

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.04.008

南方地区地下水功能评价指标筛选研究——以广东省为例

张 蕾^{1,2}, 刘晓敏¹, 严 钰¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 广东省水文局, 广东 广州 510150)

摘要 在分析南方地区地下水资源特点的基础上,综合运用理论分析法、专家咨询法和灰色关联度模型,构建地下水功能评价指标体系;以广东省为例探索地下水功能评价指标筛选方法和筛选程序,选择理论分析法和专家咨询法进行第 1 次指标筛选,选择灰色关联度进行第 2 次指标筛选。与北方地区地下水功能评价指标进行对比,分析指标的合理性,用得到的广东省地下水功能评价指标体系为依据进行评价,其结果与实际情况基本吻合。

关键词 地下水功能评价; 指标筛选; 南方地区; 广东省

中图分类号: P641.12 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2010)04-0026-05

Evaluation index system of groundwater function in southern region of China : A case study in Guangdong Province

ZHANG Lei^{1,2}, LIU Xiao-min¹, YAN Yu¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China)

Abstract : On the basis of analysis of the characteristics of groundwater resources in the southern region of China, an index system for groundwater function evaluation was constructed with the theoretical analysis method, the expert consultation method, and the gray correlation degree method. Using the evaluation index system of groundwater function in Guangdong Province as an example, the methods and the procedure for identifying evaluation indexes were studied. The theoretical analysis method and expert consultation method were used in the first identification, and the gray correlation degree method was used in the second identification. To evaluate the rationality of the index system resulting from this screening, it was compared with the index system used in the northern region. There was an agreement between the estimated results and field data.

Key words : groundwater function assessment; index identification; southern region of China; Guangdong Province

1 研究目的与意义

根据 2004 年全国水资源公报^[1],南方地区地下水资源量为 3 835.59 亿 m³,占全国地下水资源量的 51.6%。与北方地区相比,我国南方地区地下水资源丰富,整体水质良好,在供水中处于辅助地位,开发利用潜力很大,但也存在局部区域超采现象,且南方地区地下水调查研究相对落后。目前国内对北方

平原区地下水的研究较为深入,已经形成了一套较为完整的体系^[2],而南方地下水问题研究仅限于局部地区,严重缺乏相关的水文地质资料,且南方地区地下水功能评价、功能区划等研究也还不完善或者才刚刚起步。因此,加强南方地区地下水功能评价研究具有一定的必要性。

地下水功能评价是近年提出的一种地下水评价的新方法^[3-4],该方法综合考虑区域地下水的资源功

表 1 地下水功能评价指标体系^[5]

属 性	DSR 模型建立的评价指标体系
资源占有性	区外补给资源占有率、区内补给资源占有率、储存资源占有率、可开采资源占有率
资源再生性	补储更新率、补给可用率、补采平衡率、降水补给率
资源调节性	水位变差补给比、水位变差开采比、水位变差降水比
资源可用性	可采资源模数、可用储量模数、资源质量指数、资源开采程度
景观环境维持性	湖沼环境与地下水关联度、景变指数与地下水关联度
水环境关联性	水环境矿化与地下水关联度、氮磷指变与地下水关联度
植被环境维持性	草场变化与地下水关联度、天植变化与地下水关联度、绿洲变化与地下水关联度
土地环境关联性	土地沙化与地下水关联度、土地盐渍化与地下水关联度、土地质量与地下水关联度
地质环境稳定性	地面沉降与地下水关联度、累计开采量与弹性释水系数、水位埋深与弹性释水系数、年均沉降量与年均开采量、累计沉降量与同期水位降幅
系统衰变性	地下水质量与水位关联度、泉变化与地下水关联度海咸侵与地下水关联度、补给变化率与水位变差比

能、生态环境功能和地质环境功能,进行地下水的可持续性评价,较其他评价方法更能全面地概括地下水各项功能,充分体现地下水的整体最佳效益,为地下水功能区划研究提供理论依据。要完成地下水功能评价,首先需要解决的一个问题是确定评价指标体系,即采用哪些指标进行综合评价,指标选取是否合适决定整个评价工作的成功与否。目前国内外还没有提出统一的地下水功能评价指标体系,如何建立全面科学的评价指标体系?如何根据研究区的区域特征筛选评价指标?如何检验指标并分析指标的合理性?这些问题在评价工作已经越来越受到研究者的关注。笔者就地下水功能评价指标体系构建、评价指标筛选、指标的合理性检验等进行了探讨。

2 地下水功能评价指标体系的构建

在地下水功能评价中,评价指标的选取是一项很关键的工作。笔者选取“驱动力-状态-响应”模型(DSR模型)构建地下水功能评价指标体系。DSR模型突出了地下水功能受到的压力和地下水功能退化之间的因果关系,这是DSR模型的优势,但对于社会和经济指标,这种分类方法不可能得到其所希望的因果关系,即在“驱动力指标”和“状态指标”之间没有逻辑上的必然联系,这是DSR概念模型的缺陷。在应用于地下水功能评价时,因评价内容侧重于地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能,无需将社会和经济指标作为评价重点,恰好回避了这一缺陷,而应用了该模型的优势。

运用DSR模型建立地下水循环系统的驱动因子群、状态因子群和响应因子群,其中“驱动因子”是由表征促使地下水补给、径流和排泄等因素变化的因子群组成,包括降水量变化、地表水径流变化、地下水开采量和土地利用等;“状态因子”是由表征地下水数量和质量、储存和运动变量特征的因子群组成,包括地下水位、储存量、可利用资源量等;“响应因子”指由表征湖泊、湿地、土地、绿洲、地面沉降和植被等变化的因子群组成,包括湖泊深度、湖泊面积、土地肥力、地面沉降量和植被覆盖度等。筛选主导因子与地下水功能之间的关系,确定地下水功能评价指标体系。在总结国内外相关领域研究成果的基础上,根据指标的属性进行归类,建立的地下水功能评价指标体系见表1。

3 广东省地下水功能评价指标体系

3.1 地下水问题

广东省位于我国大陆南端,虽然水资源比较丰富,但由于人口众多,人均占有水资源量仅达全国平

均水平,加上水资源的时空分布不均匀,局部地区地下水开采日趋频繁,可用地下水资源逐渐减少;其次,广东省地下水的开发利用对生态环境也产生较大影响,湛江红树林自然保护区2005年地下水开采量为777万 m^3 ,地下水水质较差,局部矿化度、铁离子超标,生态功能逐步退化;同时,广东省因开发利用地下水诱发的地面塌陷及地裂缝、房裂等灾害也较多,主要发生在覆盖岩溶区,脑洲岛部分区域浅层井水质不同程度咸化。

3.2 指标筛选目的、方法和程序

3.2.1 筛选目的

表1建立的地下水功能评价指标体系不是针对某个地区或区域提出的,而是全面考虑地下水功能可能的影响因素和“驱动-状态-响应”因子构建的,包含的指标种类多、数目大,指标间信息可能重叠,如果不加选择地把所有指标都应用于地下水功能评价,指标集会庞大繁杂,不仅加大工作量和分析计算的难度,而且还可能会冲淡地下水功能主导因素的作用,给评价工作带来误差。因此,必须根据广东省的水文地质条件、地下水生态环境状况和地质环境状况,采取一定的评价指标筛选方法进行指标筛选,得到具有广东省特征的评价指标体系。

3.2.2 筛选方法

目前国内学者针对评价指标筛选提出了一些方法,主要集中在统计和数学方法上。常见的方法包括灰色关联度法、主成分分析法、区分度分析法、理论分析法、层次分析法、频度统计法、专家咨询法等。广东省地下水功能评价指标的数据资料少,难以找出统计规律,无法判定样本数据服从的概率分布,因

此采用数理统计方法难以实现指标的定量分析。灰色关联分析方法从某种程度上弥补了这种缺憾,它对样本量的多少和样本有无规律都同样适用,而且计算量小,应用方便。本文选择理论分析法和专家咨询法进行广东省地下水功能评价指标的第1次筛选,选择灰色关联度法进行广东省地下水功能评价指标的第2次筛选。

3.2.3 筛选程序

地下水功能评价指标筛选分为定性、定量筛选两步,具体指标筛选程序见图1。

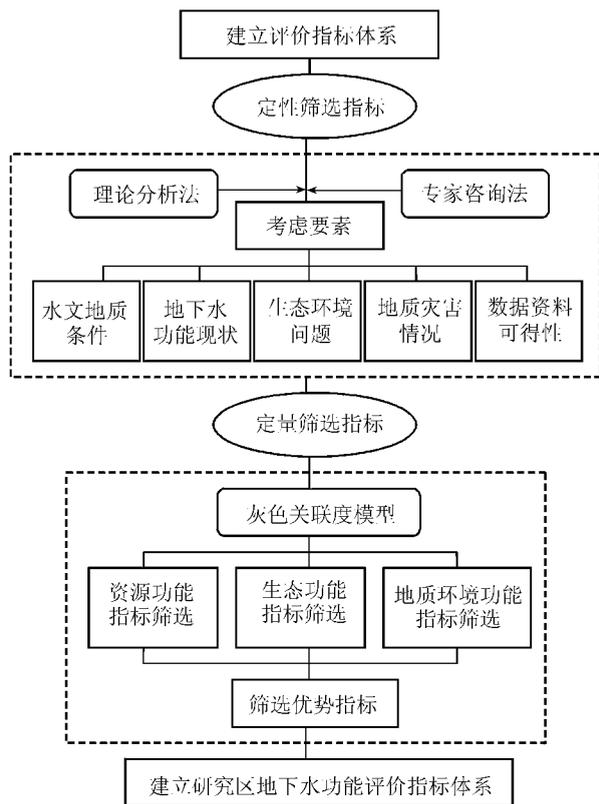


图1 评价指标筛选程序

3.3 具体指标筛选

3.3.1 理论分析法与专家咨询法筛选指标

理论分析法是对广东省地下水的分布规律、水质、功能现状、开发利用状况、地下水开采诱发的生态环境问题和地质灾害等进行分析,选择符合广东省地下水功能特性的重要指标;专家咨询法是在理论分析法初步筛选评价指标的同时,征询有关专家的意见,对指标进行调整。

广东省地表水资源丰富,地下水主要接受区内

的降雨入渗补给,基本上没有人为的域外调水,剔除“区外补给资源占有率”这项指标;广东省湖泊主要靠大气降水和地表径流补给,地下水补给量很小,土地质量与地下水的关联性较小,结合专家咨询结果,忽略“湖泊环境与地下水关联度”和“土地质量与地下水关联度”这2项指标,此外,广东省土地沙化现象很少,剔除“土地沙化与地下水关联度”,考虑到“草场变化与地下水关联度”与“天植变化与地下水关联度”2项指标均描述植被状况与同期地下水位变化之间的关联性,遵循主导性与简明性的指标筛选原则,忽略前一项指标;“累计开采量与弹性释水系数”与“水位埋深与弹性释水系数”2项指标均描述了地下水功能与承压水的关联性,广东省承压水以火山群为中心呈放射状向海方向径流,在远海排泄,且开采深层承压水对浅层地下水影响不大,忽略这2项指标;同时,“年均沉降量与年均开采量”、“累计沉降量与同期水位降幅”、“地面沉降与地下水关联度”这3项指标均考虑地面沉降与地下水位变化的关系,存在信息的重叠,因此剔除前2项指标。运用理论分析法和专家咨询法共筛选出了25项指标,被忽略的指标共9项,包括:区外补给资源占有率、湖泊环境与地下水关联度、草场变化与地下水关联度、土地沙化与地下水关联度、土地质量与地下水关联度、累计开采量与弹性释水系数、水位埋深与弹性释水系数、年均沉降量与年均开采量、累计沉降量与同期水位降幅。

3.3.2 灰色关联度模型筛选指标步骤

运用理论分析法和专家咨询法定性筛选的评价指标仍然庞大、繁杂,研究中进一步从定量角度采用灰色关联度模型筛选优势指标^[6-7],从上述25个指标中筛选出主要因素和次要因素并确定因素间的关系。根据广东省地下水资源的补给、恢复和利用等特点,对生态功能层和地质环境功能层的指标进行优势指标的筛选。

a. 对数列 X 进行关联度分析。选取湛江、深圳、汕头3个行政区作为比较点,根据2005年广东省各行政区水资源开发利用程度统计结果,这3个市的地下水开发利用程度排名最前,其中湛江市为13.73%,深圳为6.87%,汕头为26.34%。它们分别组成数列 $Y_j = \{Y_1, Y_2, Y_3\}$ 。

表2 各地区评价指标数据值

数列	地区	评价指标与地下水关联度								地下水补给变率与水位变差比 X_{10}	
		景变指数 x_1	水环境矿化 x_2	氮磷指变 x_3	天然植被变化 x_4	绿洲变化 x_5	地面沉降 x_6	地下水质量 x_7	泉变化 x_8		海咸入侵 x_9
Y_1	湛江	0.332006	0.544500	0.553402	0.729278	0.553402	0.118547	0.257660	0.976288	0.762922	0.674661
Y_2	深圳	0.741444	0.593605	0.309400	0.207229	0.203085	0.205671	0.818176	0.829957	0.323081	0.553766
Y_3	汕头	0.273540	0.865152	0.678853	0.509897	0.804893	0.353541	0.720590	0.589641	0.517052	0.306199

表3 矩阵R的各行均值

X_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
均值 \bar{r}_i	0.641313	0.734361	0.684572	0.753956	0.549863	0.692718	0.610438	0.559430	0.710580	0.573955

以数列 X_1 为参考数列,根据式(1)对表2进行计算,得到绝对差数列:

$$\Delta_{ij}(K) = |X_i(K) - X_j(K)| \quad (K = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中 i 为参考数列; j 为比较数列; K_1, K_2, K_3 分别代表湛江、深圳、汕头。 $X_i(K)$ 为第 K 行第 i 列的指标数据值; $X_j(K)$ 为第 K 行第 j 列的指标数据值; $\Delta_{ij}(K)$ 为第 K 行第 j 列的指标数据值与第 K 行第 i 列的指标数据值之差的绝对值。

$$\xi_{ij}(K) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|X_i(K) - X_j(K)| + \rho \Delta_{\max}} \quad (2)$$

其中 $\Delta_{\max} = \max(\Delta_{ij}(K))$
 $\Delta_{\min} = \min(\Delta_{ij}(K))$

得到绝对差数列的 Δ_{\max} 和 Δ_{\min} 后,根据式(2)计算关联系数 ρ 一般取 0.5。

计算比较数列 X_j 对参考数列 X_i 的关联度

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{ij}(K) \quad (3)$$

按照上述步骤计算,依次改变母序列,求出所有两两数列的关联度;并将两两数列的关联度值写成关联度矩阵的形式,得到关联度矩阵 R 。

b. 分析关联矩阵行。以第1列(景观指数与地下水关联度)为例,按表2中的关联度大小排序,得到关联序 $[r_{17}, r_{110}, r_{16}, r_{12}, r_{18}, r_{13}, r_{19}, r_{14}, r_{15}]$,即对 X_1 影响最大的是 X_7 ,地下水质量影响水景观是显然的,其他指标与 X_1 的关联次序为 $X_7, X_{10}, X_6, X_2, X_8, X_3, X_9, X_4, X_5$,其余各行的关联序采用相同方法计算和分析。

c. 求出关联矩阵 R 中各行平均值 \bar{r}_i ,进行优势因素分析,结果见表3。排序为: $\bar{r}_4 > \bar{r}_2 > \bar{r}_9 > \bar{r}_6 > \bar{r}_3 > \bar{r}_1 > \bar{r}_7 > \bar{r}_{10} > \bar{r}_8 > \bar{r}_5$,即各指标的优势排列顺序为: $X_4 > X_2 > X_9 > X_6 > X_3 > X_1 > X_7 > X_{10} > X_8 > X_5$ 。

d. 评价指标筛选。基于上述分析, X_4, X_2, X_9, X_6, X_3 为优势指标,对广东省地下水功能的影响作用较强; $X_1, X_7, X_{10}, X_8, X_5$ 为非优势指标,对广东省地下水功能的影响作用较弱,由此忽略这5个指标。将生态功能层、地质环境功能层的优势指标和资源功能层的指标进行组合,得到广东省地下水功能评价的指标体系,见表4。

4 指标合理性分析

4.1 广东省地下水功能评价指标定性分析

由于广东省地下水方面的统计资料有限,而且

表4 广东省地下水功能评价指标体系

总目标层	功能层	属性层	指标层
地下水资源可持续利用	资源	资源占有性	区内补给资源占有率、储存资源占有率、可开采资源占有率
		资源再生性	补储更新率、补给可用率、补采平衡率、降水补给率
		资源调节性	水位变差补给比、水位变差开采比、水位变差降水比
		资源可用性	可采资源模数、可用储量模数、资源质量指数、资源开采程度
生态功能	水环境关联性	水环境矿化与地下水关联度、氮磷指变与地下水关联度	
	植被环境维持性	天植变化与地下水关联度	
地质功能	地环稳定性	地面沉降与地下水关联度	
	系统衰变性	海咸侵与地下水关联度	

现有数据灰度较大,因此采用数理统计方法进行指标合理性分析比较困难,只能对指标体系作定性的合理性分析。图1表明了地下水功能评价指标体系的构建程序,以表1中评价指标体系为基础,首先,根据广东省地下水的分布状况、分布规律、功能状况、开发利用状况等,结合数据资料情况,采用理论分析与专家咨询相结合的方法进行评价指标的第1次筛选,选择那些符合广东省地下水功能特性的重要指标;其次,采用灰色关联度模型进一步筛选优势指标;最后,得到广东省的地下水功能评价指标体系。以表4中广东省地下水功能评价指标体系为依据,进行广东省地下水功能评价,评价结果基本与广东省实际情况吻合,说明本文提出的评价指标筛选方法和广东省地下水功能评价指标具有一定的科学性、合理性。

4.2 与北方地下水功能评价指标差异性分析

张光辉等^[5]根据华北平原水文地质、生态环境和地质环境条件,建立了华北平原地下水功能评价指标体系,见表5。本文提出的广东省地下水功能评价指标体系(表4),与华北平原地下水功能评价指标体系(表5)对比,可以看出:华北平原地区的评价指标体系不仅考虑了区外资源补给,还考虑了土地沙化与地下水的关联性和地下水补给变率与水位的变差比,符合华北平原的地下水特征,由上述评价指标筛选分析可知,南方地区雨量充沛,地表水资源和地下水资源都比较丰富,地下水资源在供水中所占比例不到4%,因此上述指标在广东省地下水功能评价中均被忽略;南方地区河流湖泊等地表水体主要靠大气降水和地表径流补给,(下转第94页)

程汾河 81 km 天然输水河道水环境容量与排污总量分配研究 [R]. 太原:山西环境科学研究院, 2005.

- [3] 韩静. 汾河水库水质趋势分析 [J]. 山西水利科技, 2009 (1): 92-93.
- [4] 朱党生, 王超, 程晓冰. 水资源保护规划理论及技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [5] 陈雷. 实行最严格的水资源管理制度, 促进经济社会全

面协调可持续发展 [N]. 人民日报, 2009-03-22 (2).

- [6] 王晓宇. 山西省城市污水处理与回用存在问题及对策探讨 [J]. 水资源与水工程学报, 2007 (2): 72-76.
- [7] 王晓宇. 生态农业建设与水资源可持续利用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

(收稿日期 2010-03-15 编辑: 高渭文)

(上接第 29 页)

表 5 华北平原地下水功能评价指标体系^[8]

功能层	属性层	指标层
资源功能	资源占有性	区外补给资源占有、区内补给资源占有、可利用资源占有
	资源再生性	补给可用率、补采平衡率、降水补给率
	资源调节性	水位变差开采比、水位变差降水比
	资源可用性	可采资源模数、资源质量指数、资源开采程度
生态功能	景观环境维持性	湖沼环境与地下水关联度
	水环境关联性	水环境矿化与地下水关联度
	植被环境维持性	绿地与地下水关联度
地质环境功能	土地环境关联性	土地沙化与地下水关联度、土地盐渍化与地下水关联度
	地环稳定性	地面沉降与地下水关联度
	系统衰变性	地下水质量与水位关联度、补给变化率与水位变差比

地下水补给量很小, 湖泊环境受地下水的影响也比较小, 因此“湖沼环境与地下水关联度”等指标在南方地区地下水功能评价中被忽略, 而在北方地区被重视; 广东省南临南海, 沿海岸线曲折, 长达 3 368.1 km, 居全国海岸线长度第 1 位, 因此“海水入侵与地下水水位的关联性”指标在广东省地下水功能评价中被着重考虑。由此可知, 表 4 提出的广东省地下水功能评价指标体系与华北平原地下水功能评价指标体系差异较大。

除有关地下水共性指标外, 不同地区地下水功能评价指标体系的建立还要根据各地区的水文地质、地下水开采利用、生态环境和地质环境条件选取反映区域特征的评价指标体系。

5 结 语

a. 根据研究区的水文地质条件、地下水生态环境状况和地质环境状况, 选择理论分析法和专家咨询法进行地下水功能评价指标的第 1 次筛选, 选择灰色关联度法进行研究区地下水功能评价指标的第 2 次筛选, 从地下水功能评价体系的 34 个指标中筛选出 19 个主导性的优势指标, 评价结果基本与广东省实际情况吻合, 说明研究区筛选的评价指标具有一定的科学性、合理性。

b. 通过与“华北平原地下水功能评价指标体系”对比, 可以看出, 华北平原地区的评价指标体系不仅考虑了区外资源补给、湖泊环境受地下水的影响, 还考虑了土地沙化、地下水补给变率与水位的关系, 这些指标在广东省地下水功能评价中均被忽略, 而海水入侵则被着重考虑。两地指标体系差异较大, 除有关地下水共性指标外, 不同地区地下水功能评价指标体系的建立还要根据各地区的水文地质情况选取反映区域特征的评价指标体系。

c. 地下水系统的复杂性、隐蔽性给全面认识地下水系统特征带来困难, 需要进一步对地下水功能的表征属性和影响因子进行分析, 建立实时动态的数据资料监测体系, 进一步完善评价指标体系, 实现地下水功能的动态评价。

参考文献:

- [1] 水利部. 中国水资源公报(2004 年) [R]. 北京: 水利部, 2005.
- [2] 赵贤豹, 钟华平, 黄昌硕. 南方地下水开发利用存在问题及对策 [J]. 地下水, 2008 (1): 40-43.
- [3] 中国地质调查局. 全国地下水资源及其环境问题调查评价 [R]. 北京: 中国地质调查局, 2004.
- [4] 罗育池, 魏秀琴, 杜金龙, 等. 基于 MapGIS 的河南省浅层地下水功能评价与区划 [J]. 中国农村水利水电, 2007 (9): 36-42.
- [5] 张光辉, 聂振龙. 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, 2008.
- [6] 史瑞卿, 孙维芬. 灰色聚类分析在地下水功能区划中的应用 [J]. 工程勘察, 1999 (1): 27-30.
- [7] 费为进, 经苏龙. 快速灰色分级聚类法在地下水功能区划中的应用 [J]. 地下水, 2001, 23 (2): 190-191.
- [8] 张光辉, 申建梅, 聂振龙, 等. 区域地下水功能及可持续性评价理论与方法 [J]. 水文地质工程地质, 2006 (4): 62-71.

(收稿日期 2010-03-16 编辑: 高渭文)