

地下水生态系统健康评价指标体系的构建

孙才志*, 刘玉玉

(辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029)

摘要:地下水生态系统是重要的生态系统类型, 由于地下水资源不合理的开发利用和污染物排放强度的增大、并长期积累, 已导致许多地方产生生态环境劣变, 甚至酿成难以弥补的严重后果, 地下水生态系统健康问题已经成为许多国家和地区重点关注的环境问题之一。在科学把握地下水生态系统健康的概念和内涵的基础上, 从系统结构特征、生态功能、资源功能、系统保护以及社会环境等 5 个方面选取了 29 个典型指标构建了地下水生态系统健康指标体系, 对关键评价指标的意义进行了具体分析。出于服务于地下水生态系统健康评价的目的, 对重要指标的评价标准进行了划分, 并探讨了地下水生态系统健康评价的主要方法及发展方向, 研究成果在一定程度上可以丰富生态系统健康评价研究理论与方法体系。

关键词:地下水生态系统; 生态健康; 评价指标体系; 评价方法

文章编号: 1000-0933(2009)10-5665-10 中图分类号: Q14, X171 文献标识码: A

Construction of evaluation index system for groundwater ecosystem health assessment

SUN Cai-Zhi*, LIU Yu-Yu

Urban and Environment College of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5665 ~ 5674.

Abstract: Though groundwater eco-systems are considered to be an important type of eco-system, there have been large amounts of environmental and ecological deterioration where groundwater recourses are tapped unreasonably and accumulating contamination intensity has grown more intense. Those actions can have irreparable consequences. The ecological state of groundwater has been under discussion in many countries and regions. Therefore, in order to address the concept and meaning of groundwater eco-health from a scientific point-of-view, the author selected twenty-nine typical indicators to serve as a system of evaluation among which structural features, ecological function, function of resources, system protection and social environment were under consideration. At the same time, the content and significance of key indicators were also well-analyzed. In order to improve that assessment, some main indicators were arranged into different categories, and tentative studies on assessment method as well as developmental direction were carried out. As a result, this research may, to some extent, enrich the theories and methods regarding the health of ecological system.

Key Words: groundwater ecological system; ecological health; assessment indicator system; assessment method

地下水是地球水圈的一个主要组成部分, 是全球水循环的一个重要环节, 也是全球淡水资源的重要组成部分。由于地下水资源分布广泛, 便于就地开采, 加之水质不易被污染, 供水量较稳定, 故在全世界的总供水量中, 地下水占有较大的比例。随着社会经济的发展, 地下水资源与环境压力越来越大^[1]。全面认识地下水生态系统健康, 合理开发地下水, 积极保护地下水, 有效解决在地下水开发、利用、保护等方面存在的突出问题, 已成为水资源可持续利用, 人口、资源、环境和经济社会协调发展的迫切要求。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40501013)

收稿日期: 2008-06-16; 修订日期: 2009-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncaizhi@sohu.com

目前各类型生态系统健康的研究主要集中在农业生态系统、湿地生态系统、湖泊生态系统、森林生态系统以及城市生态系统等领域,而对于地下水生态系统健康的研究,几乎无人涉足,对地下水生态系统健康研究的理论也很不完善和成熟。所以,加强地下水生态系统健康评价指标体系的研究,进而研究其评价方法,对于保护生态环境、实现水资源利用和经济的协调发展具有深远意义。

1 地下水生态系统健康的概念和内涵

“生态系统健康”概念是在全球生态系统已普遍出现退化的背景下产生的,虽然提出时间不长但是研究发展比较快。国内外许多学者从不同角度论述了生态系统健康的内涵和评价方法,据前人总结^[2~4],生态系统健康的标准有活力、恢复力、组织、生态系统服务功能的维持、管理选择、外部输入减少、对邻近系统的影响及人类健康影响等八个方面。

目前对地下水生态系统健康尚无确切的定义,在查阅大量文献^[5~20]、总结前人的基础上,本文认为:地下水生态系统是指由地下水和其相关的生物群落及其周围环境组构而成的功能系统,在系统内部及其与环境间不断地进行着物质交换和迁移、能量转换和传输及信息贮存与传递等,同时系统要素之间相互作用、相互制约,并处在不断演变之中,是具有相对稳定结构与功能的统一体。健康的地下水生态系统是指其服务功能(通过对水分、盐分、热量、生物平衡等的调节作用来维持和改善非生命的环境质量,同时为生物和人类提供充足的资源和理想的生境)能够实现、状态持续稳定、遇到干扰时系统所具的自我修复能力能很快使其结构和功能恢复健康的系统。

地下水生态系统健康的内涵主要包括4个方面:一是自然属性,即地下水生态系统健康问题的直接因子来源于自然禀赋特性,包括环境的优劣和资源的丰贫程度等;二是社会属性,即地下水生态系统健康问题的载体是人类及其活动所在的社会与各种资源的集合;三是人文属性,即载体对因子的主观感觉,只有当地下水质量、水量供应、生态环境状态等使人群感到满意才称得上是健康;四是可持续性,即地下水生态系统能够满足水的持续性和生态系统整体性的条件下,支持人口、资源、环境与经济协调发展,满足代内和代际人的需要。

研究地下水生态系统健康就是对地下水生态系统状态和功能进行总结与概括,进而衡量地下水生态系统的健康程度,为一些重大水事活动提供科学的依据。

2 地下水生态系统健康评价指标体系构建原则

地下水生态系统健康评价指标体系涉及多学科、多领域,因而种类、数目繁多,为了客观、全面和科学地衡量地下水生态系统健康的状况,在选取指标和建立指标体系时应当遵循以下原则^[20]:

(1) 空间尺度原则

评价指标应该定向于合适的空间尺度,该原则涉及特定考虑下地区或生态系统的空间大小,尤其是指标可以发展到全球、国家、区域或地方尺度。

(2) 主导因子和独立性原则

影响地下水生态系统健康的因素很多,在评价中对主导因子的选择至关重要,同时,每个指标要内涵清晰、相对独立,同一层次的各指标应尽力不相互重叠,相互间应不存在共线性的关系。

(3) 系统性原则

地下水生态系统是一个复杂的系统,构建健康评价指标体系要遵循系统相关性、系统层次性、系统整体性和系统综合性等原则。

(4) 敏感性和预警能力原则

主要指所选取的指标对于系统受扰后的结果能做出迅速响应,对于比较抽象和复杂的地下水生态系统而言,所选的指标必须具备一定的预警能力,以便采取有效的管理措施。

(5) 简明性和可操作性

指标概念明确,易测易得。评价指标的选择要考虑方法学和人力、物力,还要考虑为保证评价指标的准确性和完整性,评价指标要可测量,数据便于统计和计算,有足够的数据量。

(6) 定性定量相结合的原则

在定性分析的基础上,进行量化处理,通过量化能较为准确地揭示事物的本来面目;而对于缺乏统计数据的定性指标,可采用评分法,利用专家意见近似实现其量化。

(7) 规范化原则

地下水生态健康评价是一项长期性工作,所获取的数据和资料无论在时间上还是空间上,都应具有可比性。因而,所采用的指标的内容和方法都必须做到统一和规范。

3 地下水生态系统健康评价指标体系

3.1 评价指标体系的构建

地下水生态系统健康评价指标体系是由若干个与地下水生态系统健康问题密切相关的相互联系、相互补充的指标组成的系列。在遵循指标系统构建原则的基础上,以地下水生态系统健康的内涵为依据,以维持地下水生态健康为最终目标,综合考虑选择地下水系统结构特征、生态功能、资源功能、系统保护以及社会环境等五大类 29 个指标构建如下地下水生态系统健康评价指标体系(表 1)。

表 1 地下水生态系统健康评价指标体系
Table 1 Assessment index system of groundwater ecosystem health

目标层 Objective layer	准则层 Criteria layer	指标层 Indicators layer	单位 Unit
地下水生态系统健康 Groundwater ecosystem health	地下水系统结构 System's structural feature	含水层介质类型 Aquifer media	
		包气带岩性 Vadose zone lithology	
		包气带厚度 Vadose zone thickness	m
		地形坡度 Topography	%
		含水层导水系数 Transmissivity of aquifer	m ² /d
	生态功能 Ecology function	系统开放程度 Degree of system openness	
		地下水生态水位 Ecological groundwater table	m
		地下水矿化度 Groundwater salinity	g/L
		土壤总含盐量 Total of soil salinity	%
		土壤含水量 Soil moisture content	%
		水土流失 Water and soil erosion	%
		植被覆盖率 Vegetation cover	%
		降水量 Precipitation	mm
		地下水资源模数 Groundwater resources module	10 ⁴ m ³ /(km ² ·a)
		地下水供水比 Percentage of groundwater supply	%
	资源功能 Resources function	缺水率 Percentage of water shortage	%
		地表水水质指标 Surface water quality	
		地下水水质指标 Groundwater quality	
		工业废水达标处理率 Percentage of industrial wastewater treatment that quality reaches the national standard	%
		生活污水处理率 Percentage of sanitary sewage treatment	%
		节水灌溉率 Rate of water-saving irrigation	%
		工业用水重复率 Rate of industrial water repetition	%
		水利环保投资比重 Proportion of investment in water conservancy and environmental protection	%
		系统管理水平 Administration level	
		人均 GDP Per capita Gross Domestic Product	10 ⁴ yuan/capita
	系统保护 System protection	科教经费比重 Proportion of science and technology education funds	%
		产业结构优化水平 Level of the industrial structure optimization	
		水务市场发育程度 Market development of the water industry	
		公众参与程度 Degree of public participation	
	社会环境 Social environment		

3.2 评价指标的意义及说明

3.2.1 地下水系统结构特征指标

地下水作为资源要素,在经济社会的可持续发展中起着举足轻重的作用。同时,它作为重要的环境要素,也直接影响着生态环境。许多国家地区经济在以牺牲环境为代价飞速发展的几十年后,地下水污染状况已非常严重,而地下水系统自身的结构特征在抵制地下水污染,维持生态健康方面具有重要的作用,有鉴于此,选用地下水系统结构特征的如下几个指标^[21,22]来反映地下水生态系统健康的稳定性与可恢复性。

(1) 含水层介质类型

含水层中的水流系统受含水层介质的影响,污染物的运移路线及路径的长度由含水层中水流、裂隙管道和相互连接的溶洞所控制。一般情况下,含水层介质的颗粒尺寸越大或裂隙或溶洞越多,渗透性越大,含水层介质的稀释能力越小,地下水生态系统健康受损的潜势就越大。

(2) 包气带指标

包气带是饱水带与大气带圈、地表水圈的联系通道,是污染物进入浅层地下水的必经途径,也就是说包气带介质的渗透性能和包气带的厚度直接影响污染物质的衰竭和扩散能力。包气带的渗透性能越大,污染物进入地下水的速度越快;地下水埋深越浅,包气带厚度则越薄,污染物衰竭的速度越慢,地下水的脆弱性越强。

(3) 地形坡度

地形坡度可以在某种程度上控制污染物在地表区域停留的时间。为污染物渗入地下提供较大机会的地形坡度,相应的地下水受污染的可能性就大。当地形坡度小于2%时,污染物渗入地下的机会最大;当地形坡度大于18%时,为地表径流提供了很好的条件,因此污染物渗入的可能性很小,但在岩溶区,往往有大量洼地、落水洞存在,给污染物点状渗入提供了更大的可能性,相应的地下水易受污染程度就大。所以在应用该指标时,要结合研究区的具体情况。

(4) 含水层的导水系数^①

含水层的导水系数为含水层厚度与野外试验所得的渗透系数的乘积,导水系数的变化一般为200~1000 m²/d。含水层导水系数越大,表明地下水系统的循环能力越强,因此其遭受污染的可能性也越大。

(5) 系统开放程度

系统开放度是表征系统适应环境的范围、能力、极限的一种状态参量。对于地下水生态系统而言,其活动范围越大,可资利用的环境因素越多,排除来自环境的涨落与干扰的能力越强,汲取环境负熵流的效率越高,系统开放的层次和程度就越高,系统也就越健康。

在此应该指出的是,表征地下水系统结构特征的5个指标是以地下水系统遭受污染的可能性大小来衡量系统的生态健康状况,这种评价适合于对研究区水质要求较高、水量要求偏低的地区;而在评价水量需求较高、水质要求较低或水量、水质要求均较高的研究区时,要认真协调各个评价指标对系统健康状况的具体影响性质与程度,综合考虑评价指标的适用性和可行性。

3.2.2 生态功能指标

地下水的生态功能,是指地下水维持着生态环境的水土平衡、水盐平衡、水热平衡和水与生物平衡,保证生态环境的安全,还维系着地表水域、湿地等生态系统的良性发展,反映该功能的评价指标主要有以下几个:

(1) 地下水生态水位

是指能够充分发挥地下水对生态环境的控制作用,即满足生态环境要求、不造成生态环境恶化的地下水水位,主要受地质结构、地形、地貌和植被条件的影响。它是由一系列满足生态环境要求的地下水水位构成,是一个随时空变化的函数^[23]。地下水生态水位主要受地质结构、地形、地貌和植被条件的影响。据研究,内陆

① 严格的说,含水层的导水系数是针对承压含水层的,本文中的导水系数对潜水含水层也适用,其值为潜水含水层的渗透系数与潜水变动带含水层厚度的乘积

盆地大多数植物适宜生长的合理生态水位为 2.0 ~ 4.5m。

(2) 地下水矿化度^[24]

在地下水位埋深一定的情况下,地下水矿化度影响植被生长和荒漠化分布。不同类型植被、不同生长年龄的植被对矿化度的忍耐程度不同。在地下水位埋深一定的情况下,随着矿化度的增加,植被由水生系列向盐生系列演替。若地下水中氯化钠和硫酸钠含量太高,地表会形成盐土,使作物根、茎失水遭受盐害;若地下水中碳酸钠和重碳酸钠含量太高,会使作物遭受碱害;若地下水中盐、碱含量都太高,则会使土壤迅速盐碱化,作物死亡。

(3) 土壤含水量指标

该指标一般采用适宜含水量和凋萎系数来表示^[25]。据研究,在干旱区域,当土壤含水量为毛管持水量的 70% ~ 100% 时,最适宜植物生长。凋萎系数:是植物产生永久凋萎时的土壤含水量,此时的含水量为植物不能生长的土壤含水量,是一个重要的地下水生态指标。

(4) 土壤含盐量指标

不同植物由于其结构和生理功能的差别,其忍耐土壤含盐量的程度是不同的,某一种植物必然生长在其适宜的盐分范围的土壤中。植物忍耐土壤含盐量指标可用“生理干旱”阈值来表示,即土壤水中盐的浓度超过了植物根细胞质盐浓度,造成植物无法吸收水分的土壤含盐量^[25]。

(5) 水土流失程度指标

水土流失首先可以造成土壤中有机质降低,降低包气带的自净能力,极易造成地下水污染;水土流失破坏地表植被,降低区域内的水源涵养能力;另外,水土流失使滑坡与泥石流等频发、容易造成泥沙淤积而加剧水库等的抗洪压力,同时水土流失常携带大量有毒物质而易造成水质恶化,这些都影响系统的生态功能。该指标利用水土流失面积除以研究区面积来表示。

(6) 植被覆盖率

植被根系可以起到截留降水、加固土壤,减缓雨水对土壤表层的击溅,增加降水入渗,减少地表径流的作用,植被覆盖率越高,地下水系统生态健康状况越好。该指标用公式表示为:

$$\text{植被覆盖率} = (0.38 \times \text{林地面积} + 0.34 \times \text{草地面积} + 0.19 \times \text{耕地面积} + 0.07 \times \text{建设用地面积} + 0.02 \times \text{未利用地面积}) / \text{研究区面积} \times 100\%$$

3.2.3 资源功能指标

地下水的资源功能是指地下水具备一定的补给、储存和更新条件的地下水资源供给保障作用,为人类社会与生态环境系统提供水量和水质的保障。主要评价指标包括:降水量、地下水资源模数、地下水供水比、缺水率、水资源质量指数等。

(1) 降水量

降水是水循环过程的最基本环节,是地表径流的本源,更是地下水的主要补给来源。降水量通常利用一年内降落在研究区上的总水量计算,是影响地下水生态系统健康的一个非常重要的指标。

(2) 地下水资源模数

是衡量地下水资源丰富程度的一个指标,其值为单位面积的地下水资源量。地下水资源模数越大,则地下含水层的可调节能力越大,相应地保证供水的稳定性与均衡性也越强,因而其资源功能也越强。

(3) 地下水供水比

在我国北方地区,地下水资源在整个供水系统中一直占有非常大的比例,地下水供水比是地下可供水量在可供水总量中所占的比重^[26],是衡量地下水资源供给能力的一个指标。该指标一方面在某种程度上从自然属性上反映地下水生态系统健康的状况;同时,也可以从人文属性上引起人类社会对地下水生态系统健康的关注,即地下水供水比越大,其对当地社会经济的作用愈大,因而其受到有效保护的可能性也越大。

(4) 缺水率

缺水率是衡量缺水程度对地下水生态系统健康影响的一个指标,其公式^[27]表示为:

$$\text{缺水率} = (\text{供水量} - \text{需水量}) / \text{需水量} \times 100\%$$

其中,需水量包括农业、工业、生活以及生态环境等所需的水量。缺水率越大,地下水生态系统健康受到的威胁越大。

(5) 水资源质量指数

水资源质量是影响人类健康和水资源可持续利用发展的一个重要参数,被评价区的地表水和地下水的量等级一般分为 I、II、III、IV 和 V 级。

地表水水质指标反映区域水环境所处的状态,水质的好坏直接影响到包括地下水环境在内的水环境优劣,可利用下述公式确定:

$$C = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3$$

式中, C 是地表水的指标值; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为河川径流、湖泊、水库中可利用水资源的比例; a_1 、 a_2 、 a_3 分别为河川径流、湖泊、水库在地表水中所占的比重。其中,可利用水资源的比例是指某水体中 IV 类及优于 IV 类的水体占水体总量的百分比。

地下水水质指标反映区域地下水水质状况,同地表水一样,其水质的优劣直接影响到环境的好坏,并关系到人的生命健康。以地下水中 III 类水及优于 III 类所占比例,来量化地下水水质。

3.2.4 系统保护指标

该指标反映的是人类为了减轻用水不合理对地下水生态系统健康的影响所采取的积极响应,是人的主观能动性的体现,通过污水处理率、节水率、植被覆盖率、水利环保协调以及系统管理水平等指标来描述。

(1) 污水处理率

该指标反映人类对排放污水的处理程度,利用污水处理量除以污水排放总量,经常用工业废水达标处理率和生活污水处理率来衡量,是越大越优型的指标。

(2) 节水率

通常采用节水灌溉面积率来表征农业节水水平,其值为节水灌溉面积占农业耕地面积的比重,是衡量农业灌溉节水的指标。在工业节水中,用工业用水重复利用率即工业重复用水量占工业用水总量的百分率计算,反映工业用水节水效率。

(3) 水利环保协调指标

为保证水利工程安全运行,改善环境质量,必须保证水利投资占当年 GDP 的一定比例。水利环保投资占 GDP 的比重即当年某地区水利环保投资占当年地区国内生产总值的百分比,此比例越高,投入治理问题的力度就越大。

(4) 系统管理水平指标

该指标是衡量政策法规贯彻力度和具体措施管理实施水平的指标,在统计中要考虑定性和定量相结合,以系统管理队伍的整体水平来衡量。

3.2.5 社会环境指标

人类社会的发展状况和趋势是影响地下水生态系统健康水平不可或缺的因素,人类的文化观和价值观随着社会经济的发展 and 生态环境的变化而发生不同的改变,因此该范围的指标可以选择人均 GDP、科教经费比、水务市场发育程度、产业结构优化水平以及公众参与程度等指标作为评价因子。

(1) 人均 GDP 指数

人均 GDP 是反应经济发展状况的指标,利用评价地区总人数除 GDP 的值来统计。人均 GDP 是反映经济发展整体水平的重要指标,人均 GDP 越高,水利投入能力越强,能更进一步的保障经济安全。

(2) 科教经费比

是科研、教育投资占 GDP 的比重,是一越大越优型指标,科教经费高,研究区的人口素质和环保意识就高,会促进地下水生态系统向良性发展。

(3) 水务市场发育程度

市场机制对水务行业的资源配置发挥基础作用,主要包括:推进运营主体企业化,投资主体多元化,价格形成市场化和市场监管法制化。水务市场发育程度可以反映市场机制对水资源合理配置的水平,从某种程度上定性的描述地下水生态系统健康状况。

(4) 产业结构优化水平

产业结构是研究区的各产业之间的相互联系及联系方式。产业结构优化水平是产业结构的高度化和合理化水平,该指标反映在经济发展的一定阶段各产业之间的资源占有关系对地下水生态系统健康的影响程度,是一个定性的评价指标。

(5) 公众参与程度

水文化与人类文明同步,公众参与程度可以反映人类水文化发展的程度,是对水资源行政管理的重要补充,可以调动公众在管理中的积极性,弥补行政管理的缺陷,提高管理的效率,从侧面反映地下水生态系统的健康状况。

将文中提到的主要的地下水生态健康评价指标参照相关的标准、文献和书籍等进行标准等级划分(表 2)。

4 评价方法

生态系统健康评价目前一般采用指示物种法和指标体系法这两种方法,考虑到地下水生态系统所具其它类型生态系统的共性与自身的特殊性,指示物种法不适合评价地下水生态系统健康,而能提供信息全面性和综合性的指标体系法和 3S 技术综合应用法是进行地下水生态系统健康评价的趋势^[35~37]:

通常采用的多指标综合评价方法是通过一定的数学模型将多个评价指标“合成”为一个整体性的综合评价价值。考虑到地下水生态系统具有层次复杂性、动态变化的随机性,系统往往存在不少模糊现象以及灰色信息,所以模糊综合评价法和灰色综合评价法在地下水系统健康评价中具有很广阔的前景;而对于小尺度的地下水生态系统健康问题亦可采用人工神经网络评价法,该方法具有自学习等智能化特点,能够用于统计资料较全、多层次、多方案综合评价,可以较好的模拟评价专家进行综合评价的过程;考虑到地下水生态系统是一个复杂的系统,有时单项指标间的评价结果往往是不相容的,而物元理论是解决矛盾和不相容问题的有力工具,所以利用该方法对地下水生态系统健康进行评价是可取的;而基于投影寻踪技术、遗传算法以及集对分析和粗集理论等的评价方法也具各自的适应范围,在分析地下水生态系统健康问题时宜可根据实际情况确定采用。

另外,综合应用 RS、GIS 和 GPS 等 3S 技术,以快速获取、分析研究基础数据,动态监测宏观生态系统健康状况,可大大提高对大尺度生态系统健康的分析和评价能力,应用到地下水生态系统健康评价中去是可行的,而且是未来主要的发展方向。

总之,由于选用不同的方法实际上是从不同的角度进行评判,每种方法都具有各自的优缺点,在应用中,可以根据实际情况选择多种评价方法,将其进行科学的组合达到取长补短的效果。而综合利用 3S 技术与多指标综合评价方法相结合是进行地下水生态健康评价的发展趋势。

5 结语

本文在提出地下水生态系统健康理念的基础上,从宏观上构建地下水生态健康指标体系,由于受现行研究资料所限,指标的选取以及评价等级的划分可能还不够成熟,该指标体系会随该领域以及相关领域研究的深入和扩大而得到逐步补充和完善。另外,在实际评价过程中,由于地下水生态系统的复杂性,研究尺度(空间尺度和时间尺度)在评价时就显得尤为重要,评价指标体系的构建和方法的选择都要根据研究区的具体情

况而定,否则很难对地下水生态系统健康有客观的分析和评价。

表 2 评价指标标准分级(参考)

Table 2 The standard classification of assessment indicators (for reference)

评价指标 Assessment indicators	很健康 Excellent health 0.8 ~ 1	健康 Health 0.6 ~ 0.8	亚健康 Sub-health 0.4 ~ 0.6	不健康 Unhealthiness 0.2 ~ 0.4	病态 Illness 0 ~ 0.2
1 包气带厚度(m) [28]	>5	4 ~ 5	3 ~ 4	2 ~ 3	<2
2 含水层导水系数(m ² /d) [28]	<100	100 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 800	>800
3 生态水位(2.5 ~ 4m) 偏离值(干旱区) [23 ~ 25]	0	<0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 1.5	>1.5
4 地下水矿化度(g/l) [24,25]	<2	2 ~ 3.5	3.5 ~ 5.5	5.5 ~ 10	>10
5 土壤总含盐量(%) (干旱区) [25] [29]	<0.55	0.55 ~ 0.73	0.73 ~ 0.87	0.87 ~ 1.35	>1.35
6 土壤含水量(%) [18]	6.27 ~ 7.84	4.71 ~ 6.27	3.14 ~ 4.71	1.57 ~ 3.14	<1.57
7 水土流失(%) [30 ~ 32]	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	>40
8 降水量(mm) [27,30]	1300 ~ 2000	1000 ~ 1300	800 ~ 1000	500 ~ 800	<500
9 地下水资源模数(10 ⁴ m ³ /(km ² ·a)) [33,34]	>20	13 ~ 20	8 ~ 13	4 ~ 8	<4
10 地下水供水比例(%) [26]	>60	40 ~ 60	20 ~ 40	10 ~ 20	<10
11 缺水率(%) [26]	<1	1 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	>15
12 地表水水质指标 [31,32]	>0.9	0.75 ~ 0.9	0.6 ~ 0.75	0.45 ~ 0.6	<0.45
13 地下水水质指标 [31,32]	>0.95	0.9 ~ 0.95	0.85 ~ 0.9	0.8 ~ 0.85	<0.8
14 工业废水达标处理率(%) [30]	>97.5	92.5 ~ 97.5	85 ~ 92.5	80 ~ 85	<80
15 生活污水处理率(%) [30,34]	>90	75 ~ 90	55 ~ 75	35 ~ 55	<35
16 节水灌溉率(%) [31 ~ 32]	>80	60 ~ 80	40 ~ 60	30 ~ 40	<30
17 工业用水重复率(%) [31,34]	>85	75 ~ 85	65 ~ 75	55 ~ 65	<55
18 植被覆盖率(%) [31,32]	>60	45 ~ 60	30 ~ 45	20 ~ 30	<20
19 水利环保投资比重(%) [31,32]	>3.5	2.74 ~ 3.5	1.47 ~ 2.74	0.7 ~ 1.47	<0.7
20 人均 GDP(10 ⁴ yuan/capita) [31,32]	>1.6	1.3 ~ 1.6	0.8 ~ 1.3	0.5 ~ 0.8	<0.5
21 科教经费占 GDP 的比重(%) [31,32]	>10	8 ~ 10	6 ~ 8	4 ~ 6	<4

对于地形坡度、含水层介质类型、包气带岩性、系统开放程度、产业结构优化水平、水务市场发育程度、系统管理水平以及公众参与程度等评价指标可采用经验评分法,利用专家意见近似实现其量化

Using expert advice, we can gain the experience scores of assessment indicators, including the topography, the aquifer medial, the vadose zone lithology, the degree of system openness, the level of the industrial structure optimization, the market development of the water industry, the administration level and the degree of public participation

1. Vadose zone thickness; 2. Transmissivity of aquifer; 3. Ecological groundwater table (2.5 ~ 4m) deviation value (arid area); 4. Groundwater salinity; 5. Total of soil salinity; 6. Soil moisture content; 7. Water and soil erosion; 8. Precipitation; 9. Groundwater resources module; 10. Percentage of groundwater supply; 11. Percentage of water shortage; 12. Surface water quality; 13. Groundwater quality; 14. Percentage of industrial wastewater treatment that quality reaches the national standard; 15. Percentage of sanitary sewage treatment; 16. Rate of water-saving irrigation; 17. Rate of industrial water repetition; 18. Proportion of investment in water conservancy and environmental protection; 19. Vegetation cover; 20. Per capita Gross Domestic Product; 21. Proportion of science and technology education funds

由于国内外对地下水生态系统健康评价的研究甚少,同时指标自身也受很多因素影响:在某一区域的不同时段的地下水生态健康指标阈值不是一个固定值;不同区域与地下水相关的生态健康问题也不尽相同,所以评价指标标准在应用的时候应该结合研究区具体情况划分合理的评价等级 Because we have few research on the assessment of groundwater ecosystem health at home and abroad, and the assessment indicators are affected by many factors: The indicator's threshold value is not a fixture in the different time; the question of the groundwater ecosystem health is also different in vary regions. Therefore, we should compartmentalize the reasonable evaluation standards to unify the area special details in practice

References:

- [1] Lin X Y, Liao Z S, Zhao Y S, Su X S. Modern hydrogeology. Beijing: Geology Press, 2005.5—10.
- [2] Ma K M, Kong H M, Guan W B, Fu B J. Ecosystem health assessment: methods and directions. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (12): 2106—2116.
- [3] Xiao F J, Ou Y H. Ecosystem health and its evolution indicator and method. Journal of Natural Resources, 2002, 17(2): 203—209.

- [4] Kong H M, Zhao J Z, Ma K M, Zhang P, Ji L Z, Deng H B, Lu Z H. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (4): 486—490.
- [5] Luo Y C, Zhou Z X, Sun Y, Deng H B, Zhang P, Wu G. Assessment methods of watershed ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (4): 1606—1614.
- [6] Wu L F, Ou Y Z, Tang D Y. The quantitative assessment of agro-ecosystem health on a regional dimension. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (12): 2740—2748.
- [7] Yu Y J, Guo H C, Liu Y, Jiang Y M, Li Y Q, Huang K. Syndromic city illnesses diagnosis and urban ecosystem health assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1736—1747.
- [8] Wang L X, Liu Z L, Liu H M, Wang W, Liang C Z, Qiao J, Nobukazu NAKAGOSHI. Assessment of typical steppe ecosystem health in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 544—550.
- [9] Schaeffer D J, Hen Ricks E E, Kerster H W. Ecosystem health: measuring ecosystem health. *Journal of Environmental Management*, 1988, 12: 445—455.
- [10] Xu W, Mage J A. A review of concepts and criteria for assessing agro ecosystem health including a preliminary case study of southern Ontario. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 83(3): 215—233.
- [11] Xu F, Jorgensen S E, Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modeling*, 1999, 116: 77—106.
- [12] Zektser S, Lodiciga H A, Wolf J T. Environmental impacts of groundwater overdraft: selected case studies in the southwestern United States. *Environmental Geology*, 2005, 47: 396—404.
- [13] Jinzhu Ma, Michael Edmunds W. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14: 1231—1243.
- [14] Cui B S, Yang Z F. Research advance of wetland ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 20(3): 31—36.
- [15] Zhao A Y, Xu F L, Zhan W, Hao J Y, Zhang Y, Zhao S S, Hu W H, Tao S. A quantitative method for assessing lake ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1466—1474.
- [16] The study team of CAS sustainable development strategy. China sustainable development strategy report 2007 — Water: Governance and innovation. Beijing: Science Press, 2007. 102—134.
- [17] Wen F B, Han Q W, Xu J X, Hu C H, Chen J Y, Li G Y, Dong Z R, Wang G Q. The concept and meaning of river health. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 140—150.
- [18] Huang H P, Yang J, Song B Y, Bao T J. Ecosystem health assessment of the hilly and gully area of Loess Plateau in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1048—1056.
- [19] Gao Y S, Wang H, Wang F. Construction of evaluation index system for river's healthy life. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 252—257.
- [20] Cui B S, Yang Z F. Wetlands. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006. 12. 356—423.
- [21] Sun C Z, Pan J. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect. *Advances in Water Science*, 1999, 10(4): 444—449.
- [22] A discussion of the assessment of ground water vulnerability in epikarst zone of the karst area. *Southwest China Earth Science Frontiers*, 2005, 12 (Suppl): 152—158
- [23] Sun C Z, Liu Y L, Yang J. Research on the ecological and sustainable groundwater table regulation in the lower Liaohe River plain. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(2): 249—254.
- [24] Wang S, Feng P, Li J Z. The studying situation of eco-environmental control index for groundwater. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(4): 98—103.
- [25] Zhang C C, Shao J L, Li C J, Cui Y L. Eco-environmental effects on groundwater and its eco-environmental index. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 3: 6—10.
- [26] Li S H, Zhou Y K. Discussion on the security assessment of water resources in arid areas in northwest China — A case study in Yuli county, Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Arid Zone Research*, 2004, 21(3): 230—234.
- [27] Zhang J Y, Wang G Q. Studies for the climate change impacting on hydrology and water resources. Beijing: Science Press, 2007. 178.
- [28] Wang D C, Editor-in-chief. *Hydrogeology basis (Version 7)*. Beijing: Geological Publishing House, 2006. 15—150.
- [29] Xia J, Zheng D Y, Liu Q E. Study on Evaluation of Eco-water Demand in Northwest China. *Hydrology*, 2002, 22(5): 12—17.
- [30] Yan L, Wang J K, Huang H. An Assessment of Ecosystem Health in Dongxi River Basin based on PSR Framework. *Resources Science*, 2008, 30 (1): 107—113.
- [31] Jiao Y, Zhang G L, Editor-in-chief. Moving forward on modernization of China water resources — Water development's Tenth Five-Year Plan and

the 2010 compilation of planning. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2004. 57—630.

- [32] Xie Z H, Editor-in-chief. National Security Strategy of the environment. Beijing: China Environmental Science Press, 2005. 59—112.
- [33] Chen S Y, Li M. Assessment model of water resources reproducible ability based on variable fuzzy set theory. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 431—435.
- [34] Yang X H, Yang Z F, Shen Z Y. Genetic projection pursuit method for evaluating water resources reproducible ability. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 73—76.
- [35] Du D, Pang Q H. Modern comprehensive evaluation methods and case selection. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 138—145.
- [36] Li Z Y, Ding J, Peng L H. Assessment principles and methods for environment quality. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 163—332.
- [37] Peng J, Wang Y L, Wu J S, Zhang Y Q. Evaluation for regional ecosystem health: methodology and research progress. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4877—4885.

参考文献:

- [1] 林学钰, 廖资生, 赵勇胜, 苏小四. 现代水文地质学. 北京: 地质出版社, 2005. 5—10.
- [2] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. 生态学报, 2001, 21(12): 2106—2116.
- [3] 肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法. 自然资源学报, 2002, 17(2): 203—209.
- [4] 孔红梅, 赵景柱, 马克明, 张萍, 姬兰柱, 邓红兵, 陆兆华. 生态系统健康评价方法初探. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486—490.
- [5] 罗跃初, 周忠轩, 孙铁, 邓红兵, 张萍, 吴钢. 流域生态系统健康评价方法. 生态学报, 2003, 23(4): 1606—1614.
- [6] 武兰芳, 欧阳竹, 唐登银. 区域农业生态系统健康定量评价. 生态学报, 2004, 24(12): 2740—2748.
- [7] 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 姜玉梅, 李艳秋, 黄凯. 城市病诊断与城市生态系统健康评价. 生态学报, 2008, 28(4): 1736—1747.
- [8] 王立新, 刘钟龄, 刘华民, 王伟, 梁存柱, 乔江, 中越信和. 内蒙古典型草原生态系统健康评价. 生态学报, 2008, 28(2): 544—550.
- [14] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论. 生态学报, 2002, 22(7): 1005—1011.
- [15] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 郝君宜, 张颖, 赵珊珊, 胡维平, 陶澍. 湖泊生态系统健康定量评价方法. 生态学报, 2005, 25(6): 1466—1474.
- [16] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2007 中国可持续发展战略报告——水: 治理与创新. 北京: 科学出版社, 2007. 102—134.
- [17] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 胡春宏, 陈吉余, 李国英, 董哲仁, 王光谦. 河流健康的定义和内涵. 水科学进展, 2007, 18(1): 140—150.
- [18] 黄和平, 杨杰, 宋炳煜, 包铁军. 内蒙古黄土丘陵沟壑区生态系统健康评价. 生态学报, 2005, 25(5): 1048—1056.
- [19] 高永胜, 王浩, 王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建. 水科学进展, 2007, 18(2): 252—257.
- [20] 崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006. 356—423.
- [21] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景. 水科学进展, 1999, 10(4): 444—449.
- [22] 邹胜章, 张文慧, 梁彬, 陈宏峰, 梁小平. 西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨. 地学前缘, 2005, 12(特刊): 152—158.
- [23] 孙才志, 刘玉兰, 杨俊. 下辽河平原地下水生态水位与可持续开发调控研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 249—254.
- [24] 王嵩, 冯平, 李建柱. 地下水生态环境控制指标问题的研究现状. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 98—103.
- [25] 张长春, 邵景力, 李慈君, 崔亚莉. 地下水位生态环境效应及生态环境指标. 水文地质工程地质, 2003, 3: 6—10.
- [26] 李书恒, 周寅康. 中国西北干旱地区水资源安全评价初探——以新疆尉犁县为例. 干旱区研究, 2004, 21(3): 230—234.
- [27] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究. 北京: 科学出版社, 2007. 178.
- [28] 王大纯, 主编. 水文地质学基础(第7版). 北京: 地质出版社, 2006. 15—150.
- [29] 夏军, 郑冬燕, 刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题研讨. 水文, 2002, 22(5): 12—17.
- [30] 颜利, 王金坑, 黄浩. 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价. 资源科学, 2008, 30(1): 107—113.
- [31] 矫勇, 张国良, 主编. 向现代化迈进的中国水利——水利发展第十个五年计划和 2010 年规划汇编. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. 57—630.
- [32] 解振华, 主编. 国家环境安全战略. 北京: 中国环境科学出版社, 2005. 59—112.
- [33] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型. 水利学报, 2006, 37(4): 431—435.
- [34] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶, 酆建强, 金菊良. 水资源可再生能力评价的遗传投影寻踪方法. 水科学进展, 2004, 15(1): 73—76.
- [35] 杜栋, 庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选. 北京: 清华大学出版社, 2005. 138—145.
- [36] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法. 北京: 化学工业出版社, 2004. 163—332.
- [37] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与进展. 生态学报, 2007, 27(11): 4877—4885.