

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



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

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 ₂ 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)
专论与综述		
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)
问题讨论		
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)
研究简报		
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)



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的鸥种,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/stxb201106270949

孙才志, 杨磊. 基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(4): 1016-1027.

Sun C, Yang L. Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1016-1027.

基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水 生态系统健康评价

孙才志^{1,2,*}, 杨磊¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029; 2. 辽宁省自然地理与空间信息科学重点实验室, 大连 116029)

摘要:地下水生态系统是生态系统的重要类型, 随着社会经济的发展, 地下水资源与环境压力日益增大, 地下水生态系统健康问题已经成为人类重点关注的环境问题之一。以 ArcView 为平台, 以下辽河平原硝酸盐氮浓度为响应因子, 并从地下水系统结构特征、区域自然条件、外界压力、资源与保护和生态环境 5 个方面建立证据因子的图层数据库, 利用证据权重法 (WOE) 对下辽河平原地下水生态系统健康进行评价, 得到硝酸盐氮后验概率分布图。结果表明: 下辽河平原的西北、东北部、东南部及抚顺和辽阳地区地下水生态系统健康处于相对高和较高概率区, 东部山前冲洪积平原及下辽河平原的周边地区处于中等概率区, 下辽河平原的中部平原、南部滨海平原地区处于相对低和较低概率区。将地下水水质监测点硝酸盐氮含量与后验概率分布图进行对比分析, 发现二者对应性较好, 这说明 WOE 可以用于地下水生态系统健康评价, 其概率表现形式能够有效的弥补传统生态系统健康评价结果是一个具体值 (或等级) 而无法反映生态系统健康不确定性的不足。

关键词:地下水生态系统; 下辽河平原; 生态健康评价; 证据权重法

Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique

SUN Caizhi^{1,2,*}, YANG Lei¹

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

2 Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Groundwater is an important part of the worldwide ecosystem, and is also a core part of the global water cycle. Groundwater is a key influence on the ecological system in arid and semi-arid regions of northwest China, and is the primary source of water for human use in northern China. With recent economic growth, rapid development of the groundwater resources in this region is occurring. The groundwater has been and is being seriously depleted and some unhealthy characteristics and vulnerabilities in the system, which are significantly impacting the ecology of the area, are becoming apparent. The ecological health of groundwater systems has become a serious issue in ecology, and is receiving considerable attention from the general public.

An ecological health assessment of a groundwater system can be used to facilitate the protection of the environment and encourage sustainable development of groundwater resources. This paper provides a case study in the lower Liaohe River alluvial plain, which is in the most economically developed region of Liaoning Province. The area is experiencing significant water shortages.

Ten evidence factors were identified to describe the attributes of the ecological health of the groundwater system. These

基金项目: 国家自然科学基金 (40501013); 辽宁省优秀人才项目 (LR2010021)

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-10-31

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

evidence factors were based on five aspects of the groundwater system including: (1) characteristics of the local groundwater system; (2) natural conditions in the region; (3) external pressures including human-induced pressures; (4) available resources and conservation; and (5) the local ecological environment. The nitrate concentration in fifty-three groundwater monitoring wells in the study area was used as the response, because the nitrate concentration is a typical indicator of groundwater pollution.

In this paper we took used the ArcView GIS software as the assessment platform, and used the weights of evidence (WOE) method to assess the ecological health of the groundwater system in the lower Liaohe River plain. A posteriori probability map of the nitrate concentration was generated, and the probabilities were divided into five categories, defined as (1) low probability; (2) moderately low probability; (3) moderate probability; (4) moderately high probability; and (5) high probability, with probability ranges of 0.000—0.005, 0.005—0.015, 0.015—0.233, 0.233—0.490 and 0.490—0.832, respectively.

The result indicate that high and moderately high probability regions include the northwest, northeast and southeast of the lower Liaohe River plain, as well as Liaoyang and Fushun cities. The eastern alluvial floodplain and its surroundings belong to the moderate probability region; and the low and moderately low probability regions include the middle and southern coastal plain areas. The proportions of the study area in each probability category are: 34.02% low probability; 23.81% moderately low probability; 34.31% moderate probability; 3.81% moderately high probability; and, 4.05% high probability.

A comparison analysis between the posteriori probability map of nitrate concentrations and the measured concentrations in monitoring wells found a very good correlation. This indicates that the assessment results are valid, and the WOE method can be successfully applied to assess the ecological health of a groundwater system. Further, the results of the WOE method are probabilities, while traditional ecological health assessment methods provide a determined value (or degree), which does not accurately reflect the stochastic characteristics of ecological system health. The WOE method provides a more accurate reflection of ecological health.

Key Words: groundwater ecological system; Lower Liaohe River Plain; ecological health assessment; weights of evidence

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,地下水系统滋养着生态系统,两者之间存在密切的依附关系^[1-2]。地下水因其具有水质好、分布广泛、并且便于就地开采等特点而成为我国约 2/3 城市的主要供水水源,尤其在在我国北方地区,以地下水为主要供水水源的地区已经达到 80% 以上。在我国西北干旱和半干旱地区,降水稀少,地下水与植被生态关系尤为密切,水文地质条件往往控制着植被种群的分布格局,成为影响植被生态的主控因素之一^[2-3]。随着社会经济的发展,地下水资源与环境压力日益加大,地下水生态系统健康的破坏越来越严重^[4],尤其是在以地下水为主要供水水源的北方地区表现的尤为突出,因此科学评价地下水生态系统健康,对于合理开发利用地下水资源与保护地下水生态系统具有重要的现实意义。

迄今为止,在生态系统健康方面,国内外学者们在城市^[5-6]、湖泊与水库^[7-8]、河流^[9-10]、湿地^[11-12]、森林^[13-14]、农田^[15]、海岸带^[16-17]等领域的评价方法、指标体系及评价实践的研究等方面取得了丰富的研究成果。国外在这些领域的研究主要有:1988 年, Schaeffer 等^[18]首次探讨了有关生态系统健康度量问题;1989 年 Rapport^[19]论述了生态系统健康的内涵,这两篇文献成为了生态系统健康研究的先导;Trudy Harpham^[20]从城市公共健康角度研究了冈比亚(Gambia)的城市健康状况;Constanza^[21]提出了生态系统健康概念,并得到广泛认可,共涵盖 6 个方面:自我平衡、没有病征、多样性、有恢复力、有活力和能够保持系统组分间的平衡,并强调生态系统健康恰当的定义应当是上面 6 个概念结合起来。也就是说,测定生态健康应该包括系统恢复力、平衡能力、多样性和活力;其他学者在森林、河流、农田等不同类型的生态系统等领域的生态健康评价也迅速展

开^[22-23],使生态系统健康作为全球管理的新目标,作为分析生态系统的新方法开始广泛受到关注。如今,在国际上生态系统健康研究正在日益成为研究的热点;国内学者对生态系统的研究主要有:2004年刘永等^[8]对湖泊生态系统健康的评价方法进行了研究,2007年杨曾平等^[15]对农田生态系统健康评价的指标研究进展进行了研究,2003年肖风劲等^[24]对森林生态系统健康评价指标体系进行了研究,2002年崔保山等^[25]对湿地生态系统健康评价的指标体系进行了研究等。

目前国内外对城市、森林及河流等类型的生态系统健康研究较为成熟,然而对地下水生态系统健康的研究涉足较少,其理论也不够完善和成熟,成果也不多,研究领域主要包括地下水生态环境恢复需水量估算的研究^[26],地下水生态功能的探讨^[27],地下水生态水位的估算方法研究^[28],地下水区域尺度遥感监测模型的研究^[29],地下水生态系统健康评价指标体系的构建的研究^[1]等。“生态水文地质学”概念的出现,首次系统地将水文地质的概念引入到生态系统中,促使人类社会认识地下水与生态环境之间关系的重要性。目前该领域主要借鉴传统的生态水文学理论与方法,加之生态原理及过程的复杂性,这些研究往往是用定性的语言和统计数据来描述,而不是传统水文学上的定量方法和确定性模型,研究多是从一个方面或角度来研究地下水的生态功能,建立在多种因素耦合基础上的地下水生态系统健康评价的研究成果尚不多见。

下辽河平原是辽宁省老工业基地的核心地区,也是东北最缺水地区,研究区所面临的水资源和环境问题在我国东北乃至北方地区具有典型性和代表性,目前地下水资源在该区整个供水系统中一直占有65%左右的比例,地下水开发利用程度较高,由此产生了大量的环境水文地质问题,这些问题具有种类齐全(研究区边缘的水土流失尚未得到有效的遏制,水土流失面积占边缘总土地面积的38.5%;劣质水体-高氟、低碘、高矿化水广布;辽河三角洲的湿地萎缩与污染日趋严重;沈阳市地下水漏斗面积已经达到400 km²;下辽河平原每年污染物排放量达到38.4万t;沈阳、鞍山城市的地面沉降仍在发展中;平原中部盐渍化面积6260 km²,占平原区面积的24%)、强度大(其中仅辽河柳河口以下部分地下水氨氮污染面积为5121 km²,占86.0%;硫酸盐污染面积为75 km²,占1.3%;氯化物污染面积为3317 km²,占55.7%;硝酸盐氮污染面积为2447 km²,占41.1%。亚硝酸盐氮污染面积为1268 km²,占21.3%)。在129655万m³地下水供水总量中,Ⅳ类水24139万m³,Ⅴ类水105516万m³)、频率高(近年来,受气候干旱和不合理的人类经济活动影响,下辽河平原沿河两岸及沿海地区河滩裸露,农田沙化等土地沙漠化趋势日益明显,洪水、干旱等灾情连年频发)的特点,已经成为制约辽宁省老工业基地振兴的重要因素之一。

鉴于地下水生态系统健康对研究区社会发展的重要性及紧迫性,在准确把握地下水生态系统健康内涵的基础上,综合多种因素,应用ArcView-WOE法对下辽河平原地下水生态系统健康进行评价,研究成果对于保护下辽河平原生态环境、实现水资源利用和经济协调发展具有重要的实用价值。

1 地下水生态系统健康的概念及内涵

“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^[30-32],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^[7,25,33-39]、总结前人研究的基础上,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5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;四是时空尺度性,即地下水生态系统健康既包括从短期到长期的时间尺度,也包括从地方到区域的空间尺度;五是可持续性,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。

评价地下水生态系统健康就是通过衡量地下水生态系统的健康程度,为增强区域地下水生态系统环境容量的恢复力,维持生产力并保护其为人类服务的功能提供借鉴,同时为一些重大水事活动提供科学的依据。

2 评价方法与数据来源

2.1 评价方法

证据权重法(Weights of evidence,简称 WOE)是加拿大数学地质学家 Agterberg 等提出的一种基于二值(存在或不存在)图象的地质统计方法,是在假设条件独立的前提下,基于贝叶斯定理的一种定量预测方法^[40]。我国学者丁清峰等称之为“专家证据权重法”^[41-42],其原理与统计证据权重法一样,都是以证据权重模型为基础,但二者之间又有着本质的区别:前者建立模型的证据因子权重是由地质专家根据知识系统人为设定的,且无须对证据因子进行条件独立性检验;后者建立模型的证据因子需满足条件独立性检验,且其权重是根据已知矿床(点)统计出来的。相对于其他方法而言,证据因子权重的解释通俗易懂,计算结果后验概率即为成矿概率,直观明了,显示出实用、易用等优点。WOE 作为基于 GIS 的矿产资源评价的主要方法之一,目前在世界各国都得到了广泛的应用。Harris^[43]、Ranjana^[44]等都先后应用该方法预测矿产的远景分布,Barber^[45]等首次将 WOE 方法用于区域地下水脆弱性的研究,Alberti^[46]等用该方法对意大利北部一个地区进行地下水脆弱性评价,雷静^[47]于 2003 年在国内首次应用该模型进行唐山市平原区地下水脆弱性评价,孙才志^[48]于 2009 年应用 WOE 法对下辽河平原地下水硝酸盐氮特殊脆弱性进行了研究。上述研究均取得较好的研究成果,但此方法尚未应用到地下水生态系统健康评价中。地下水生态系统健康评价就其实质来说应该属于一种风险型决策问题,其主要的功能是发挥预警功能,传统的生态系统健康评价结果往往是一个具体的评价价值(或等级),这无法反映生态系统健康的随机不确定性特点,而 WOE 模型评价结果是以风险概率形式表现的,可以有效地弥补这个不足。有鉴于此,本文首次将该方法应用于地下水生态健康评价的研究上,应用 WOE 方法分析证据因子和响应因子之间的统计关系,结合 GIS 技术获得研究区的地下水生态系统健康后验概率图,从而为该区地下水资源可持续开发利用提供参考。

地理信息系统(Geographic Information System,简称 GIS)技术可以对地理空间数据和信息实现输入、存储、管理、检索、处理和综合分析等功能,已经广泛地用于各个领域。由于 GIS 技术日趋成熟,具有了综合分析和进行空间建模的能力,而且可以随时修改与更新数据库,使评价过程变得简便、容易^[49],从而可以为地下水生态系统健康的研究提供了有力的支持,必将极大地推动地下水生态系统健康研究的发展。

论文以 ArcView 软件为平台,利用 Arc-SDM 扩展模块,应用 WOE 方法(证据权重法)对下辽河平原区地下水生态系统健康进行了研究。鉴于地下水中硝酸盐氮浓度是反映地下水受到污染的最典型指标,而遭受污染的地下水必然会对地下水相应生态功能的正常发挥产生不利影响,因此论文选取硝酸盐氮浓度为响应因子,并根据研究区的具体情况及其所获得数据的情况选用保护层等 10 个参数为证据因子,得到硝酸盐氮浓度后验概率分布图。

2.2 数据来源

根据研究区相关资料的实用性、可获取性,并考虑到生态环境问题的形成与发展往往是周围环境各因子共同作用的结果,就区域环境因子而言,在一定时段内不会发生显著变化,同时收集的资料有县级行政区的,也有市一级的,所以本研究将所有涉及分析、运算的数据都统一转成一系列的二值图,作为基本的空间地理单元进行运算。相关的属性、空间数据,主要来源于《辽宁省国土资源地图集》、《辽宁省水资源公报》(2000—2009 年)、《辽宁省统计年鉴》和《中国城市统计年鉴》(2001—2009 年)、研究区内地下水钻孔记录、地下水水

质、水位实测数据等,并运用 MapInfo7.0、ArcView3.3 等软件进行图像处理。

3 地下水生态系统健康评价的证据因子

论文以地下水生态系统健康内涵为依据,以维持地下水系统的生态环境健康为最终目标,论文从地下水系统结构特征、区域自然条件、外界压力、资源与保护和生态环境 5 个方面选取了 10 个证据因子。

(1) 保护层

该因子指的是含水层上覆包气带特征,按包气带特征,将保护层分为厚的(大于 3 m)、中等的(1—3 m)和薄的(小于 1 m)三级;其次,按含水层自净能力和补、径、排条件,分为自净能力强的、中等的和弱的三级;综合考虑包气带厚度与自净能力两方面因素,在整个研究区内将保护层分为 6 个区:Ⅰ基岩裸露自净能力弱;Ⅱ无保护层自净能力中等;Ⅲ保护层厚度中等自净能力弱;Ⅳ保护层不稳定自净能力中等;Ⅴ保护层厚自净能力中等;Ⅵ保护层厚自净能力强^[50]。

(2) 含水层厚度

下辽河平原的山前坡洪积平原上,其含水层的厚度小于 20 m,呈透镜体状分布;在山前冲洪积扇及扇前平原上,含水层的厚度在 40—60 m 之间,最厚可达 80—120 m;中部冲积平原含水层厚度逐渐变大,在新民以北柳河冲积平原上,其含水层厚度在 20—40 m 之间,新民以南地区的厚度为 180 m;台安以南至滨海地带,含水层厚度大,但颗粒变细。由于含水层的厚度直接决定地下水的储水量,反映了地下水稀释能力的强弱,含水层越薄,对污染物的稀释能力越弱,其地下水系统受到的污染潜势越大,地下水生态系统健康就越差。

(3) 含水层渗透系数

含水层渗透系数反映了含水层介质的渗透性和水力传输性能,其值越大,污染物在含水层内的迁移速度越快,地下水生态系统健康就越差。相反地,渗透系数越小,地下水生态系统健康就越好。该参数与含水层岩性密切相关,下辽河平原的山前坡洪积平原上,含水层岩性主要为砂碎石和砂砾石,其渗透系数小于 5 m/d;山前冲洪积扇及扇前平原上,含水层依次为砾卵石、砂砾石和中粗砂含砾等,其渗透系数在 5—10 m/d 之间;中部冲积平原含水层颗粒变细,新民以北柳河冲积平原,含水层以中细砂为主,新民以南为粉细砂,其渗透系数大于 20 m/d。

(4) 地下水实际埋深与生态水位偏离值

该指标指的是实际地下水位埋深与地下水生态水位埋深差值的绝对值。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。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,内陆盆地大多数植物适宜生长的合理生态水位为 2.0—4.5 m。实际埋深与生态水位偏离值越大,地下水生态功能越弱,其地下水生态系统健康就越差。该指标取自参考文献^[28]。

(5) 地下水开采程度

该指标指的是地下水开采量与可开采量的比值。过量开采地下水造成研究区地下水水位持续下降,并形成许多地下水降落漏斗,将会导致地面沉降,土壤沙化、地下水矿化度增高等环境水文地质问题。因此,将地下水开采程度作为评价地下水生态系统健康的一个证据因子。地下水开采程度越大,其地下水生态系统健康就相对越差,数据为多年平均开采程度。

(6) 施肥强度

该指标指的是单位面积上的施肥量。下辽河平原作为省内最重要的商品粮基地,农业非常发达,农业污染也较为严重,尤其是化肥的大量使用使得其地下水中氮浓度不断增加,这对当地居民及生态环境的健康都产生了不利影响。施肥强度越大,含水层中氮的浓度相应越大,地下水生态系统健康相应地就越差。因此,将施肥强度作为评价地下水生态系统健康的一个证据因子,数据为多年平均施肥强度。

(7) 降水量

降水是水循环过程的最基本环节,是本区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,研究区内降水量自东南(580—710 mm)向西北(350—468 mm)逐渐递减,是影响地下水生态系统健康的一个非常重要的评价因子,数据为多年平均降水量。

(8) 工业废水排放达标率

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,反映人类对工业排放污水的处理程度,是越大越优型的指标,数据为多年平均工业废水排放达标率。

(9) 水网密度指数

水网密度指数是指评价区域内河流总长度、水域面积和水资源量与评价区域的面积比。水在生态系统中具有重要作用,是生态系统物质流与能量流的重要载体,也是人类社会生活必不可少的物质,尤其在西部干旱、半干旱生态系统中,水是生态系统的决定因素,水网密度指数越好,地下水生态系统健康状况越好。该证据因子用公式表示为:

水网密度指数 = A_{riv} × 河流长度 / 区域面积 + A_{lak} × 湖库(近海)面积 / 区域面积 + A_{res} × 水资源量 / 区域面积
式中, A_{riv} , 河流长度的归一化系数; A_{lak} , 湖库面积的归一化系数; A_{res} 水资源量的归一化系数。

(10) 地下水矿化度

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。因此,将地下水矿化度作为下辽河平原地下水生态系统健康评价的一个证据因子,数据为多年平均矿化度值。

4 实证研究

4.1 研究区概况

下辽河平原呈北东—南西方向宽带状斜卧在辽宁省的中部,东依千山山脉,西靠医巫闾山,北部隔铁法波状丘陵与松辽平原相望,南临渤海的辽东湾。东西宽 120—140 km,南北长 240 km,面积约 2.65 万 km²,行政区划隶属于辽宁省铁岭市、沈阳市、抚顺市、辽阳市、鞍山市、营口市、盘锦市、锦州市和阜新市(图 1)。平原地势由东西两侧向中部地区倾斜,由北往南逐渐低平,表面平坦开阔,标高在 50 m 以下。在南部滨海地带,由于地势低洼,经常受潮汐影响和洪涝威胁,沼泽化、盐渍化十分严重。

4.2 评价结果分析

论文以 ArcView GIS 软件为平台,通过 Arc-wofe 系统与证据权重法的结合,对下辽河平原地下水生态系统健康进行了研究,选用保护层等 10 个参数为证据因子,以硝酸盐氮浓度为响应因子,得到硝酸盐氮浓度后验概率分布图。

首先,对各证据因子层权重计算,各证据因子层权重数值大小主要根据已知监测井与证据因子之间的空间分布关系来确定。各证据因子的权重结果如表 1。

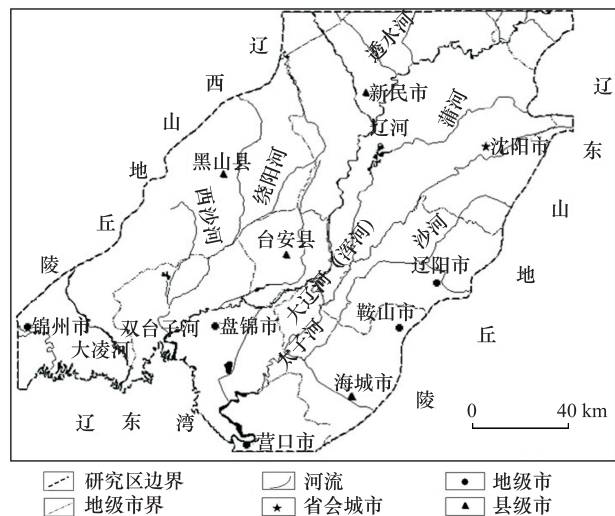


图 1 下辽河平原地理位置图

Fig. 1 The geographic location map of the lower Liaohe River plain

表 1 保护层证据因子层权重

Table 1 weights of the evidence factor for protection

分类 Classification	A /km ²	P	W ⁺	S(W ⁺)	W ⁻	S(W ⁻)	Contrast	S(C)	Stud(C)
1	8502.5598	15	-0.2227	0.2584	0.1009	0.1603	-0.3235	0.3041	-1.0639
3	3084.1700	9	0.2817	0.3338	-0.0479	0.1492	0.3297	0.3657	0.9016
5	5118.4098	6	-0.6320	0.4085	0.1167	0.1445	-0.7488	0.4333	-1.7281
7	4480.9521	7	-0.3445	0.3783	0.0632	0.1460	-0.4077	0.4055	-1.0055
9	3323.2166	16	0.8453	0.2432	-0.2328	0.1645	1.0781	0.2936	3.6720

A 表示证据因子中每类所占的面积 Area of each evidence factor class; P 表示证据因子每类中的监测点数 Monitoring points of each evidence factor class; W⁽⁺⁾ 表示证据因子每类存在处的权重值 Evidence factor Weight with its existence; W⁻ 表示每类不存在处的权重值 Evidence factor Weight without its existence; S(W⁺) 表示 W⁺ 的标准差 Standard deviation of W⁺; S(W⁻) 表示 W⁻ 的标准差 Standard deviation of W⁻; Contrast = W⁺ - W⁻; S(C) 表示 Contrast 的标准差 Standard deviation of Contrast; Stud(C) = (W⁺ - W⁻) / S(C)

研究中各证据因子的分布图都是多值图而不是真正意义上的二值图,不能简单地由各证据因子的一对正负权重差 C = W⁺ - W⁻ 来推断各因子对响应因子影响的相对大小,但是由各证据因子正权重 W⁺ 达最大值的属性分类叠加而成的情况即是使得响应因子后验概率达最大值的情况,也即对硝酸盐氮这种特定污染物来说地下水生态健康最差的情况,这种情况下各证据因子正权重的相互大小可以在一定程度上反映各证据因子对响应因子的影响大小,由表 2 可知各证据因子正权重的最大值,响应因子后验概率达最大时施肥强度、降水量、工业废水排放达标率和地下水实际水位与生态水位偏离值的权重最大,对地下水生态健康的影响最大,其次是地下水开采程度、保护层、地下水矿化度和含水层厚度,最小的是含水层渗透系数和水网密度指数。

表 2 证据因子正权重最大值表

Table 2 the maximum positive weights of evidence factors

证据因子 Evidence factor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
W ⁺ 最大值 Maximum value of W ⁺	2.7327	1.0217	0.8506	1.9075	0.4542	0.6993	1.0518	0.7003	0.8453	0.2140

A: 施肥强度 Fertilizing intensity; B: 地下水实际埋深与生态水位偏离值 Deviation between real and ecological groundwater level; C: 地下水开采程度 Groundwater development degree; D: 降水量 Rainfall; E: 含水层渗透系数 Aquifer permeability; F: 含水层厚度 Aquifer thickness; G: 工业废水排放达标率 The reaching standard rate of industry waste water; H: 地下水矿化度 Total dissolved solids of groundwater; I: 保护层 Protection layer; J: 水网密度指数 Water network density

然后,进行条件独立性检验,在进行后验概率计算之前,必须检验所选证据因子间相对于监测井分布的条件独立性。本次证据权重分析的条件独立检验结果如表 3 所示。表格中的数值表示证据因子关于监测井点的条件独立性检验概率值,数值越小,表示两相交专题间相对于井点分布的条件独立性越好。从表 3 可以看出,10 个证据因子之间的相关性都很小,均可以参与后验概率计算。

最后对研究区的硝酸盐氮后验概率进行计算,得到硝酸盐氮浓度后验概率分布图(图 2)。由图 2 可以看出,下辽河平原的西北、东北部、东南部及抚顺、辽阳地区地下水生态系统健康处于相对高和较高概率区,地下水环境较差,由于这些地方发展重工业,工业用水量较大,对地下水的需求量也非常大,进而地下水的开采强

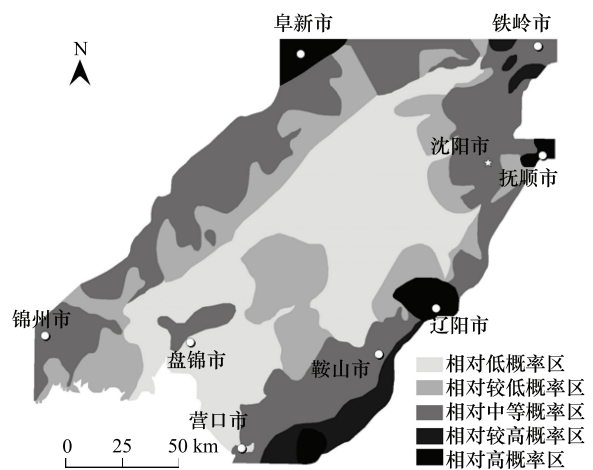


图 2 下辽河平原地下水生态系统健康后验概率分布图

Fig. 2 Posteriori probability distribution map of groundwater system ecological health in the Lower Liaohe river plain

度大,工业废水排放达标率低,导致地下水环境较差,此外,在下辽河平原的西北部由于自然条件较差,降水量较少,气候干旱,地下水补给量小,生态水位偏离值大等原因也加剧了地下水环境的恶化,此区域地下水循环系统遭受破坏的程度较高,地下水生态系统健康遭破坏,最终导致这一地区的地下水生态系统健康相对概率高。

东部山前冲洪积平原及下辽河平原的周边地区地下水生态系统健康处于中等概率区,由于下辽河平原的周边地区含水层厚度较薄,水网密度小等因素使得该区域地下水生态系统健康较差,沈阳和辽阳市由于对地下水开采过量,产生了地下水降落漏斗,并且问题严重,污水沿漏斗进入地下,对地下水造成污染,导致地下水生态系统健康被破坏。由于经济发展而对地下水的开采强度过大,工业废水排放达标率过低等因素使得东部山前冲洪积平原区的地下水生态系统健康处于中等概率区。

表 3 证据因子条件独立性检验结果

Table 3 The independence test results of the ten evidence factors

证据因子 Evidence factor	A	B	C	D	E	F	G	H	I
J	0.0000	0.0187	0.3996	0.4494	0.0000	0.0000	0.0000	0.0939	0.0000
A		0.0043	0.0000	0.4361	0.5811	0.1779	0.0000	0.0000	0.5395
B			0.7460	0.0219	0.0485	0.0000	0.1408	0.3365	0.0012
C				0.0000	0.3319	0.0020	0.0000	0.0000	0.6254
D					0.3144	0.0282	0.0000	0.0000	0.2159
E						0.0007	0.3472	0.0006	0.0000
F							0.4536	0.1402	0.0000
G								0.0000	0.1310
H									0.0000

下辽河平原的中部平原、南部滨海平原地区处于相对低和较低概率区,在下辽河平原的中部地区地势低平,致使该区经常有内涝灾害发生,但是人口密度过大,社会经济发展带来的工业污染和施肥强度大及地表水水质恶化等原因对地下水生态系统有较大的破坏,但该区地下水资源量、含水层厚度和水网密度指数均较大,因此该区地下水生态系统健康处于相对低和较低概率区。在南部滨海平原地区由于地下水天然补给量大,水资源丰富,但是此区域主要为农业灌溉用水,施肥强度大,内涝盐碱灾情较严重及地下水资源的矿化度较高,并且海水入侵问题较大,对地下水生态系统健康影响较大,应引起注意。

通过 ArcViewGIS 软件自动生成下辽河平原地下水生态健康后验概率图及各概率分区的区间范围,并由此分析得出,各概率区占的研究区总面积的比重如表 4。

表 4 下辽河平原地下水生态健康后验概率划分及面积比重

Table 4 Posteriori probability classification of groundwater system ecological health and area percentage of various probability

	后验概率区 Posteriori probability zone				
	相对低概率区 (0.000—0.005)	相对较低概率区 (0.005—0.015)	相对中等概率区 (0.015—0.233)	相对较高概率区 (0.233—0.490)	相对高概率区 (0.490—0.832)
比重/%	34.02	23.81	34.31	3.81	4.05

在各类概率区中,中等以上的概率区最为危险,由表 4 可以看出,下辽河平原地下水生态健康后验概率在中等以上的区域占研究区总面积的 42.17%,可见地下水生态健康的问题已不容小视,应当引起高度重视。

将研究区 53 个监测井的实测硝酸盐氮浓度资料与下辽河平原地下水生态健康的硝酸盐氮浓度后验概率分布图进行对比分析,图 3 是以硝酸盐氮后验概率分布图为基础显示了各监测井实测硝酸盐氮浓度的分布情况。

从表 5 的统计结果可以看出:53 个监测井中有 12 个硝酸盐氮浓度小于 2 mg/L,其后验概相对低的有 1

个,较低的有 4 个,相对中等的有 4 个,相对较高的有 2 个,相对高的有 1 个,18 个监测井的硝酸盐氮浓度大于 20 mg/L,其中有 6 个监测井为中等概率,3 个监测井的浓度为较高概率区,8 个监测井的浓度为高概率区,分布在低或者较低概率区的多数为低浓度水平的硝酸盐氮监测井,而分布在中等及较高或高概率区得大多数为硝酸盐浓度超标井,各后验概率区内分布的监测井的硝酸盐氮浓度超标率各不相同,其中高概率区最高,达到 61.5%,其次是较高概率区达 50%,而低概率区为 0。大于 30 mg/L 的监测井数占本概率区中所有监测井数的百分率各不相同,其中,较低概率区数值为 12.5%,而低概率区为 0,由此可知,后验概率的分布情况与监测井硝酸盐浓度的超标率和硝酸盐浓度大于 30 mg/L 监测井所占百分数的分布情况基本一致,超标率较高的地区和大于 30 mg/L 所占百分数大的地区正是后验概率较高的地区,因此,硝酸盐氮后验概率分布图能较好地反映研究区内各地硝酸盐氮的浓度水平,由此可见,应用 ArcView-WOE 方法对下辽河平原地下水生态系统健康进行评价具有可行性。

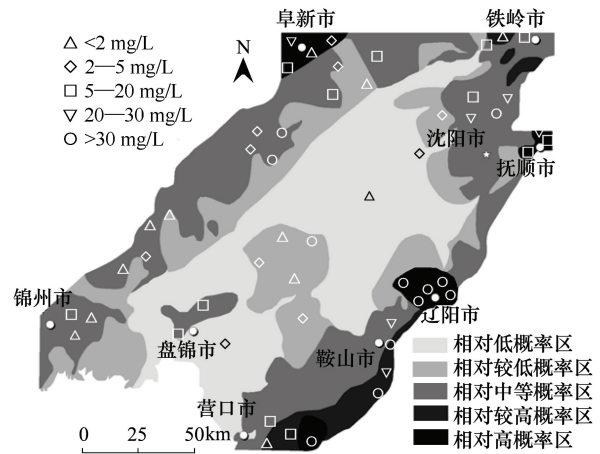


图 3 下辽河平原区地下水硝酸盐氮后验概率分布及监测井硝酸盐氮浓度水平对应图

Fig. 3 The corresponding map of Nitrate-N posteriori probability distribution and its observed concentration in the study region

表 5 硝酸盐氮实测浓度水平与后验概率类别关系对应表

Table 5 The corresponding list of the observed Nitrate-N concentration and its posteriori probability type in the study region

硝酸盐氮后验概率 Posteriori probability of nitrate concentration	硝酸盐氮浓度 Nitrate concentration					监测井数	超标/% (20 mg/L)	>30 mg/L 所占百分数/%
	<2	2—5	5—20	20—30	>30			
相对低概率	1	2	0	0	0	3	0.0	0.0
相对较低概率	4	3	0	0	1	8	12.5	12.5
相对中等概率	4	4	9	3	3	23	26.1	13.0
相对较高概率	2	0	1	1	2	6	50.0	33.3
相对高概率	1	1	3	2	6	13	61.5	46.2
监测井数	12	10	13	6	12	53		

综上所述,下辽河平原地下水生态系统健康较差,容易遭到破坏,因此在今后开采地下水时应引起注意,提高保护意识,加强管理力度。

5 结语与建议

通过在下辽河平原地区应用 WOE 法进行地下水生态系统健康评价与预测,发现其结果与研究区地下水生态系统健康的实际情况比较相符,表明 WOE 法在下辽河平原地下水生态系统健康评价上的研究上具有一定的实用性。

根据下辽河平原地下水生态系统健康评价及预测结果,并结合下辽河平原地下水生态系统健康的实际情况,特提出以下建议:

1) 统一管理水资源、合理调配有限的资源。该区工农业发达,地下水开采程度较大,应该通过控制开采和限制开采等具体措施,对地下水的开采进行严格管理;通过各种手段大力节水,建立节水型社会;着力控制污染物排放总量,发展生态农业和有机农业,综合防治面源污染,保护水资源。

2) 平原周围的低山地区由于径流不畅、资源贫乏,加之含水层较薄,可从流域治理着手,加强生态工程建设,进行小流域综合治理,植树造林,提高植被覆盖率,涵养水源,各种方式蓄储雨水洪水、防止水土流失。对

于地势低平的中部平原地区,因易出现内涝,应该适当强化地下水开采,采取井渠结合的方式,将地下水水位控制在生态水位水平,以避免盐碱化的发生。在辽河三角洲地区,应该严格控制地下水开采量,一方面可以防止海水入侵地质灾害的发生,保持咸淡水界面的相对稳定;另一方面可以保持地下水的顶托补给作用,维持当地重要的湿地生境。

3)进行地下水调蓄,增加地下水资源可利用量,调控地下水分为宏观和微观调控,宏观调控是利用防洪排涝工程及为灌溉和航运修建的节制闸,控制来去水量,与农田沟网相连,进行排、蓄、灌、补相结合;微观上在深沟建闸的基础上,修建排灌两用工程系统,进行连续或间断的直接向田间供水,或从田间排水抬高地下水或降低地下水,以满足农作物需水需求,使“排、灌合一”、“以蓄保灌”,充分发挥能灌、能补的多重作用,最大程度地发挥经济、环境效益。

致谢:感谢辽宁省水利厅水文水资源勘测局田英处长提供的研究区内多年地下水水质监测资料,使本文能够顺利完成。

References:

- [1] Sun C Z, Liu Y Y. Construction of evaluation index system for groundwater ecosystem health assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5665-5674.
- [2] Wan L, Cao W B, Hu F S. *Ecological Hydrogeology*. Beijing: Geological Press, 2005: 122-123.
- [3] China Groundwater Sciences Strategy Research Group. *The Chances and Challenges of Groundwater Sciences*. Beijing: Science Press, 2009: 41-42.
- [4] Lin X Y, Liao Z S, Zhao Y S, Su X S. *Modern Hydrogeology*. Beijing: Geology Press, 2005: 5-10.
- [5] Zhao Q, Yang Z F, Zhang L P, Chen Z T. Eco-city characteristics index discrimination and its application. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(2): 86-90.
- [6] Sang Y H, Chen X G, Wu R H, Peng X C. Comprehensive assessment of urban ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1280-1285.
- [7] Zhao Z Y, Xu F L, Zhan W, Hao J Y, Zhang Y, Zhao S S, Hu W P, Tao S. A quantitative method for assessing lake ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1466-1474.
- [8] Liu Y, Guo H C, Dai Y L, Lu T F. An assessing approach for lake ecosystem health. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4): 723-729.
- [9] Zhang K G, Zhao X, Shao X Q. Discussion on the evaluation of river ecosystem health. *Water Resources Protection*, 2005, 21(6): 11-14.
- [10] Zhao Y W, Yang Z F. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 349-355.
- [11] Wang C H, Wang K L, Xu L F. The assessment indicators of wetland ecosystem health. *Territory and Natural Resources Study*, 2003, (4): 63-64.
- [12] Cui B S, Yang Z F. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands II. An application. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1231-1239.
- [13] Xiao F J, Ouyang H, Sun J H, Zhang Z C. Forest ecosystem health assessment indicators and methods. *Forest Resources Management*, 2004, (1): 27-30.
- [14] Zhao H X, Zhou X F, Wang Y H, Zhou H Z. Quality of forest evaluation standard and evaluation target. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000, 28(5): 58-61.
- [15] Peng T, Gao W S, Sui P. Discussion on indicator system of farmland ecosystem health assessment. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(1): 21-25.
- [16] Lin T, Xue X Z, Lu C Y. Primary study on assessing the response to coastal ecological safety. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(4): 325-328.
- [17] Xue X Z, Lin T, Cao X H. Building coastal ecological safety indicator system. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2004, 43(Z1): 179-183.
- [18] Schaeffer D J, Henricks E E, Kerster H W. Ecosystem health I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, 12(4): 445-455.
- [19] Rapport D J. What constitutes ecosystem health?. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33(1): 120-132.
- [20] Harpham T. Urban health in the Gambia; a review. *Health and Place*, 1996, 2(1): 45-49.

- [21] Jorgensen S E. A Systems Approach to the Environmental Analysis of Pollution Minimization. New York; Lewis Publishers, 1999; 20-53.
- [22] Gallopin G C. The potential of agroecosystem health as a guiding concept for agricultural research. *Ecosystem Health*, 1995, 1: 129-141.
- [23] Kolb T E, Wagner M R, Covington W W. Concept of forest health; utilitarian and ecosystem perspectives. *Journal of Forestry*, 1994, 92(7): 10-15.
- [24] Xiao F J, Ouyang H, Fu B J, Niu H S. Forest ecosystem health assessment indicators and application in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 803-809.
- [25] Cui B S, Yang Z F. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands I. A theoretical framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1005-1011.
- [26] Wang C Z, Qiao G J. Calculation of water demand for groundwater eco-environment restoration in Xingtai City. *Water Resources Protection*, 2005, 21(5): 42-45.
- [27] Qiao X Y, Wang W K, Jiang G H, Zhao S Y, Qiao G. Study on ecological function of groundwater in northwest arid inland basin. *Water Resources Protection*, 2005, 21(5): 6-10.
- [28] 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.
- [29] Abuduwasiti W L M, Qin Q M. Overview on methods and theories of remote sensing monitoring and exploration of groundwater. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 184-188.
- [30] 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.
- [31] Xiao F J, Ouyang H. Ecosystem health and its evolution indicator and method. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 203-209.
- [32] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, Lu Z H, Deng H B, Ma K M, Zhang P. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 486-490.
- [33] 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(8): 1606-1614.
- [34] Wu L F, Ouyang Z, Tang D Y. The quantitative assessment of agro-ecosystem health on a regional dimension. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2740-2748.
- [35] 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.
- [36] Wang L X, Liu Z L, Liu H M, Wang W, Liang C Z, Qiao J, Nakagoshi N. Assessment of typical steppe ecosystem health in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 544-550.
- [37] Xu W, Mage J A. A review of concepts and criteria for assessing agroecosystem health including a preliminary case study of southern Ontario. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 83(3): 215-233.
- [38] Zektser S, Loćiciga H A, Wolf J T. Environmental impacts of groundwater overdraft: selected case studies in the southwestern United States. *Environmental Geology*, 2005, 47(3): 396-404.
- [39] Ma J Z, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(7): 1231-1243.
- [40] Agterberg F P. Computer programs for mineral exploration. *Science*, 1989, 245(4913): 76-81.
- [41] Ding Q F, Sun F Y. Expert evidence method of weighting and its application in the Eastern Kunlun Mountain. *Geology and Prospecting*, 2005, 41(4): 88-94.
- [42] Ding Q F, Sun F Y. Delineation and assessment of deposit prospect based on expert weights of evidence: an example from gold deposits in eastern Kunlun Mountain Area. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 25(1): 41-46.
- [43] Harris J R, Wilkinson L, Heather K, Fumerton S, Bernier M A, Ayer J, Dahn R. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps: a case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research*, 2001, 10(2): 91-124.
- [44] Dahal R K, Hasegawa S, Nonomura A, Yamanaka M, Masuda T, Nishino K. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 2008, 54(2): 311-324.
- [45] Bates L E, Barber C, Otto C J. Aquifer vulnerability mapping using GIS and Bayesian Weights of Evidence: review of application. *Hydro GIS*, 1996: 7-14.
- [46] Alberti L, De Amicis M, Masetti M, Sterlacchini S. Bayes'S rule and GIS for evaluating sensitivity of groundwater to contamination//IAMG Annual Conference, 2001.

- [47] Lei J. Study on Groundwater Vulnerability [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [48] Sun C Z, Wang Y X. The study on intrinsic vulnerability of nitrate in groundwater in the lower reach of Liaohe River based on WOE Method. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4): 80-84.
- [49] Jang Z Q, Zhu Y S. Evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC for Daqinghe Basin. Journal of Hohai University, 2001, 29(2): 100-103.
- [50] Wang Y X. Research on the Groundwater Vulnerability Assessment of the Lower Liaohe River Plain Based on GIS-WOE [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2009.

参考文献:

- [1] 孙才志, 刘玉玉. 地下水生态系统健康评价指标体系的构建. 生态学报, 2009, 29(10): 5665-5674.
- [2] 万力, 曹文炳, 胡伏生. 生态水文地质学. 北京: 地质出版社, 2005: 122-123.
- [3] 中国地下水战略科学研究所. 中国地下水科学的机遇与挑战. 北京: 科学出版社, 2009: 41-42.
- [4] 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.
- [5] 赵清, 杨志峰, 张璐平, 陈宗团. 生态城市特征性指标的辨析及其应用. 安全与环境学报, 2007, 7(2): 86-90.
- [6] 桑燕鸿, 陈新庚, 吴仁海, 彭晓春. 城市生态系统健康综合评价. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1280-1285.
- [7] 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.
- [8] 刘永, 郭怀成, 戴永立, 陆轶峰. 湖泊生态系统健康评价方法研究. 环境科学学报, 2004, 24(4): 723-729.
- [9] 张可刚, 赵翔, 邵学强. 河流生态系统健康评价研究. 水资源保护, 2005, 21(6): 11-14.
- [10] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探. 水科学进展, 2005, 16(3): 349-355.
- [11] 汪朝辉, 王克林, 许联芳. 湿地生态系统健康评估指标体系研究. 国土与自然资源研究, 2003, (4): 63-64.
- [12] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例. 生态学报, 2002, 22(8): 1231-1239.
- [13] 肖风劲, 欧阳华, 孙江华, 张志诚. 森林生态系统健康评价指标与方法. 林业资源管理, 2004, (1): 27-30.
- [14] 赵惠勋, 周晓峰, 王义弘, 周洪泽. 森林质量评价标准和评价指标. 东北林业大学学报, 2000, 28(5): 58-61.
- [15] 彭涛, 高旺盛, 贲鹏. 农田生态系统健康评价指标体系的探讨. 中国农业大学学报, 2004, 9(1): 21-25.
- [16] 吝涛, 薛雄志, 卢昌义. 海岸带生态安全响应力评估方法初探. 海洋环境科学, 2007, 26(4): 325-328.
- [17] 薛雄志, 吝涛, 曹晓海. 海岸带生态安全指标体系研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(Z1): 179-183.
- [24] 肖风劲, 欧阳华, 傅伯杰, 牛海山. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. 地理学报, 2003, 58(6): 803-809.
- [25] 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.
- [26] 王春泽, 乔光建. 邢台市地下水生态环境恢复需水量估算. 水资源保护, 2005, 21(5): 42-45.
- [27] 乔晓英, 王文科, 姜桂华, 赵顺阳, 乔冈. 西北干旱内陆盆地地下水生态功能的探讨. 水资源保护, 2005, 21(5): 6-10.
- [28] 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.
- [29] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明. 地下水遥感监测研究进展. 农业工程学报, 2004, 20(1): 184-188.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486~490
- [33] 罗跃初, 周忠轩, 孙轶, 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(8): 1606-1614.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 王立新, 刘钟龄, 刘华民, 王炜, 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): 0544-0550.
- [41] 丁清峰, 孙丰月. 专家证据权重法及其在东昆仑地区的应用. 地质与勘探, 2005, 41(4): 88-95.
- [42] 丁清峰, 孙丰月. 基于专家证据权重法的成矿远景区划与评价——以东昆仑地区金矿为例. 地质科技情报, 2006, 25(1): 41-46.
- [47] 雷静. 地下水环境脆弱性的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [48] 孙才志, 王言鑫. 基于 WOE 法的下辽河平原地下水硝酸盐氮特殊脆弱性研究. 水土保持研究, 2009, 16(4): 80-84.
- [49] 姜志群, 朱元生. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用. 河海大学学报: 自然科学版, 2001, 29(2): 100-103.
- [50] 王言鑫. 基于 GIS-WOE 法的下辽河平原地下水脆弱性研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009.

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 (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)

Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 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 *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)

Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* 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 *Alexandrium tamarense* 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 *Pinus tabulaeformis* 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 Jianguo (1151)

Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (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 *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)

Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* 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 Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)

A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)

Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* 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 CO₂ 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)

Review and Monograph

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)

Discussion

The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)

Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)

Scientific Note

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 *Cryptotaenia japonica* 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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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