导致河岸附近井中污染物被地下水流稀释,随时间呈下降趋势变化。污染物运移滞后时间预测表明河水中污染物运移至地下水的时间随着距离的增加而增大。考虑黏土层时污染物运移滞后时间大于忽略黏土层时滞后时间,主要原因黏土层的存在对于污染物具有阻碍和拦截作用,使得污染物运移扩散速度变得缓慢。

4 结 论

- a. 滦河污染直接影响了滦河冲积扇地区的地下水水质,通过监测与模拟该地区所进行的拟合研究,得出了滦河冲积扇地区的主要水文地质参数。
- b. 滦河与地下水的补给关系为河流补给地下水,在此过程中地下水受到河流污染物的影响。前期污染物扩散迅速,可能与研究区地下砂层与砾石层的分布有关,后期扩散速度相对减缓,可能与底板黏土层的阻隔有关。对水质进行分析之后,地下水受到了严重的污染且从上游到下游污染情况加重。

参考文献:

[1] 黄丹,肖伟,李勇. 地下水三维数值模拟及其优化开采 [J]. 资源调查与环境,2005,26(2):137-145. (HUANG Dan,XIAO Wei,LI Yong, The 3D numerical simulation and optimal pumping of ground water [J]. Resoures Surver & Environment, 2005, 26(2): 137-145. (in Chinese))

[2] 蒙璐,周志芳,孔劲奇. 河床沉积物厚度对河水污染物向地下水扩散影响的模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2012,20(10):2387-2390. (MENG Lu,ZHOU Zhifang, KONG Jingqi. Numerical modeling of riverbed sediments thickness influence on the contaminants diffuse from river water to groundwater [J]. Science Technology and Engineering,2012,20(10):2387-2390. (in Chinese))

[3] 郝治福,康绍忠. 地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J]. 水利水电科技进展,2006,26(1):77-81. (HAO Zhifu,KANG Shaozhong. Research status and development trend of numerical simulation of groundwater system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2006,26(1):77-81. (in Chinese))

[4] 高善明. 滦河冲积扇结构和沉积环境[J]. 地理研究, 1985,4(1):54-63. (GAO Shanming. Luanhe river alluvial fan structure and sedimentary environment [J]. Geographical Research, 1985, 4(1): 54-63. (in Chinese))

[5] 胡俊锋,王金生,滕彦国. 地下水与河水相互作用的研究进展[J]. 水文地质工程地质,2004,31(1):108-113. (HU Junfeng,WANG Jinsheng,TENG Yanguo. Study progress of interaction between stream and groundwater [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(1):108-113. (in Chinese))

[6] 顾礼明,张晟,金玉,等. 浅层地下水与地表水污染物交换关系研究;以常州市老城区为例[J]. 环境科技, 2012(2):4-8. (GU Liming,ZHANG Sheng,JIN Yu,et al. Research on exchange relationship of surface water and ground water pollutants;taking old city zone of Changzhou as an example [J]. Environmental Science and Technology, 2012(2):4-8. (in Chinese))

[7] 冉志杰,杨歧炎,吕国军,等. 滦县县城周边断裂的初步研究[J]. 华北地震科学,2013,31(2):8-12. (RAN Zhijie,YANG Qian,LYU Guojun,et al. The preliminary study of the faults nearby Luan Xian Country[J]. North China Earthquake Sciences, 2013, 31(2): 8-12. (in Chinese))

[8] 张广华,吕书君. 水文学在推求河道渗漏补给地下水水量的应用[J]. 地下水,1998,20(3):123-125. (ZHANG Guanghua,LYU Shujun. Application of hydrology in calculation of river seepage of groundwater [J]. Groundwater, 1998,20(3):123-125. (in Chinese))

[9] 徐晓民,郭中小,贾利民,等. FEFLOW 在地下水系统数值模拟中的应用研究[C]//第4届寒区水资源及其可持续利用学术研讨会论文集. 佳木斯:黑龙江大学, 2011.

[10] 陈宇良,都基众. 地下水降落漏斗的形成与控制[J]. 工程勘察,2007(6):23-26. (CHEN Yuliang,DU Jizhong. The formation and control of groundwater funnel [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(6):23-26. (in Chinese))

[11] 陈静,周志芳,周玉新. 基于TABU搜索法的水文地质参数反演[J]. 金属矿山,2005(3):46-48. (CHEN Jing,ZHOU Zhifang,ZHOU Yuxin. Inverse analysis of hydrogeological parameters using TABU search method [J]. Metal Mine, 2005(3):46-48. (in Chinese))

[12] 都基众,肖国强. 地下水降落漏斗的控制与恢复[J]. 地质与资源,2005,14(1):53-57. (DU Jizhong,XIAO Guoqiang. Control and recovery of groundwater depression [J]. Geology and Resources, 2005, 14(1):53-57. (in Chinese))

(收稿日期:2014-09-09 编辑:高渭文)

