



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.027

陈江, 陈宗宇, 张翼龙, 等. 资源环境约束下的后套平原地下水可持续性综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 156-161. CHEN Jiang, CHEN Zongyu, ZHANG Yilong, et al. Comprehensive assessment on groundwater sustainability under the constraint of resources and environment in Houtao plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 156-161. (in Chinese)

资源环境约束下的后套平原地下水可持续性综合评价

陈江, 陈宗宇, 张翼龙, 聂振龙

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 后套平原地下水资源分布不均, 人口和经济集中于城镇, 地表水漫灌导致了土壤盐渍化, 对地区社会经济可持续发展造成了严重影响。因此, 评价地下水可持续性已经成为该地区发展规划首先要解决的问题。地下水可持续性可以直观有效地反映一个地区地下水利用程度, 对地下水资源管理具有重要参考价值。以后套平原地区地下水开采面临的问题为出发点来选择评价指标, 利用综合评价方法计算了评价单元上的地下水可持续性水平。结果显示, 黄河南岸和东北部地区可持续性最差, 中部北部地区可持续较好, 地下水资源的开发潜力较大的行政区位于杭锦后旗和五原县北部, 而磴口县和乌拉特前旗大部分地区地下水可持续性差, 荒漠化严重, 不宜再继续发展耗水产业。

关键词: 地下水; 可持续性; 后套平原; 评价; 层次分析; 信息熵; 指标

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0156-06

Comprehensive assessment on groundwater sustainability under the constraint of resources and environment in Houtao plain

CHEN Jiang, CHEN Zongyu, ZHANG Yilong, NIE Zhenlong

(The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CA GS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Distribution of groundwater resources in Houtao plain is uneven with concentrated population and economy in the city and soil salinization caused by surface water flooding, which affected the social and economic sustainable development significantly. Therefore, a comprehensive evaluation of groundwater sustainability has become the prior task for regional planning. Groundwater sustainability reflects the groundwater utilization status directly, and is important for groundwater management. In this paper, the evaluation indexes were selected based on the problems caused by groundwater exploitation in Houtao plain, and the sustainability level of groundwater was evaluated using the comprehensive evaluation method. The results showed that groundwater sustainability varies in different areas. The areas with the worst groundwater sustainability are located in the south bank of the Yellow River and the northeast of the study area, and the areas with relatively better groundwater sustainability are located in the north and middle of the study area. The areas with good groundwater exploration potential are located in the north of Hangjinhouqi and Wuyuan County, whereas groundwater sustainability in most areas of Dengkou and Wulataqianqi County is low with serious desertification; therefore, water consumption industry should not to be developed in that area.

Key words: groundwater; sustainability; Houtao plain; assessment; analytic hierarchy process (AHP); information entropy; index

地下水可持续性表述的是地下水既要维持当代需求, 也不能对后代的需求造成不可恢复的影响, 需要人口经济的合理增长与地下水资源协调发展^[1-2]。可持续性评价涉及评价指标和评价方法两个方

收稿日期: 2015-11-23 修回日期: 2016-01-16 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1126.012.html>
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010913010)
Fund: Geological Survey Project of China Geological Survey(1212010913010)
作者简介: 陈江(1976-), 男, 河北邢台人, 助理研究员, 博士, 主要从事水文地质方面研究。E-mail: shuihuansuo@126.com

面。当前在评价指标的选择上有多种方法,学者们多根据自身的考虑加以选择^[35],缺乏选择的统一标准,因此在一个指标框架下进行分析选择就显得十分重要。在评价方法上,研究的重点是评价指标对地下水可持续性的影响程度,包括指标权重和评价结果的阈值选择。但由于权重计算上的多样性,在研究结果的认同上仍存在疑问。本文在指标选择上依据目前公认的 DPSIR 分类方法筛选指标,综合层次分析法和信息熵法两种指标权重计算法的优点来确定指标权重,将使地下水可持续性评价手段更为完善。

1 研究区介绍

后套平原地貌单元包括山前冲洪积平原、冲湖积平原和黄河南岸平原,其中冲洪积平原是后套平原地貌的主体。根据含水介质与赋存条件,地下水类型包括松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水和基岩裂隙水三种。冲洪积层潜水是后套平原分布最广、厚度最大的主要供水含水层,含水层分布规律受构造和沉积环境的影响,自东向西,由南向北有明显的分带规律。

后套平原地处干旱、半干旱气候带的引黄灌区(图 1),地下水的补给主要靠引黄灌水、大气降水的入渗补给和山区地下水径流补给,以垂直蒸发的方式排泄。在北部山前扇裙地带地形坡度大,含水层颗粒粗径流条件好,地下水由北向南流,进入套区后地形平缓,含水层颗粒细,水力坡度小,地下径流条件不佳,地下水运动以垂直交替为主,靠垂直入渗补给。

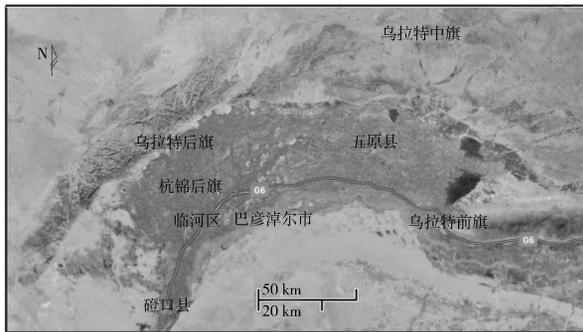


图 1 后套平原位置

Fig. 1 Location of Houtao plain

后套平原地下水开采以生活用水为主,农业用水多引自黄河水。地下水资源开发利用方面存在的突出问题包括:只注重地表水灌溉,忽视了地下水与地表水的综合利用使地下水位抬高,导致了大面积土壤盐渍化;高氟、高砷水分布广,对人体危害大,并制约当地经济发展;由于黄河流域水资源供需矛盾加剧,国家对黄河流域水资源实行全流域统一管理,河套灌区未来引黄水量将在现有基础上减少 20%,灌

区用水矛盾将更加突出;灌区地下水位浅,有限的地下水日益受到重视,地下水合理开发将对灌区水资源可持续利用产生重要影响^[7-8]。

2 地下水可持续评价

2.1 指标的选择

本文中,地下水可持续性评价指标体系的建立遵从 DPSIR (Driving force Pressure State Impact Response) 框架,即从驱动、压力、状态、影响、响应五个方面来评价可持续性。DPSIR 反映的过程可以理解为:人类活动对地下水造成了影响,对环境状态产生了压力,人类意识到问题后采取措施做出回应,恢复环境状态,形成完整的驱动、压力、响应的循环。由此,指标的选择依据 DPSIR 理论框架分别从五个方面选择相应的指标(图 2)^[9]。

(1) 驱动。驱动力指标反映的是社会经济活动的发展潜在的造成资源环境发生改变,包括的指标类型有人口、经济、土地利用方式等,具体包括的指标有:国内生产总值、单位面积人口、经济增长速度、人口增长速度、物价指数、消费水平等。

(2) 压力。在压力方面,指地下水需求压力和生态环境压力,即社会、环境对水资源的依赖,是对水资源系统的发展变化产生作用的“外力”。和驱动力不同的是,压力对水资源系统的发展变化产生作用的方式是“显式”的,而驱动力是“隐式”的。包括的指标有:工农业需水、城乡生活需水、生态环境需水、地下水单位面积开采量、单位面积需水量,社会发展综合需水、废水排放、地下水灌溉比例、地下水资源占全部水资源比例等。

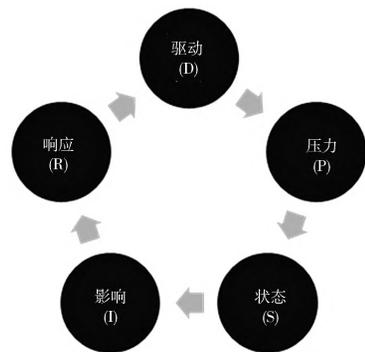


图 2 DPSIR 指标框架

Fig. 2 Framework of DPSIR indexes

(3) 状态。指地下水系统在外界压力作用下所处的状态指标,是表征地下水资源满足人类、环境需求的能力。主要指标包括:地下水开采程度、地下水资源量、地下水可采资源量、地下水重复利用量、降雨量、富水程度、防污性等。

(4) 影响。指在驱动力、压力的作用下,地下水系统受到影响后所产生的外在表现。可选择的指标包括:地下水位变化速率、盐渍化、疏干状态、浅层地下水超采、深层地下水超采、水质变化及相关指标、植被覆盖变化指标、生物多样性指标、生态环境完整性指标等。

(5) 响应。指对地下水资源的开发利用采取的管理措施,包括涵养地下水水平、保护政策的制订程度等。

2.2 评价方法

综合评价方法是最为直接的地下水可持续性评价方法,可以采用单因子评价或多因子评价,将评价指标标准化后由权重确定每个指标的重要程度,建立综合评价模型。一般评价的综合表达式为

$$D_i = \sum W_i \times x_i \quad (1)$$

式中: D_i 为综合评价的结果; W_i 为第 i 个指标的权重; x_i 为第 i 个指标的标准化数值。

该方法的核心是指标权重的计算。综合评价法可以反映区域的地下水可持续水平,但需要对评价指标做先期处理。

在地下水可持续性综合评价中,需要对所有指标做综合加权分析。为了便于不同指标在综合中具有同等的数值区间,必须对原始指标值进行归一化处理。

本次研究的归一化方法采用修正极值的标准化公式^[10]。经过分析众多标准化方法,确定该公式对原有数据的规律性损失最小,利用该公式将原始数据统一归一化到 (0, 1) 区间上,计算中需要求解 a, b 两个系数,并且对于不同的指标不同的数据组合 a, b 值都需要重新计算,具体公式如下:

$$x'_{ij} = \frac{\alpha x_{ij} - x_{\min}^j}{x_{\max}^j - x_{\min}^j + \beta} \quad (2)$$

式中: α 和 β 是规格化数据的上下限限定因子,本文取 $\alpha = 0.99, \beta = 0.01$, 即把数据统一标准化在 0.01 ~ 0.99 之间; x_{\max}^j 和 x_{\min}^j 分别为第 j 个指标的最大和最小值。

2.3 层次分析法确定评价指标权重

为了确定各指标的重要程度,按地下水可持续性评价的预期目的,将指标层级划分 3 级,第 1 级为总目标层;为实现目标层的评价结果,第 2 级分三个层级评价:自然资源分类、社会需求分类、环境制约分类;第 3 级为具体的评价指标层级(图 3)。

层次分析法中两两指标的权重大小对比可由德尔菲法确定,或者由研究者根据研究区实际的情况来确定,在两两指标、每层次权重确定后,即可得出所有指标相对与总目标而言的重要性程度排序。具体步骤如下。

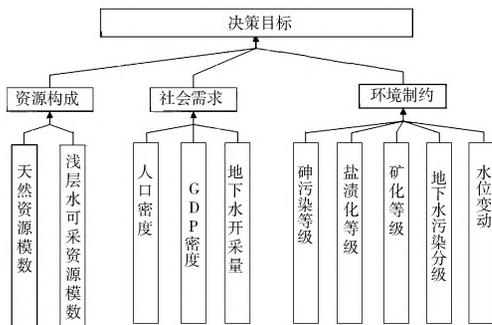


图 3 后套平原评价指标层次分析结构

Fig. 3 AHP structure of evaluation indexes in Houtao plain

(1) 分析评价体系中各指标之间的关系,重点分析指标对于研究区规划决策的重要程度,建立指标框架的递阶层次结构。

(2) 对同一层次各指标关于所归属层次准则的重要性进行两两比较,构造两两判断矩阵,并进行一致性检验。构造两两比较判断矩阵,比较两个指标哪一个更重要,对重要程度赋予标度值。一般使用 1~9 标度法构造间接判断矩阵(见表 1),两两比较判断的次数为 $n(n+1)/2$ 。

表 1 层次分析法指标标度
Tab. 1 Index scale of AHP

标度	含义
1	两指标对比,具有同等重要性
3	两指标对比,前者比后者稍重要
5	两指标对比,前者比后者比较重要
7	两指标对比,前者比后者十分重要
9	两指标对比,前者比后者绝对重要
2, 4, 6, 8	两者中间值
倒数	后者比前者重要

(3) 由判断矩阵计算被比较指标对于该准则的相对权重。求出判断矩阵 A 的最大特征值的 λ_{\max} 相应特征向量 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)T$, 将 u 归一化得出标准化特征向量 W , 即为单一准则下指标的相对排序权重向量。

(4) 计算各层次指标对系统目标的合成权重,并进行排序。

层次分析法的最终目标是求解方案层各指标关于目标层的排序权重。因此,需从上而下逐层进行各层指标对目标的合成权重的计算。

假定第 $k-1$ 层 n_{k-1} 个指标相对目标的权重为 $W(k-1) = (W_1(k-1), W_2(k-1), \dots, W_{n_{k-1}}(k-1))^T$, 设第 k 层的 n_k 个指标相对于第 $k-1$ 层第 j 个指标 ($j = 1, 2, \dots, n_{k-1}$) 的准则排序权重向量为 $u_j(k) = (u_{1j}(k), u_{2j}(k), \dots, u_{n_j}(k))^T, (j = 1, 2, \dots, n_{k-1})$ 。

AHP 方法得到的是各个指标相对于总目标各决策方案的优先次序权重,从而利用指标综合评价法对总目标做出评价。

2.4 信息熵法确定权重

不同于层次分析法,信息熵法权重的确定必须先要将指标数据标准化,利用数据信息的无序程度来反映指标的重要程度,因此需要具体的数据计算才能确定权重,但是在计算中要确保不能有负值参与计算,因此数据必须预处理到统一区间上^[11-12]。

(1)对每个指标的每个数据计算比重 P_{ij} , 公式为

$$P_{ij} = X_{ij} / \sum X_{ij} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为第*i*个指标第*j*个空间位置上的指标值。

(2)计算第*i*项指标的熵值 e_i , 公式为如下:

$$e_i = - (1/\ln m) \sum P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (4)$$

式中: m 为第*i*个指标的总数。

(3)第*i*个指标的差异性系数 g_i 。定义为熵值越大,差异性越小,因此 $g_i = 1 - e_i$ 。

(4)计算第*i*个指标的权重 a_i , 公式为

$$a_i = g_i / \sum g_i \quad (5)$$

3 评价结果及分析

由于各评价指标的空间分布差异较大,如资源类指标在行政单元上变化显著,为了更加准确的反映不同的地区的条件,对研究区进行了网格剖分,按5 km的间隔对整个河套研究区进行分区,分区后将各指标和单元格进行空间分析,获得每个指标在评价单元格上的值。

指标数据的来源:一是来源于本次调查,二是来源于统计数据及前人研究结果。

3.1 指标数据获取及权重计算

根据研究面对的地下水问题,本次评价后套平原的地下水可持续性考虑的指标如下。

资源方面:地下水天然资源模数、浅层水可采资源模数,反映资源供给水平。

社会需求:人口密度、GDP密度、地下水占开采比例,反映当地对地下水资源的需求程度。

环境制约方面:砷污染等级、土壤盐渍化等级、水质等级、矿化度等级、地下水位变动速率,反映地下水对环境的影响。

本次评价确定的指标数据均来自最新的调查结果,其中水资源量、可采资源量、水污染评价、水位降深、开采模数数据来自本项目的调查成果,人口数据来自2010年第六次人口普查,GDP数据来自2009年统计年鉴数据^[13-15]。

获取数据的方法是将调查数据与地下水可持续性评价分区做空间区相交分析,GIS软件会把调查数据的结果作为属性赋值在评价单元上。在GIS

软件中利用文件属性读取方法按空间位置读取出来形成数据表,作为最原始的资料。以水文地质计算块段作为评价单元统计数据时,统计每个评价区上每个指标的覆盖面积或单位面积上的值;以剖分单元格统计指标值时,将调查结果叠加在每个单元格上,精细度相对于水文地质计算块段更高,对地下水可持续性的划分更具体。

由此确定每个指标的权重值,见表2。

表2 后套平原评价指标权重计算结果

Tab.2 Results of evaluation index weight of Houtao plain

指标	层次分析法	信息熵法	均值
天然资源模数	0.066 7	0.100 4	0.083 55
浅层水可采资源模数	0.266 7	0.100 4	0.183 55
人口密度	0.100 0	0.097 9	0.098 95
GDP 密度	0.033 3	0.098 9	0.066 10
地下水开采量	0.200 0	0.100 2	0.150 10
砷污染等级	0.041 3	0.100 3	0.070 80
盐渍化等级	0.041 3	0.100 5	0.070 90
矿化度等级	0.041 3	0.100 3	0.070 80
地下水污染分级	0.078 0	0.100 5	0.089 25
水位变动	0.131 3	0.100 5	0.115 90

指标最终权重结果取层次分析法和信息熵法的均值,克服了前者偏于主观和后者过于依赖数据规律的缺陷,对权重的计算更为合理。

3.2 可持续性评价

由上述计算的权重值,利用综合评价方法计算各区县地下水可持续性评价,计算的评分值见表3,评分值越大可持续性越优。从县乡分区评价结果中分析,可持续性相对较差的地区为余太盆地、中和西镇、巴拉贡镇,制约因素主要为沙漠化严重和地下水开采比例较大。可持续较好地区为呼和本独镇、磴口县,主要制约地下水可持续性的条件为环境制约类因素,如沙漠化和盐渍化。其中盐渍化与灌溉方式有直接关系,仍有改善条件的具体空间。

表3 行政区评价结果

Tab.3 Assessment results of the administrative region

行政区	可持续性评价值	主要制约因素
巴拉贡镇	0.57	地下水开采量
巴彦淖尔市	0.61	人口密度
磴口县	0.62	沙漠化
杭锦淖尔乡	0.55	地下水开采量
呼和本独镇	0.63	地下水开采量
吉日嘎朗图镇	0.62	盐渍化
乌拉特前旗	0.60	浅层水可采资源
乌拉特前旗 三湖河	0.62	浅层水可采资源
乌拉特前旗 余太盆地	0.56	沙漠化
五原县	0.60	砷污染
杭锦后旗	0.60	盐渍化

由于受各县乡资源类、环境制约类评价指标与行政类指标的空间精度差异影响,按县乡进行指标

评价的分区精度较低, 指标值平均化导致评价结果相对集中。为此, 对各指标进行了网格化剖分, 对每个网格分别评价。评价结果见图 4。

根据剖分网格评价的结果, 把评价单元分为十个等级, 评分值越高可持续性水平越高(由红色到绿色)。在此基础上, 为了突出重点, 将严重荒漠化地区、年水位下降在 5 m 以上、浅层水重污染及极重污染的地区确定为不可持续区, 以此划定不可持续综合评价价值, 剩余部分按均值分为 2 个等级, 由此, 将研究区地下水可持续性分为 3 个大的等级: 可持续性强、可持续性弱、不可持续。

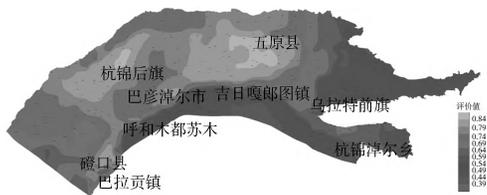


图 4 后套平原地下水可持续性综合评价分区
Fig. 4 Comprehensive assessment zoning of groundwater sustainability in Houtao plain

后套平原的可持续性等级与资源量关系密切, 在层次分析法确定权重中, 可采资源模数、开采模数权重较高, 反映了当前水资源中最为急迫的水量因素; 由于人口密度低, 砷污染在该地区的影响较小, 在层次分析法评价权重中给的较低。

后套平原地下水可持续性强的地区分布于后套平原腹地, 五原县城- 陕坝镇- 磴口县城一线的农业区, 该地区地下水资源可采资源量高于周边地区, 而开采模数低于北部山前区和东部余太盆地, 人口密度小, 农业用水中引黄灌溉占主要份额, 资源条件较好, 社会需求处于中等水平, 地下水开发利用潜力较大。制约因素是该地区水质较差, 砷污染严重, 地下水矿化度略高。

可持续性弱的地区分布于磴口县西北部及西南部、巴彦淖尔市西北、乌拉特前旗中北部及东部地区, 该地区地下水资源状况一般, 局部水质差、砷污染严重。磴口县西部地下水资源量少、局部地表沙漠化和重度土壤盐渍化, 同时人口稀少, 农业需水主要来自黄河水, 对地下水需求有限, 环境因素是该地区的主要问题。因此, 该地区的地下水利用要以控制沙漠化倾向, 降低长期的大水漫灌和渠系水渗漏引起的土壤次生盐渍化为前提, 以环境约束为主要控制因素。乌拉特前旗北部浅层水水质较差、矿化度高, 局部地区矿化度达到 10 g/L 以上, 无法利用, 土壤存在盐渍化趋势; 水量上, 该地区浅层水可采量并不丰富, 种植业主要依赖黄河水灌溉, 地下水开采

有限, 作用并不突出, 因此地下水的可持续利用需要解决的主要问题是水质改善。乌拉特前旗东部是农业发达区, 人口密度相对较大, 地下水资源量较少, 水体矿化度普遍在 1~ 3 g/L 之间, 农业灌溉以黄河水为主。由于地下水补给条件所限, 地下水资源量制约了该地区的可持续开采, 优化地表水灌溉网络, 降低地下水开采量, 是该地区地下水可持续利用的一个途径。

后套平原不可持续区分布于区内黄河南岸和余太盆地。黄河南岸地处库布齐沙漠的北缘, 隶属鄂尔多斯杭锦旗, 从本次调查看, 该地区浅层可采资源量为 2 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 小于盆地中部的资源量水平。但该地区开采量较低, 人口稀少, 需求较低。影响该地区地下水可持续利用的主要因素包括地下水资源量低、沙漠化严重、水质差。由于沙漠化分布广泛, 该地区地下水不宜开采利用, 属于综合评价脆弱区。余太盆地地处乌梁素海东部, 是后套断陷盆地的东缘部分, 含水层岩性以粉细砂为主。盆地东南部地区为沙漠覆盖, 已不适宜开发利用, 北部生态环境也较为脆弱, 地下水对植被覆盖的影响较为显著。该地区浅层地下水水资源模数为 1 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 为盆地内最低水平, 资源量匮乏加上生态环境的制约, 使得该地区的地下水资源评价结果为不可持续。

4 结语

通过地下水可持续性评价可知, 后套平原地下水可持续性较差的区域分布于东部、东北部荒漠分布区和黄河沿岸; 可持续性条件相对良好的区域分布后套平原的中部, 包括五原县、杭锦后旗。不同评价区内影响地下水可持续性的关键因素不尽相同, 除主要城镇外, 多数地区表现在环境制约方面, 人口稀少、工农业对地下水依赖不大, 使得环境条件成为地下水可持续性好坏的主要制约因素。因此, 后套平原的社会经济的可持续发展, 首先要解决影响地下水可持续利用的污染、荒漠化、盐渍化问题。

参考文献(References):

- [1] Daniel P, Loucks John S. Gladwell. Sustainability criteria for water resources systems[M]. University Press, Cambridge, 1999.
- [2] M Thangarajan. Groundwater Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management [M]. Springer, 2007.
- [3] Jan H Fleckenstein, Stefan Krause, David M Hannah, et al. Groundwater surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics [J]. Advances in Water Resources, 2010, 33, (11): 1291- 1295.

- [4] Kostas Bitbas, The sustainable residential water use: Sustainability, efficiency and social equity[J]. *Ecological Economics*, 2008, 68: 221-229.
- [5] Alexandra Lutz James M. Thomas Greg Pohl Mamadou Keita W. Alan McKay. Sustainability of groundwater in Mali, West Africa[J]. *Environ Earth Sci*, Published online: 2008-11-28.
- [6] Jie Liu, Kendall Rich, Chunmiao Zheng. Sustainability analysis of groundwater resources in a coastal aquifer, Alabama[J]. *Environ Geol*, 2008, 54: 43-52.
- [7] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 6(7): 26-31 (DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*. 2010, 26(7): 26-31. (in Chinese))
- [8] 杨路华, 沈荣开, 曹秀玲. 内蒙古河套灌区地下水合理利用的方案分析[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(5): 56-59. (YANG Luhu, SHEN Rongkai, CAO Xiuling. Scheme of groundwater use in Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*. 2003, 19(5): 56-59. (in Chinese))
- [9] Jaroslav Vrha, Annukka Lipponen. Groundwater Resources Sustainability Indicators[R]. IHP viseries on groundwater, 2007.
- [10] 张光辉, 费宇红, 聂振龙, 等. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法研究[M]. 北京, 地质出版社, 2009. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, NIE Zhenlong, et al. Theory and methodology of regional groundwater function and sustainable utilization assessment in China[M]. Geology Pressing House. 2009 (in Chinese))
- [11] 戎晓红, 李春侠, 张晓燕. 基于信息熵的徐州市土地利用结构分析及其 GM 预测[J]. *国土资源科技管理*, 2013, 30(1): 72-77. (RONG Xiaohong, LI Chunxia, ZHANG Xiaoyan. Analysis of land use structure and GM prediction in Xuzhou city based on information entropy[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2013, 30(1): 72-77. (in Chinese))
- [12] 陈南祥, 苏荣, 曹文庚. 基于熵权的集对分析法在土默特左旗地下水水质评价中的应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(6): 30-34. (CHEN Nanyang, SU Rong, CAO Wengeng. Application of the Set Pair analysis method to evaluation of shallow groundwater quality based on entropy weight[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(6): 30-34. (in Chinese))
- [13] 巴彦淖尔市统计局. 巴彦淖尔市年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 巴彦淖尔市统计信息网, 2010-2012. (Statistics bureau of Bayanur, Statistical bulletin of Bayanauer National Economic and Social Development[EB/OL]. Statistics Information Network of Bayanur, 2010-2012. (in Chinese))
- [14] 内蒙古自治区地质环境监测院. 内蒙古自治区主要城市地下水环境监测综合报告[R], 2006. (The Institution of Inner Mongolia Geological Environment Monitoring. Comprehensive report of the Groundwater Environmental Monitoring in the Main City of Inner Mongolia Autonomous Region [R]. 2006. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国国土资源部. 中国地下水资源(内蒙古自治区)[M]. 中国地图出版社, 2004. (Ministry of land and resources of the People's Republic of China. Groundwater resources of China (inner Mongolia autonomous)[M]. Sinomappress, 2004. (in Chinese))
- [18] 詹志明, 秦其明, 汪冬冬. 基于 NIR-Red 光谱特征空间的土壤水分监测新方法[J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 36(11): 1020-1026. (ZHAN Zhiming, QIN Qiming, WANG Dongdong. A new method of soil moisture monitoring based on NIR-Red spectrum feature space[J]. *Chinese Science: D*, 2007, 36(11): 1020-1026. (in Chinese))
- [19] 李晓鹏, 马晓阳. 河东灌区干渠砌护形式抗冲防渗与抗冻技术的初步分析[J]. *宁夏工程技术*, 2009, 383(04): 383-387. (LI Xiaopeng, MA Xiaoyang. Hedong irrigation area form the main protective impact of anti seepage and anti freeze technology for preliminary analysis[J]. *Journal of Ningxia Engineering*, 2009, 383(04): 383-387. (in Chinese))
- [20] 闫娜娜, 吴炳方, 李强子, 等. HJ1A/B 卫星在干旱应急监测中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2010(05): 675-681. (YAN Nana, WU Bingfang, LI Qiangzi, et al. HJ1A/B satellite applications in drought monitoring[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010(05): 675-681. (in Chinese))

(下接第 174 页)