

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

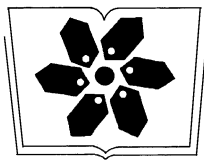
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 4 期

2012 年 2 月 (半月刊)

## 目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响	马长安,徐霖林,田伟,等 (1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价	孙才志,杨磊 (1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征	侯勇,高志岭,马文奇,等 (1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟	高照全,冯社章,张显川,等 (1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应	宋春桥,游松财,柯灵红,等 (1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应	唐振兴,何志斌,刘鹄 (1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素	田凤霞,赵传燕,冯兆东,等 (1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等 (1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程	马井会,顾松强,陈敏,等 (1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系	田丰歌,徐兆礼 (1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状	张跃环,王昭萍,闫喜武,等 (1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征	李慧,王江涛 (1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响	魏杰,赵文,杨为东,等 (1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅	文世勇,宋琍琍,龙华,等 (1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应	陈书军,陈存根,邹伯才,等 (1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局	田中平,庄丽,李建贵 (1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较	石松利,王迎春,周红兵,等 (1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁 (1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响	肖逸,王兴祥,王宏伟,等 (1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境	张翼飞,王炜,梁存柱,等 (1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系	管孝艳,王少丽,高占义,等 (1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性	刘春利,胡伟,贾宏福,等 (1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局	张春华,王宗明,居为民,等 (1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立	王鹏,张春庆,陈化榜,等 (1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等 (1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表	曹宇,鄧军锐,孔译贤 (1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等 (1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别	许文雯,孙翔,朱晓东,等 (1264)
珠三角城市绿地 CO <sub>2</sub> 通量的季节特征	孙春健,王春林,申双和,等 (1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例	吴以中,朱沁园,刘宁,等 (1283)
<b>专论与综述</b>	
湿地退化研究进展	韩大勇,杨永兴,杨杨,等 (1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评	杨荣,苏永中,王雪峰 (1308)
<b>问题讨论</b>	
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性	屠振力,方俐晶,王家刚 (1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响	杨永胜,卜崇峰,高国雄 (1327)
<b>研究简报</b>	
祁连山典型灌丛降雨截留特征	刘章文,陈仁升,宋耀选,等 (1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法	喻梅,周守标,吴晓艳,等 (1347)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-02	



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新鸥种,因此得名)。1931 年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987 年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯市的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990 年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012271852

吴以中, 朱沁园, 刘宁, 陆根法, 戴明忠, 夏晶. 污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例. 生态学报, 2012, 32(4): 1283-1292.

Wu Y, Zhu Q Y, Liu N, Lu G F, Dai M Z, Xia J. Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1283-1292.

## 污染场地地下水渗流场模拟与评价 ——以柘城县为例

吴以中<sup>1,2</sup>, 朱沁园<sup>1</sup>, 刘宁<sup>1</sup>, 陆根法<sup>1,\*</sup>, 戴明忠<sup>1</sup>, 夏晶<sup>1</sup>

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 2. 南京农业大学, 南京 210095)

**摘要:** 地下水数值模拟技术可以定性、定量描述地下水系统中大量的不确定性和模糊因素。由于不合理的开发利用水资源, 柘城县土壤和地表水受到污染严重。以柘城县作为研究区, 通过探讨研究区的水文地质概念模型、地下水流运动的数学模型, 求解该模型, 确定研究方法。同时, 结合地下水各类监测因子, 对研究区的污染场地地下水进行模拟评价, 包括了参数率定和模型预测两部分, 从而确定最合理的地下水开采方案。

**关键词:** 污染场地; 地下水渗流场; 模拟评价; 柘城县

### Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County

WU Yizhong<sup>1,2</sup>, ZHU Qinyuan<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, LU Genfa<sup>1,\*</sup>, DAI Mingzhong<sup>1</sup>, XIA Jing<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

**Abstract:** With the development of computer technology, groundwater numerical simulation technology also gradually developed, and has become an effective tool for quantitative assessment of groundwater. Currently, foreign study in the field mainly aimed at the numerical simulation method and the weak link, new mathematical tools and software development. At present, MODFLOW is the most widely used groundwater simulation software. China began groundwater numerical simulation research in 1973, and has achieved some theory and the application results. Numerical simulation technology could be used to qualitatively and quantitatively describe uncertainty and ambiguity factors for groundwater system. TuoCheng County located in the east of Henan Province, the entire industrial centralizing zone is divided into two parts which lies in the overall plan within the scope of the west and north. Industrial centralizing zone in the land use is divided into three areas: built-up areas, development areas and control areas. Regional spatial structure and urban spatial development structure coincide; overall planning structure can be summarized as: two, three heart, 4-axis and four industrial district. Due to exploitation of local water resources, the soil and surface water of TuoCheng County have been severely polluted. The negative environmental impacts caused by three main areas: the underground water level continued to decline, the steady decline in groundwater storage, urban drinking water safety is threatened; The reservoir and water supply conditions deteriorated along with the increase of channel foreword; the deterioration of water existence trends, industrial waste, sewage, pesticide, fertilizer and so on pollutants affect groundwater quality safety. In current study, we

**基金项目:** 水专项巢湖水污染治理与富营养化综合控制技术及工程示范项目 (2008ZX07103-007); 江苏省饮用水水源地环境安全战略评估 (2008022)

收稿日期: 2010-12-27; 修订日期: 2011-08-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lugf@niu.edu.cn



took Tuocheng County as study area, we developed a concept model to describe local hydrogeology and a mathematic model to simulate the movement of groundwater flow. By solving these two models, with additional data of regional industrial planning, pollution characteristics, soil and groundwater monitoring results, and correlations between groundwater pollution in contaminated sites and (1) land use and development or (2) local industrial layout. Through parameters rate set, model predicts, and prediction of water level and the water balance, we try to select a minimum of water damage, but also conducive to environmental protection programs. In the simulations, the four schemes were considered (F-01、F-02、F-03、F-04), by means of analysis of each scheme, model projections indicate that, with the increase of pumping time and groundwater recharge area, program F-01 can reach the maximum balance eventually, this program can be incorporated into government decision-making. Environmental impact of groundwater exploitation includes three aspects: groundwater pollution, geological disasters, and also ecological hydrogeology problem. In addition, in order to effectively protect the groundwater environment of Tuocheng county, protection of water resources, protect the environment, this paper put forward the following Suggestions on the future exploitation of underground water: effective control groundwater exploitation, strengthen groundwater dynamic monitoring work, realize the reasonable development of groundwater, propaganda to save water, and establish water-saving society. This study provides scientific evidence, as well as new scientific method, for government to make decisions in regional development, land utilization, and environmental management.

**Key Words:** contaminated sites; groundwater seepage field; simulation and evaluation; TuoCheng County

随着计算机技术的发展,地下水数值模拟技术也逐渐发展起来,并已成为地下水定量评估的有效工具。目前,国外该领域的研究主要针对数值模拟法的薄弱环节,采用新的数学工具,并开发了大量软件,定性、定量描述地下水系统中大量的不确定性和模糊因素。

Anderson 等<sup>[1]</sup>提出了数值分析的一般工作程序,要建立一个正确且有意义的地下水系统数值模型,应进行以下工作:确定模型目标,建立水文地质概念模型,建立数学模型,模型设计及模型求解,模型校正,校正灵敏度分析,模型验证和预报,预报灵敏度分析,模型设计与模型结果的给出,模型后续检查以及模型的再设计。工作程序的提出为数值模拟提供了依据。在此之后,Wood<sup>[2]</sup>提出了二维地下水运动有限元计算的时间步长条件。Kim 等<sup>[3]</sup>对抽取地下水造成的反演水平衡的影响现象进行数值模拟,阐述了其机理性原因。Mehl 等<sup>[4]</sup>提出的二维局部网格细分法有限差分地下水模型,提供了新的插值和错误分析的方法,由此,数值模型模拟结果的可靠性得到了提高。

目前应用最广泛的地下水模拟软件是 MODFLOW。MODFLOW 是美国地质调查局(USGS)研制、专门用于孔隙介质中三维有限差分地下水流数值模拟的软件,它应用了应力期概念,求解方法多样化<sup>[5]</sup>。

我国于 1973 年开始地下水数值模拟方面的研究,取得了一些理论和应用成果。肖树铁、谢春红、孙钠正、陈明佑、杨天行、张蔚臻、薛禹群<sup>[6-7]</sup>、陈崇希<sup>[8]</sup>为此做出了重要贡献。近年来在国际权威刊物《Water Resources Research》《Journal of Hydrology》《Advances in Water Resources》和《Ground Water》多有中国的学术论文。陈家军等<sup>[9]</sup>指出在进行区域地下水位估值时采用线性漂移的泛克立格法可以取得很好的效果。王玮<sup>[10]</sup>提出了用人工查点法、半自动查点法、数字化地形图提取法等获取数字高程模型(DEM)的方法,并给出了通过数字高程模型计算节点地面标高的方法。武强等<sup>[11]</sup>通过对地下水系统数值模拟的研究分析,抽象出空间类层次结构,并提出了基于属性关系的宏观拓扑结构和基于同构或异构几何模型关系的微观拓扑结构,用三维空间拾取技术提供了友好的人机交互环境。张明江等<sup>[12]</sup>采用“渗流-管流耦合模型”、“入渗滞后补给法”和“参数迭代法”提高了模型的仿真性及对地下水资源评价的精度。张祥伟等<sup>[13]</sup>根据地质统计、逆问题理论和地下水运动理论提出了大区域地下水系统数值模拟的理论和方法。魏连伟等<sup>[14]</sup>基于模拟退火算法(SA)这一全局优化技术,耦合地下水系统数值模拟的有限元模型,给出水文地质参数的反演方法。

与此同时,国内在地下水数值模拟方面,将模拟软件和地理信息系统结合,在地下水研究方面取得了很好

的成效。陈锁忠等<sup>[15]</sup>以 GIS 为主控模块,选择 GMS 和地面沉降模拟模型系统进行集成分析和设计。杨旭等<sup>[16]</sup>提出了基于 GIS 的“点”、“线”、“面”的模型拟合技术路线,实现了基于 GIS 的地下水系统数值模拟模型的可视化拟合。陈喜等<sup>[17]</sup>揭示了独特砂丘地形和土壤特性对地下水补排量的影响,利用地下水系统数值模拟模型 MODFLOW 和非饱和带水平衡模型对处于半干旱半湿润砂丘地区的地下水位进行了模拟。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

柘城县位于河南省东部,商丘地区西南部,地处豫东平原。整个产业集聚区在空间上分为两个部分,分别位于县城总体规划范围内的西部和北部。规划用地面积为 14.047 km<sup>2</sup>,产业集聚区在土地利用上分为三区:建成区、发展区和控制区。区域空间结构和城市的空间发展结构相吻合,总体规划结构可以概括为:“两片、三心、四轴、四产业小区”。产业集聚区西南片区北侧是机械制造高新技术产业园区,北部片区西侧是农副产品加工产业园区,医药制品加工产业园区位于西部片区南侧,混合产业园区位于北部片区东侧。

县境地质为巨厚的第三、四系地层所覆盖。前新生界基岩埋深大部分地区在 1000—2000m,岩层主要是寒武奥陶系、石炭系、二迭系。新生界包括第三系和第四系。第三系地层下部以红砂岩为主,上部为沉积岩,属河湖相沉积;第四系地层齐全,为松散沉积物,下部以粘性土和粉细砂土为主,上部以砂性土为主,近地表是近代黄河堆积物,具有砂粘相间的地质剖面。

柘城县境内河流主要有涡河、惠济河、蒋河、废黄河、太平沟、余河坡等河道,多年平均总量为 5.06 亿 m<sup>3</sup>。地表水污染严重,流经县境的惠济河、废黄河上游水质均超过 V 类,许多河道已丧失包括水生生物生源、农灌、景观等所有的生态功能。

柘城县区域内地下水属第三、第四水系,孔隙潜水、承压水类型,地表以下 300—400m,划分 3 个含水层即浅层、中层、深层。浅层地下水主要分布在 20—40m 之间,储量丰富、水质良好。中层地下水深度在 60—170m 之间,矿化度为 3g/L 左右。深层地下水深度在 170—400m 之间,矿化度小于 2g/L,水质良好。

浅层地下水资源埋藏深约 40m 左右,矿化度小于 2mg/L,适宜食用和灌溉,是可供开采的主要地下水源,多年平均补给量 1.79 亿 m<sup>3</sup>,允许开采量 1.36 亿 m<sup>3</sup>。慈圣、远襄、牛城、陈青集一带属富水区或中等富水区,占全县总面积的 76%,起台,胡襄、申桥、安平一带属贫水区,占全县总面积的 24%。

柘城县内现有水厂二座,一水厂位于县城惠阳路西段,占地 0.4hm<sup>2</sup>,水源为地下水,5 眼深井,1 眼浅水井,日供水规模 6000t;二水厂位于集聚区内,水源为地下水,有 8 眼深水井,日供水能力 2 万 t。

集聚区内水源地浅层地下水埋藏于 60m 处;中深层地下水埋藏于 60—320m 处;深层地下水埋藏于 320—500m 处。地下水流向为西北往东南,因为二水厂位于产业集聚区内,水源易受污染。

### 1.2 研究区域的水文地质概念模型

研究区位于柘城县县城西北部,北起后李楼,南至大方庄,东至柘城县县城,西至西左楼,东西长 8km,南北宽 6km,面积 48km<sup>2</sup>(图 1)。地下水类型为承压水,属深层地下水,岩性以砂土为主,透水性较大。地下水位动态资料显示,研究区深层地下水与中深层地下水和上部浅层地下水无水力联系,因此,天然状态下,上部含水层和降雨的补给可以忽略,且不考虑边界上的侧向补给,排泄以地下水开采为主。

### 1.3 地下水流运动的数学模型

研究区的地下水流运动可以用二维非稳定承压水流运动方程描述,即:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial H}{\partial y}\right) + R = S\frac{\partial H}{\partial t} & (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \\ H = H_0(x, y) & (\text{当 } t = 0 \text{ 时}) \\ H = H_b(x, y, t) & (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 上}) \\ T_x\frac{\partial H}{\partial x}\cos(n, x) + T_y\frac{\partial H}{\partial y}\cos(n, y) = q_b & (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 上}) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $T$  为导水系数,  $H$  为水头,  $R$  为单位时间、单位面积上垂直方向的水交换量,包括各种入渗补给,潜水蒸

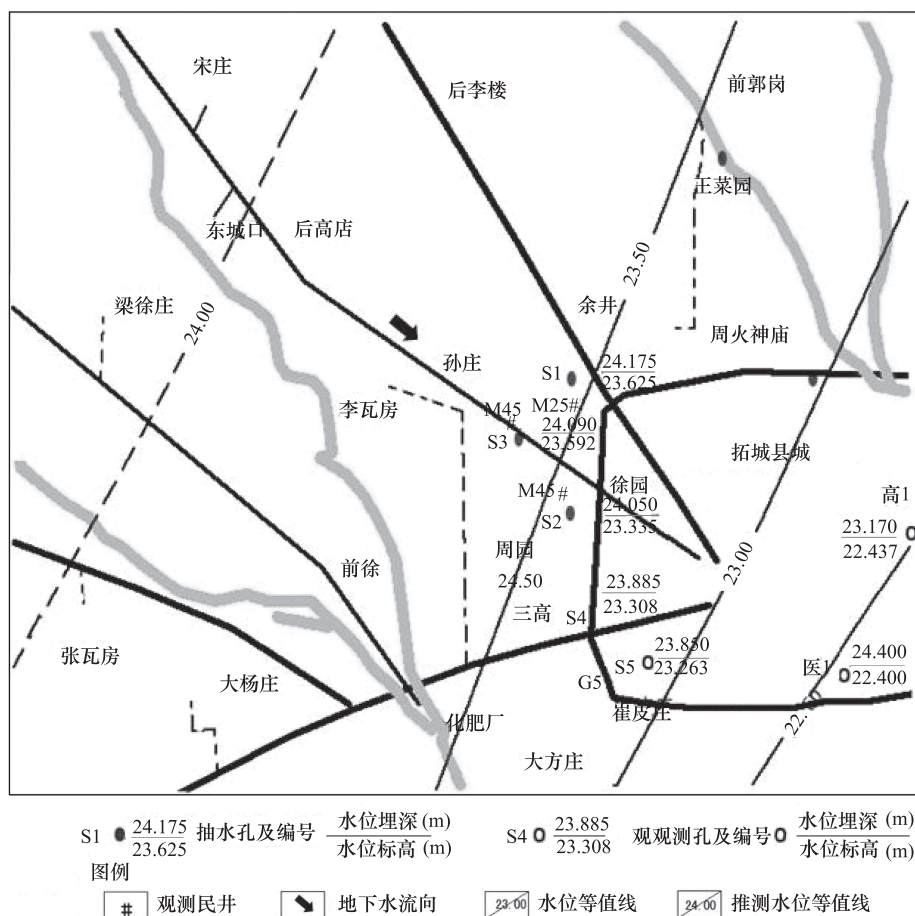


图1 研究区区域图

Fig.1 Study area

发和面平均的水井抽水量,  $S$  为贮水系数, 无量纲;  $t$  为时间,  $H_0$  为初始水头函数,  $H_b$  为已知边界水头,  $q_b$  为已知边界流量,  $n$  为方向矢量,  $x, y$  为坐标变量。

#### 1.4 模型求解

对研究区采用三角形单元离散, 对式(1)采用有限元求解, 得到如下矩阵方程:

$$[G] \{H\} + [B] \left\{ \frac{dH}{dt} \right\} = \{F\} \quad (2)$$

若  $R \neq 0$ , 则式(1)可改写成

$$[G] \{H\} + [B] \left\{ \frac{dH}{dt} \right\} = \{R\} + \{F\} \quad (3)$$

式中,  $[G]$  为导水矩阵,  $[B]$  为贮水矩阵。如果第二类边界节点有  $n_2$  个, 则可建立  $n_2$  个方程, 由内节点方程和边界节点方程组合成  $n = n_1 + n_2$  个方程, 就可解出  $n$  个节点的未知水头。

## 2 拓城县污染场场地地下水模拟评价

### 2.1 监测评价

#### 2.1.1 土壤监测评价

在区域内设4个采样点, 采样点的情况见表1。

每个土壤样品由采样点的表土层(0—20cm)和心土层(20—40cm)两部分混合而成, 分析方法按国家环保局颁发的《环境监测技术规范》和《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)中有关规定。

土壤评价采用《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)三级标准( $pH > 6.5$ ), 各采样点土壤样品监测结表

明,评价区域 4 个土壤样点中重金属含量均未超标。

2.1.2 地下水监测

在区域内选取 3 个水井作为水质采样点。

根据区域地下水流向,饮用水源的深层地下水布 2 个监测井,工业用水的浅层地下水布 3 个监测井,监测井位情况见表 2。

地下水的评价标准采用《地下水质量标准》Ⅲ类水质标准,地下水水质监测结果表明,区域内的地下水水质可达到Ⅲ类指标。

以监测得到的数据为基础,对柘城县污染场地地下水进行参数率定和模型预测,模拟方案,进行水位和水平衡分析,从而得到最优方案。

表 1 土壤监测采用点布设

Table 1 Layout of soil surveying adopts point

采样点 Sampling points	监测因子 Monitoring factor
医药厂厂区内	PH、铬、铜、锌、铅、 镍、砷、汞
超硬材料区内	
纺织工业区内	
非生产区内	

表 2 地下水监测井位布设

Table 2 Layout of groundwater monitoring wells

	监测井位 Monitoring well location	监测因子 Monitoring factor
饮用水源的深层地下水 Deep groundwater of drinking water	集聚区二水厂内取水口 集聚区外东南方向 3km	井深、pH、溶解性总固体、总硬度、氟化物、高锰 酸盐指数、硝酸盐氮、硫酸盐、六价铬、铜、锌、 砷、氯化物
工业用水的浅层地下水 Shallow groundwater of industrial water	集聚区外西北方向 3km	
	集聚区二水厂内取水口	
	集聚区外东南方向 3km	

2.2 参数率定

以正东方向为  $x$  轴,正北方向为  $y$  轴,建立直角坐标系。研究区共剖分节点 2704 个,单元 5282 个,网格剖分图见图 2。考虑到抽水井和勘探井等的布置情况,在水源地周围将网格加密,以提高数值模拟的精度。

初始和边界条件 2003 年 12 月 20 日的地下水位选为研究区的初始水位,由于在数值模拟计算时,需要知道研究区每个网格节点的初始地下水位,因此,可以根据初始等水位线图,采用克里格插值方法,获得网格节点的初始水位。研究区上部边界无补给,下部边界为隔水边界,边界水位为边界节点的初始水位,假定抽水过程中,一直保持不变化,水位降落漏斗的影响边界终止于勘探区的边界。

参数反演结果 研究区共布置了 3 个抽水孔( $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ )和 5 个观测孔( $S_g$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ 和 $S_7$ )(图 3),本研究选取  $S_2$  抽水孔、 $S_g$  中心观测孔和抽水结束时的流场来拟合含水层的导水系数和贮水系数。经过多次调试,获得了研究区的水文地质参数(表 3)。从表 3 中可以看出,在不同的富水区域,导水系数和贮水系数不同,但都在抽水试验参数值的范围内。另外,本研究还考虑了导水系数的各向异性,即在  $x$  和  $y$  方向导水系数不同,而根据抽水试验获得的参数主要为含水层的平均水文地质参数,不能反应含水层的各向异性特征。

为了验证反演的导水系数和贮水系数的合理性,用反演的参数值计算了  $S_2$  抽水孔和  $S_g$  中心观测孔的水位以及抽水结束时的流场分布,并与实测的地下水位进行比较(图 4)。从图 4 中可以看出,对于  $S_g$  中心观测孔,抽水初期计算的水位大于实测水位,抽水后期拟合较好;对于  $S_2$  抽水孔,抽水初期计算的水位大于实测水

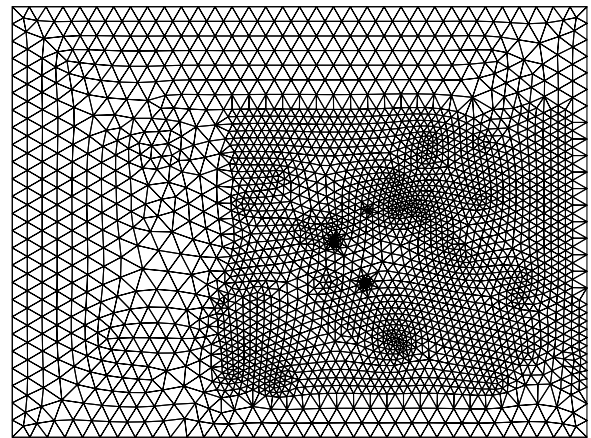


图 2 网格剖面分析图

Fig.2 Grid segmentation



位,抽水后期计算水位小于实测水位,但总体趋势拟合较好,其误差较小,表明反演的参数值合适。参数反演的误差来源主要有:(1)边界的影响。从抽水试验的流场分布来看,群孔抽水已影响到了勘探区(研究区)的边界,其边界的水位与初始水位相比发生了变化,但本研究一直假定边界的水位无变化。(2)补给的影响。本研究没有考虑上部含水层和侧向补给的影响,而实际抽水过程中这两种补给都可能存在。但总体来说,所反演的参数是比较合理的,具有较高的参考价值,能够应用于模型的预测。

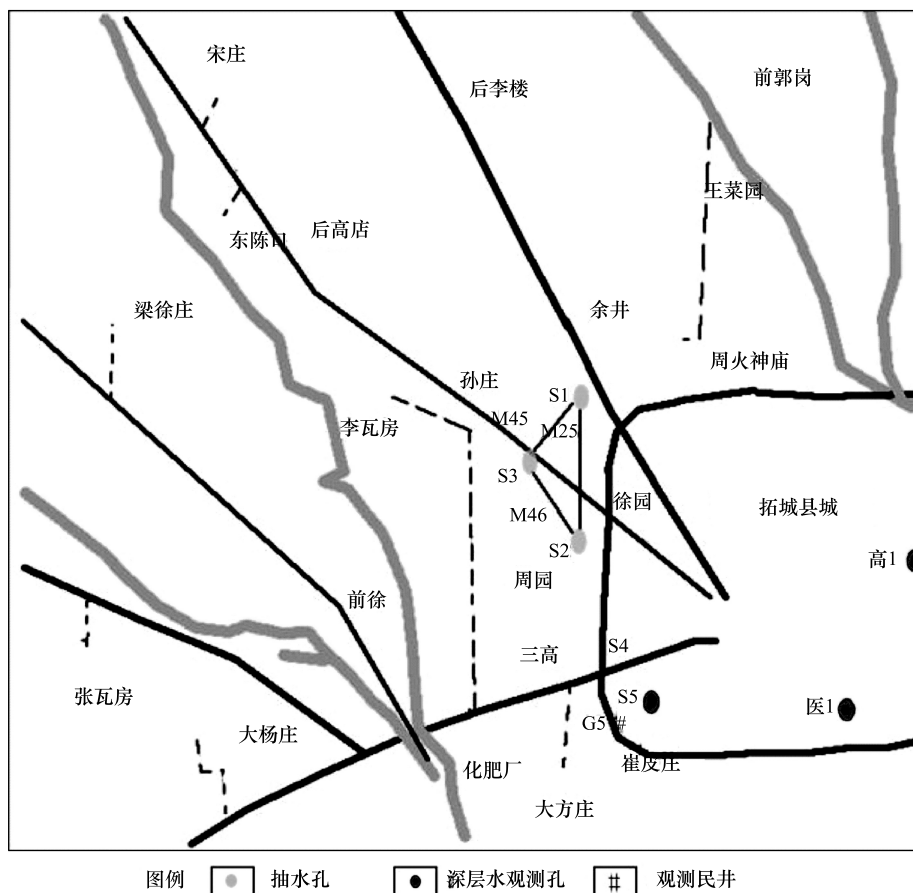


图3 群孔抽水试验钻孔分布图

Fig. 3 Distribution of pumping test hole drilling

表3 研究区水文地质参数反演结果

Table 3 Inversion results of hydro geological parameters in study area

参数分区 Parameter partition	富水性 Rich water	单井出水量 Single well water /( $\text{m}^3/\text{d}$ )	导水系数 Hydraulic conductivity/( $\text{m}^2/\text{d}$ )		贮水系数 Storage coefficient/( $\text{m}^2/\text{d}$ )	
			试验值 Experimental values	反演值 Inversion value	试验值 Experimental values	反演值 Inversion value
I	极丰富段	>3000	868.63—1022.78	$T_x$	$6.15 \times 10^{-4}$ —	$7.2 \times 10^{-4}$
				$T_y$		
II	丰富段	2000—3000		$T_x$	$7.26 \times 10^{-4}$	$6.8 \times 10^{-4}$
				$T_y$		

### 2.3 模型预测

根据反演的导水系数和贮水系数,对研究区在抽水条件下的地下水流场分布和水位降落漏斗的变化区域进行预测。共考虑了4种方案(表4),抽水孔的布置见图5。为了更好的反映水位降落漏斗随时间的变化情况,在研究区以 $S_2$ 抽水孔为中心布置了两条垂直剖面线A-A'和B-B'(图6)。从图中可以看出,A-A'剖面线穿过了 $S_1$ 和 $S_2$ 抽水孔,B-B'剖面线穿过了 $S_1$ 和编号为“6”的抽水孔。



选取 F-01 方案进行分析。

在水源地设计的 12 个开采井(其中 1 个为备用井)中,不考虑编号为“1”的抽水井和其它 6 个抽水井,每井的抽水量为  $1920\text{m}^3/\text{d}$ ,其水位等值线和水位漏斗曲线见图 7 和图 8。从图中可以看出,随着抽水时间的增加,水位降落漏斗不断扩展,抽水第 1 年水位降深最大,  $S_2$  抽水孔水位降深达到了  $10.5\text{m}$ ,第 2 年为  $13.54\text{m}$ ,随着水位漏斗的扩张,地下水补给面积增加,最终达到平衡,水位降落漏斗的扩张速度逐渐减缓。

### 3 结论

由上述对地下水数值模拟的介绍,以及对柘城县污染场场地地下水模拟评价,通过参数率定和模型预测模拟地下水开采方案,预测水位和水平衡,试图选取一种对水资源破坏最小,更利于保护环境的方案。模型预测表明,方案 F-01 中,随着抽水时间的增加,地下水补给面积增加,最终可达到最大平衡。

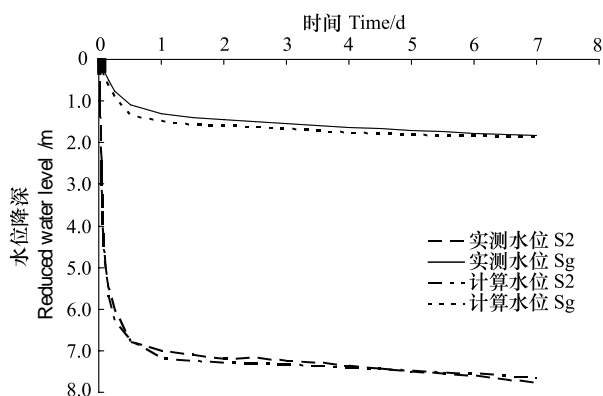


图 4 研究区  $S_2$  抽水孔、 $S_g$  中心观测孔的实测水位和模拟水位对比

Fig. 4 Comparison between measured and simulation water level of  $S_2$  pumping holes,  $S_g$  center observation well level in study area

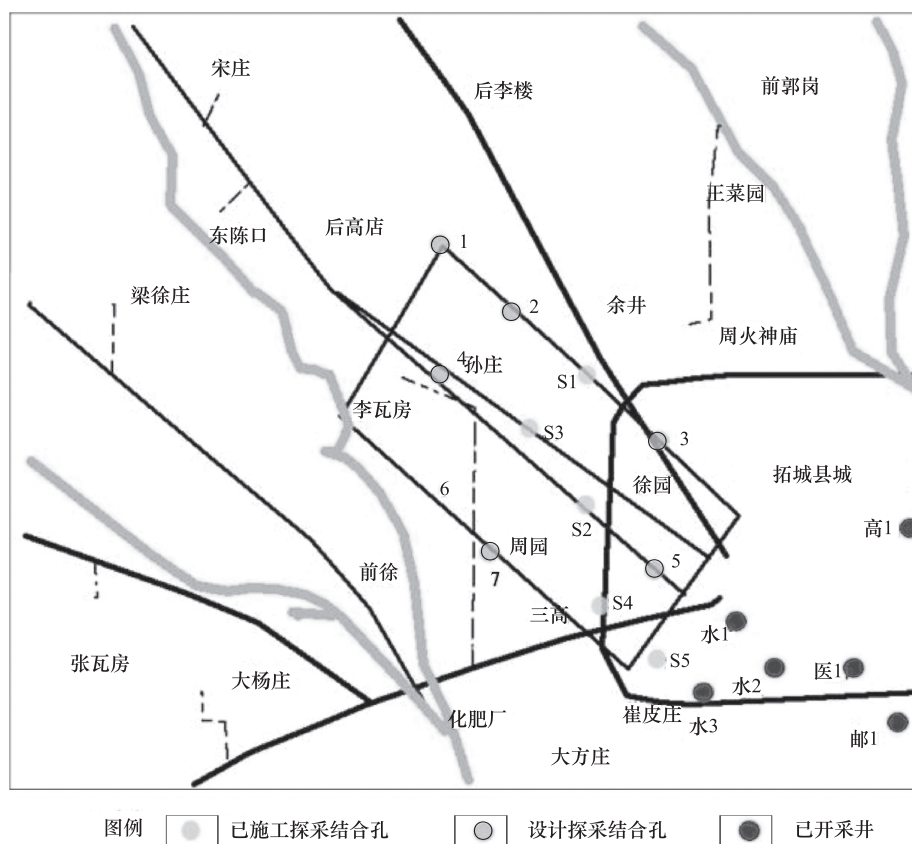


图 5 水源地井位布置图

Fig. 5 Water source wells distribution

地下水开采对围环境影响效应的影响主要包括 3 方面:

(1) 地下水污染,包括人类活动引起的有机物和重金属对地下水的污染,各种污染物在地下水中的运移机制,含水层对污染的敏感性评价指标和分区,以及其监测、评价、预防和修复技术等问题;

表 4 计算方案简表

Table 4 Summary of calculation program

方案 Program	抽水孔(11个) Pumping holes (11)	其它抽水孔(6个) Other pumping holes (6)	合计流量/(m <sup>3</sup> /d) Total traffic
F-01	S <sub>1</sub> 、S <sub>2</sub> 、S <sub>3</sub> 、S <sub>4</sub> 、S <sub>5</sub> 、2、3、4、5、6、7	不考虑	21120
F-02	S <sub>1</sub> 、S <sub>2</sub> 、S <sub>3</sub> 、S <sub>4</sub> 、1、2、3、4、5、6、7	不考虑	21120
F-03	S <sub>1</sub> 、S <sub>2</sub> 、S <sub>3</sub> 、S <sub>4</sub> 、S <sub>5</sub> 、2、3、4、5、6、7	水 <sub>1</sub> 、水 <sub>2</sub> 、水 <sub>3</sub> 、高 <sub>1</sub> 、医 <sub>1</sub> 、邮 <sub>1</sub>	30370
F-04	S <sub>1</sub> 、S <sub>2</sub> 、S <sub>3</sub> 、S <sub>4</sub> 、1、2、3、4、5、6、7	水 <sub>1</sub> 、水 <sub>2</sub> 、水 <sub>3</sub> 、高 <sub>1</sub> 、医 <sub>1</sub> 、邮 <sub>1</sub>	30370

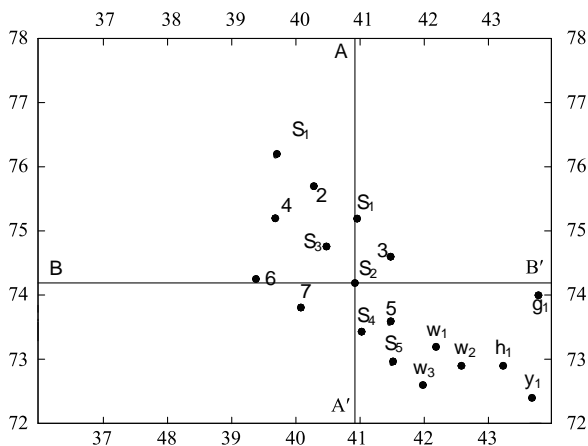


图 6 研究区剖面线位置图

Fig. 6 Section line Location in study area

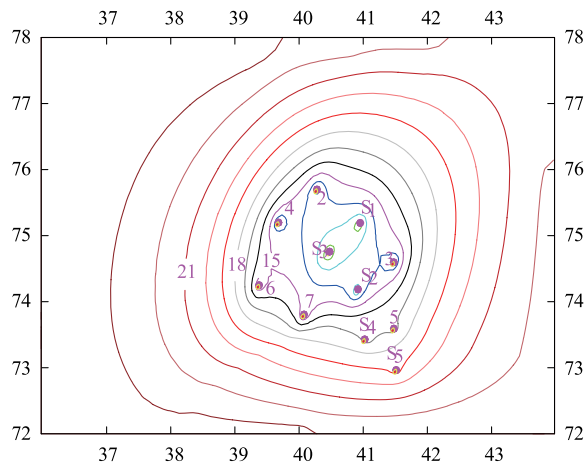


图 7 抽水 5a 后研究区地下水位等值线图

Fig. 7 Groundwater contour in study area 5 years after pumping

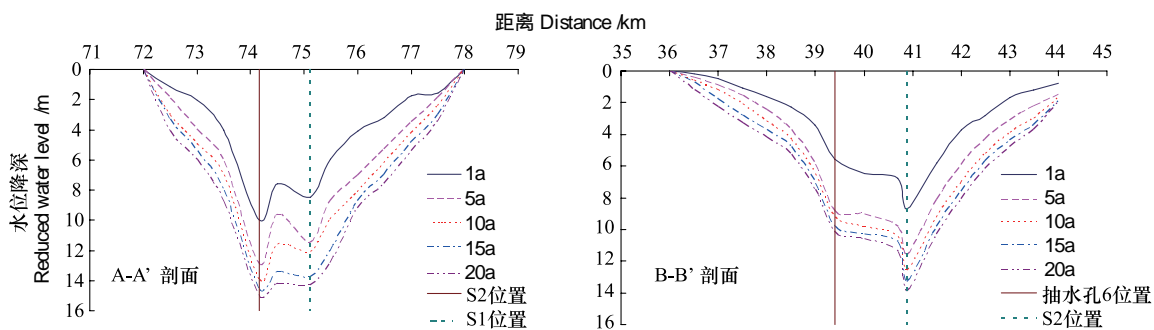


图 8 不同的抽水时间条件下研究区水位降落漏斗趋势图

Fig. 8 Depression cones trend in study area under different pumping time d

(2) 过量抽取地下水或对地下水系统认识管理不善导致的地质灾害, 包括地面沉降、地裂缝、砂漠化等<sup>[18-19]</sup>, 尤其是引起了地面沉降的趋势, 严重的地面沉降, 不仅使大量开采井井管上升、倾斜、错段、取水设备报废, 而且降低了地面高程, 部分防洪设施和水利工程失效, 抵御汛期洪涝灾害能力下降甚至消失, 造成了严重的经济损失。

(3) 生态水文地质学问题, 如河流出口河水被渠系引走, 下游河道断流, 地下水位下降, 引起下游生态环境恶化<sup>[20]</sup>。

由于不合理的开发利用地下水资源, 拓城县的地下水受到了严重的污染, 引起的环境负效应主要有 3 个方面: 一是由于地下水的过量开采, 地下水位持续下降, 地下水储存量不断减少, 城市饮水安全保障受到威胁, 同时引起了水源周围建筑物的开裂; 二是随着河道引水量的增加和灌区渠道防渗及节水灌溉措施的实施,

水源地的涵养及补给状况日趋恶化;三是,随着地下水的开发,水质存在劣变的趋势,工业废水、生活污水及农药化肥等污染物影响地下水水质安全。

为了有效的保护柘城县的地下水环境,保护水资源,防止环境的进一步恶化,对今后地下水的开采提出以下几点建议:有效控制地下水的开采;加强地下水动态监测工作;合理调度水资源利用模式,实现地下水的合理开发;宣传节约用水,建立节水型社会。

致谢:美国 Tetra Tech, Inc. K. Betty Li 润色英文摘要,特此致谢。

#### References:

- [ 1 ] Anderson M P, Woessner W W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Adjective Transport. New York: Academic Press, Inc, 1992: 145-152.
- [ 2 ] Wood W L. A note on how to avoid spurious oscillation in the finite-element solution of the unsaturated flow equation. Journal of Hydrology, 1996, 176(1/4): 205-218.
- [ 3 ] Kim J M, Parizek R R. Numerical simulation of the no-ordbergum effect resulting from groundwater pumping in a layered aquifer system. Journal of Hydrology, 1997: 231-243.
- [ 4 ] Mehl S, Hill M C. Development and evaluation of a local grid refinement method for block-centered finite-difference groundwater models using shared nodes. Advances in Water Resources, 2002, 25(5): 497-511.
- [ 5 ] Hunt R J. Ground water modeling applications using the analytic element method. Ground Water, 2006, 44(1): 5-15.
- [ 6 ] Xue Y Q, Ye S J, Xie C H, Zhang Y. Application of multi-scale finite element method to groundwater simulation. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (7): 7-13.
- [ 7 ] Xue Y Q, Wu J C. Problems of groundwater modeling China facing 21st century. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, (5): 3-5.
- [ 8 ] Chen C X. Formation mechanism of water level and its determination method in conventional observation wells for three-dimensional groundwater flow. Earth Science-China University of Geosciences, 2003, 28(5): 483-491.
- [ 9 ] Cheng J J, Wang H J, Zhang Z, Wang J S. Geostatistics applied in the valuation of ground water. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, 25(6): 7-10, 26-26.
- [ 10 ] Wang W. The acquisition method of the nodes' elevation in hydrogeological numerical modeling. Journal of Chang'an University: Earth Science Edition, 2003, 25(2): 41-45.
- [ 11 ] Wu Q, Xu H. Visual environment in 3D for groundwater modeling. Computer Engineering, 2003, 29(6): 69-70.
- [ 12 ] Zhang M J, Men G F, Chen C X. Three-dimensional digital simulating of groundwater flow of Weigan River Drainage Area. Xinjiang Geology, 2004, 22(3): 238-243.
- [ 13 ] Zhang X W, Takeuchi K. Methodology for modeling of groundwater flow in large area. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (6): 7-13.
- [ 14 ] Wei L W, Shao J L, Zhang J L, Cui Y L. Application of simulated annealing algorithm to hydrogeological parameter inversion. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(4): 612-616.
- [ 15 ] Chen S Z, Ma Q C. GIS and groundwater exploitation and surface subsidence modeling system integrated analysis of Suzhou Wuxi Changzhou Area. Hydro Geology and Engineering Geology, 1999, (5): 26-29.
- [ 16 ] Yang X, Yang S C, Huang J Z. Method of groundwater numerical model simulation based on GIS. Computer Engineering, 2004, 30(11): 50-51.
- [ 17 ] Chen X, Chen X H. Numerical modeling of groundwater flow and analysis of water budget in Nebraska Sand Hills, USA. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 94-99.
- [ 18 ] Ding H W, Zhang J. The problem of environment caused by groundwater level continuous decline in the inland basins of arid area, Northwest China-an example in middle reaches of Heihe river basin. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 29(3): 71-75.
- [ 19 ] Ma J Z, Gao Q Z. Water resources system and eco-environmental problems in the inland river basin of arid northwest China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1997, 11(4): 15-21.
- [ 20 ] Karr J R. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management. Ecological Applications, 1991, 1(1): 66-84.

#### 参考文献:

- [ 6 ] 薛禹群, 叶淑君, 谢春红, 张云. 多尺度有限元法在地下水模拟中的应用. 水利学报, 2004, (7): 7-13.

- [ 7 ] 薛禹群, 吴吉春. 面临 21 世纪的中国地下水模拟问题. 水文地质工程地质, 1999, (5): 3-5.
- [ 8 ] 陈崇希. 三维地下水流中常规观测孔水位的形成机理及确定方法. 地球科学-中国地质大学学报, 2003, 28(5): 483-491.
- [ 9 ] 陈家军, 王红旗, 张征, 王金生. 地质统计学方法在地下水水位估值中应用. 水文地质工程地质, 1998, 25(6): 7-10, 26-26.
- [ 10 ] 王玮. 水文地质数值模拟中节点地面标高的获取方法. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(2): 41-45.
- [ 11 ] 武强, 徐华. 地下水模拟的可视化设计环境. 计算机工程, 2003, 29(6): 69-70.
- [ 12 ] 张明江, 门国发, 陈崇希. 渭干河流域三维地下水流数值模拟. 新疆地质, 2004, 22(3): 238-243.
- [ 13 ] 张祥伟, 竹内邦良. 大区域地下水模拟的理论和方法. 水利学报, 2004, (6): 7-13.
- [ 14 ] 魏连伟, 邵景力, 张建立, 崔亚莉. 模拟退火算法反演水文地质参数算例研究. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(4): 612-616.
- [ 15 ] 陈锁忠, 马千程. 苏锡常地区 GIS 与地下水开采及地面沉降模型系统集成分析. 水文地质工程地质, 1999, (5): 26-29.
- [ 16 ] 杨旭, 杨树才, 黄家柱. 基于 GIS 的地下水数值模拟模型拟合方法. 计算机工程, 2004, 30(11): 50-51.
- [ 17 ] 陈喜, 陈洵洪. 美国 Sand Hills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析. 水科学进展, 2004, 15(1): 94-99.
- [ 18 ] 丁宏伟, 张举. 干旱区内陆平原地下水持续下降及引起的环境问题——以河西走廊黑河流域中游地区为例. 水文地质工程地质, 2002, 29(3): 71-75.
- [ 19 ] 马金珠, 高前兆. 西北干旱区内陆河流域水资源系统与生态环境问题. 干旱区资源与环境, 1997, 11(4): 15-21.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat .....	MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)
Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique .....	SUN Caizhi, YANG Lei (1016)
Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing .....	HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)
The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy .....	GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)
Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes .....	SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)
Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors .....	TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)
Eco-hydrological effects of Qinghai spruce ( <i>Picea crassifolia</i> ) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains .....	TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)
Response of tree-ring width of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> to climate change in Hulunbuir sand land, China .....	SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)
Analysis of a dust case using lidar in Shanghai .....	MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)
Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses .....	TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)
Phenotypic traits of both larvae and juvenile <i>Crasstrea hongkongensis</i> and <i>C. gigas</i> .....	ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)
Inter-specific competition between <i>Prorocentrum donghaiense</i> and <i>Skeletonema costatum</i> .....	LI Hui, WANG Jiangtao (1115)
Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species .....	WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)
On the ecological amplitude of nitrate of <i>Alexandrium tamarense</i> at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures .....	WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)
Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary <i>Pinus tabulaeformis</i> on precipitation in the Qinling Mountains, China .....	CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)
The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern .....	TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguai (1151)
Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant <i>Tetraena mongolica</i> Maxim. and the closely related <i>Zygophyllum xanthoxylon</i> (Bunge) Maxim. ....	SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)
Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress .....	SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)
The effects of the addition of <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon ( <i>Citrullus lanatus</i> ) site in China .....	XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)
Suitable habitat for the <i>Achnatherum splendens</i> community in typical steppe region of Inner Mongolia .....	ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)
Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district .....	GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)
Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau .....	LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)
Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt .....	ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)
The evaluation system of strength of winteriness in wheat .....	WANG Peng, ZHANG Chungqing, CHEN Huabang, et al (1230)
A comparison of summer habitats selected by sympatric <i>Apodemus chevrieri</i> and <i>Apodemus draco</i> in Tiangjiahe Nature Reserve, China .....	LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)
Life tables for experimental populations of <i>Frankliniella occidentalis</i> on 6 vegetable host plants .....	CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)
Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach .....	ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)
Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing .....	XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)
Seasonal characteristics of CO <sub>2</sub> fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China .....	SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)
Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County .....	WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)
<b>Review and Monograph</b>	
Recent advances in wetland degradation research .....	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)
A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis .....	YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)
<b>Discussion</b>	
The diversity of the radio-resistant bacteria <i>Deinococcus radiodurans</i> .....	TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)
Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of <i>Caragana korshinskii</i> .....	YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)
<b>Scientific Note</b>	
Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain .....	LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)
Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild <i>Cryptotaenia japonica</i> .....	YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 32 卷 第 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 32 No. 4 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元