

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 **2011**

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 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性	刘 波, 郑雪芳, 孙大光, 等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应	尹 红, 王 靖, 刘洪滨, 等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程	李海波, 李英华, 孙铁珩, 等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划	肖 燚, 陈圣宾, 张 路, 等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例	鲁春霞, 刘 铭, 冯 跃, 等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征	许倍慎, 周 勇, 徐 理, 等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响	李宁云, 袁 华, 田 昆, 等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例	宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力	韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究	张 杰, 张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价	孙才志, 杨 磊, 胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性	黄 静, 崔胜辉, 李方一, 等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析	钟林生, 王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者	褚福印, 唐思贤, 潘虎君, 等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响	朱俊霞, 王 勇, 张美文, 等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统	祁 君, 苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究	张 琳, WANG Baode, 许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系	杨忠岐, 王小艺, 王 宝, 等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响	李 乐, 万冬梅, 刘 鹤, 等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究	宋 伦, 杨国军, 李 爱, 等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征	王海梅, 李政海, 乌 兰, 等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响	兰春剑, 江 洪, 黄梅玲, 等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理	赵风华, 王秋凤, 王建林, 等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较	巩国丽, 陈 辉, 段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响	雍石泉, 仝 川, 庄晨辉, 等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性	谢彩香, 索风梅, 贾光林, 等 (7551)
苈对黑麦草根茎几种低分子量有机分泌物的影响	谢晓梅, 廖 敏, 杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定	张丽珍, 樊晶晶, 牛 伟, 等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响	安 娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建	楼 波, 徐 毅, 林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响	张远东, 刘世荣, 顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展	胡广录, 赵文智, 王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物	高 东, 何霞红, 朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征	刘 刚, 沈守云, 闫文德, 等 (7625)
氯氟菊酯和溴氟菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响	黄 林, 刘昌利, 韦传宝, 等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等	(I)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境, 同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中, 但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变, 形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭, 绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬, 远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

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

孙才志, 杨磊, 胡冬玲. 基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价. 生态学报, 2011, 31(24): 7428-7440.

Sun C Z, Yang L, Hu D L. Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7428-7440.

基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价

孙才志^{1,2,*}, 杨磊¹, 胡冬玲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: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 个方面考虑, 构建了下辽河平原地下水生态敏感性评价指标体系。运用 GIS 空间分析技术, 从水量和水质两方面对下辽河平原地下水生态敏感性进行评价。结果表明: 在水量敏感性方面, 主要以轻度与中度敏感区为主, 占研究区总面积的 65.14%; 在水质敏感性方面, 主要以轻度与中度敏感区为主, 占研究区总面积的 86.56%。综合水量和水质两方面, 下辽河平原地下水生态敏感性在中度敏感以上的区域面积占研究区面积的 59.62%, 生态敏感性较高, 容易受到破坏。从空间分布来看, 不敏感和轻度敏感区分布在新民—辽中平原、东部山前冲洪积平原; 中度敏感区域主要分布在中部平原及西部低山地区; 高度敏感和极敏感区分布在辽阳和抚顺城区、平原周围山区。

关键词:地下水; 生态敏感性; 下辽河平原; GIS 空间分析

Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique

SUN Caizhi^{1,2,*}, YANG Lei¹, HU Dongling¹

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 systems are an important part of the world's ecosystems, linking the lithosphere, atmosphere, hydrosphere, and biosphere. Groundwater is the dominant factor influencing vegetative community distribution patterns in the arid and semi-arid regions of Northwest China. Also, groundwater is the primary source of water for human uses in North China. With recent economic growth, the region is experiencing rapid development of its groundwater resources. The groundwater has been and is being seriously depleted and the system is displaying some unstable characteristics and vulnerabilities, which are significantly impacting the ecology of the area.

Various types of sensitivity assessment are often used to study the stability of a region's environment and ecology. A groundwater ecological sensitivity assessment can be used to facilitate protection of the environment and to encourage sustainable development of groundwater resources. This paper provides a case study of the Lower Liaohe River Alluvial Plain, which is in the most economically developed region of Liaoning Province. The area is experiencing a significant water shortage.

First, groundwater ecological sensitivity and its attributes were defined. Twenty-two factors were selected to be used in constructing the assessment indicator system. These were based on five aspects of groundwater quality and quantity including: 1) characteristics of the local groundwater system, 2) natural conditions in the region, 3) external pressures including human-caused pressures, 4) resources available and conservation, and 5) the local ecological environment. These factors were designed based on actual conditions of the area studied and took into account a variety of indicators

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:2011-01-03; **修订日期:**2011-05-23

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

including spatial scale, dominating environmental conditions, independence from other factors, sensitivity of the local groundwater resources to impacts, early warning signs of problems within the groundwater system, the cumulative impact of qualitative and quantitative factors, practicality of use factors, a need to standardize the data, and classification of various factors and impacts on ground water resources. Each factor was defined and described. The sensitivity of groundwater in relation to each factor was ranked on a scale of one to five, defined as 1) insensitive, 2) slightly sensitive, 3) moderately sensitive, 4) highly sensitive, and 5) extremely sensitive groundwater conditions. The assigned value for each indicator was determined by reviewing related standards and references.

Once the various indicators or factors were defined and standardized, a groundwater ecological sensitivity assessment in the Lower Liaohe River Alluvial Plain was carried out. First, the sensitivity of the five aspects of groundwater quality and quantity were evaluated individually by applying spatial analysis of a geographic information system and the distribution of the five factors listed above was analyzed. Second, an integrated sensitivity value was calculated using a weighted model from GIS for water quantity and water quality.

For water quantity, the results show the slightly and moderately sensitive areas of water quantity dominate and comprise 65.14% of the study area. The entire study area was classified as 5.35% insensitive to water quantity issues, 40.53% slightly sensitive, 24.61% moderately sensitive, 21.64% very sensitive, and 7.87% extremely sensitive. For water quality, moderately and highly sensitive areas of water quality dominate and compose 86.56% of the study area. The entire study area was classified as 1.11% insensitive to water quality issues, 10.99% slightly sensitive, 50.17% moderately sensitive, 36.39% very sensitive, and, 1.34% extremely sensitive. When sensitivity to both water quantity and water quality issues are considered, areas of moderate or higher sensitivity for both quantity and quality occupy more than 59.62% of the entire research area, indicating the degree of ecological sensitivity is generally high and groundwater resources are very vulnerable. The analysis of the spatial distribution of the five zones shows the insensitive and slightly sensitive zones are mainly distributed in the Xinmin-Liaozhong plain of the eastern alluvial floodplain. Moderately sensitive zones are mainly distributed in the middle plain and western low mountain region. The highly and extremely sensitive zones are mainly distributed in cities of Liaoyang and Fushun, and in the mountains surrounding the plain.

Key Words: groundwater; ecological sensitivity; The Lower Liaohe River Plain; GIS spatial analysis

地下水是生态环境系统的重要子系统,与岩石圈、大气圈、水圈和生物圈有着千丝万缕的联系。完好的生态系统对地下水资源有良好的涵养作用,同时地下水系统也滋养着生态系统,两者之间存在密切的依附关系^[1]。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^[1-2]。与地表水相比,地下水具有分布广、水量相对稳定、水质好、不易受污染等特点,在供给居民生活用水、支撑经济发展、维持生态平衡等方面具有重要的作用^[3]。但随着社会经济的快速发展,人类社会对地下水的开发强度不断增大,加之不合理利用,地下水生态系统遭到严重破坏,致使由地下水维持的沼泽湿地、土壤、地表植被及河流湖泊等生态系统退化严重,具体表现为沼泽湿地面积锐减,土壤盐碱化和沙漠化加重,地表植被凋零及河流湖泊干涸等一系列生态环境问题^[4-5]。这些问题在我国北方干旱半干旱地区表现的尤为明显^[6],因此地下水生态敏感性评价对地下水资源的可持续开发、利用与良性生态环境的维持具有重要的意义。

国际上有关生态敏感性的研究,主要集中在湿地和湿地植物对于气候变化的敏感性、雨林对选择采伐的生态敏感性、水文系统对气候变化的敏感性、海岸带及大陆架生态敏感性等方面^[7-10]。国内对生态系统敏感性评价的研究多集中在土地敏感性评价、水环境敏感性评价、水土流失敏感性评价及城市敏感性评价等领域^[11-13]。“生态水文地质学”^[1]将水文地质的概念引入生态系统中,其主要任务是研究地下水与生态环境之间的联系,采用的方法主要为传统的生态水文学理论与方法,研究内容集中在地下水文过程对植被生态格局

的研究,包气带多重界面水分、水质转换机制研究,不同尺度流域的地表水、地下水水分运移和植被生态需水耦合模型研究,地下水区域尺度遥感监测模型研究等方面。鉴于生态水文地质学的研究刚刚起步,尚未形成自己特有的知识结构和理论体系,目前还没有可供参考的模本^[1],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^[2],而且各研究多是从一个方面或角度来研究地下水的生态功能,如地下水生态水位、地下水生态需水量的研究等^[14-15],建立在多种因素耦合基础上的地下水生态敏感性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,也是东北地区最缺水的地区^[16],研究区内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,已经产生了大量的环境水文地质问题,这些问题具有种类多(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 400km²;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 6260km²,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 5121km²,占 86.0%;硫酸盐污染面积为 75km²,占 1.3%;氯化物污染面积为 3317km²,占 55.7%;硝酸盐氮污染面积为 2447km²,占 41.1%。亚硝酸盐氮污染面积为 1268km²,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。鉴于地下水的生态功能主要由水量、水质决定的特点,论文从水量和水质两方面出发,综合多种因素评价辽河平原地下水生态敏感性,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 地下水生态敏感性的概念与内涵

目前对地下水生态敏感性尚无准确定义,本文在查阅大量资料^[17-22],遵循地下水生态系统健康标准和维持地下水生态系统功能的基础上,地下水生态敏感性可以理解为地下水生态功能对外界干扰的敏感程度,即在地下水资源、生态承载力范围内,地下水系统在受到外界激励(自然条件的变化和人类活动的影响)时,其吸收激励使自身结构、功能及特性发生变化,但当外界激励减弱或消失后地下水系统能够继续维持其自身的结构稳定、功能完整及正常的物质循环和能量流动,重新发挥资源供给、维持生态环境平衡、维护地质环境稳定的能力。应该指出的是,与可持续发展、承载力等概念类似,由于无法准确刻画地下水绝对生态敏感性,本文中的地下水生态敏感性是指相对生态敏感性。

地下水生态敏感性内涵主要包含以下五方面的属性:一是自然属性,即地下水系统本身所具有的对外界干扰的抵抗能力,同时与区域的水文地质等自然条件和资源丰贫程度密切相关;二是社会属性,即地下水生态功能受人类活动强弱、社会经济和技术水平等影响;三是整体性,即地下水生态敏感性是地下水水质敏感性和水量敏感性的有机统一,水量或水质遭到破坏均会导致地下水生态功能失衡;四是有限性,即地下水生态功能具有一定的弹性,在弹性限度内地下水生态功能具有自我调节与自我恢复能力,在弹性限度外地下水生态功能无法恢复到原来的状态;五是系统性,地下水存在于地下水系统中,系统作为一个整体对外界的激励作出响应,因此对于具备完备地下水补给、径流、排泄资料的研究区,应该坚持系统性的原则进行地下水生态敏感性评价。

2 评价方法与数据来源

2.1 评价方法

论文采用层次分析法和 GIS 空间分析技术对下辽河平原地下水生态敏感性进行评价。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种定性分析和定量分析相结合的系统分析方法,通过明确问题、建立层次分析结构模型,构造判断矩阵、求最大特征值及特征向量确定权重、一致性检验,从而得出可行的综合评价

值,具有高度的逻辑性、系统性和实用性,因此本文采用层次分析法确定指标权重^[23]。

地理信息系统(GIS)是对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示的计算机应用系统,已广泛应用于环境评价、生态保护、城市规划等领域,GIS 技术与各种数学模型的结合是地下水生态敏感性评价的一个最主要的发展方向^[24]。论文应用 GIS 软件,通过空间叠加分析,得到研究区地下水生态敏感性评价图及评价指数。

在 GIS 环境下运用多因子加权求和模型,计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n A_i \cdot W_i \quad (1)$$

式中, P 为某一系统的地下水生态敏感性评价指数; A_i 为各指标的地下水生态敏感性贡献值,不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感的贡献值分别为 1、3、5、7、9; W_i 为各指标的地下水生态敏感性权重,采用层次分析法获得。单一要素分析得出的地下水生态敏感性,只反映该要素的作用程度,不能将区域变异综合地表现出来,需要对单一要素的评价图进行像元的空间叠加运算,最终确定下辽河平原地下水生态敏感性的综合评价图。

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空间分辨率为 0.001 度的正交曲线坐标栅格文件,作为基本的空间地理单元进行运算。栅格文件的属性数据,主要来源于 2008 年 Landsat ETM、《辽宁省国土资源地图集》、《辽宁省水资源公报》(2000—2008 年)、《辽宁省统计年鉴》和《中国城市统计年鉴》(2001—2009 年)等。

3 地下水生态敏感性评价指标体系的构建

3.1 构建原则

地下水生态敏感性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的生态敏感性状况,在选取指标和建立指标体系时应当遵循以下原则^[25]:

(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,以体现指标选取的实用性。

(2) 主导因子和独立性原则

影响地下水生态敏感性的因素很多,在评价中对主导因子的选择至关重要,在尽可能选择较少指标的同时,并且能表征系统最主要成分变量,具有一定的代表性,同时,每个指标要内涵清晰、相对独立,同一层次的各项指标相互间应尽量不存在共线性关系。

(3) 系统性原则

地下水生态系统是一个复杂的系统,评价指标应全面真实反映研究区环境、资源、社会和生态等各个侧面的基本特征,每一侧面由一组指标构成,评价指标体系是一个多属性、多层次的体系,因此,构建敏感性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) 定性与定量相结合的原则

反映地下水生态敏感性的指标分为定性指标和定量指标两类,将这两类指标结合起来统筹考虑,只有这样才有可能达到科学评价目的,取得可信结果。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。

(6) 简明性和可操作性

指标概念明确,能为大多数人所理解和接受,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,有足够的数量。

(7) 规范化原则

地下水生态敏感性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。

3.2 地下水生态敏感性评价指标体系

在遵循指标系统构建原则的基础上,以地下水生态敏感性内涵为依据,以维持地下水生态健康为最终目标,在综合考虑水量和水质两方面因素,以下辽河平原生态健康评价指标体系为基础,选择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五个方面 22 个指标构建地下水生态敏感性评价指标体系^[17](表 3)。

表 1 地下水生态敏感性评价指标体系及权重
Table 1 Indicator and weight system for groundwater ecological sensitivity assessment

目标层 Objective layer	准则层 Criteria layer	单准则权重 Single criteria weight	指标层 Indicators layer	水量权重 ^② Water quantity weight	水质权重 ^③ Water quality weight
地下水生态敏感性 Ecosystem Sensitivity of groundwater	系统结构特征	0.4737	保护层 ^①	0.1667	0.3750
			含水层厚度	0.5000	0.0417
			含水层渗透系数	0.2778	0.2083
			土壤有机质含量	0.0556	0.3750
	区域自然条件	0.2632	实际埋深与生态水位偏离值	0.1176	0.1771
			地形坡度	0.2353	0.2490
			天然总补给量	0.2941	0.2144
			土壤类型	0.1765	0.2490
			土地利用类型	0.1176	0.0830
			地表水水质	0.0588	0.0277
			地下水开采量	0.5000	0.0625
			农业灌溉耗水率	0.1667	0.0625
	外界压力	0.0526	人口密度	0.2778	0.3125
			施肥强度	0.0556	0.5625
			地下水资源模数	0.3333	0.0625
			降水量	0.3333	0.0625
			工业废水排放达标率	0.1667	0.5625
	资源与保护	0.0526	生活污水处理率	0.1667	0.3125
			植被覆盖指数	0.1667	0.1667
			生物丰富度指数	0.2778	0.2778
			水网密度指数	0.5000	0.0556
			地下水矿化度	0.0556	0.5000
	生态环境	0.1579			

①保护层是指含水层上覆弱透水层,用于反映包气带对地下生态水敏感性的影响,其厚度越厚,地下水生态敏感性相对来说就越不敏感;②水量权重指进行地下水水量敏感性评价时的权重;③水质权重指进行地下水水质敏感性评价时的权重

(1) 地下水系统结构特征

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,论文选取保护层、土壤有机质含量、含水层厚度和含水层渗透系数作为地下水系统结构特征的评价指标。其中,土壤有机质含量对污染物垂直运移至包气带有显著影响。土壤表层有机质含量越大,对污染物向下运移的阻碍作用越强,不易受到污染,地下水生态敏感性越低。含水层的厚度越厚,相对来说地下水资源量越大,污染物被稀释的能

力越强,地下水生态敏感性就越低,含水层渗透系数反应了含水层介质的渗透性,控制着污染物在含水层内迁移的速率,其值越大,污染物在含水层内的迁移速度越快,地下水生态敏感性越高。

(2) 区域自然条件

论文选用地形坡度、天然总补给量、土壤类型、实际埋深与生态水位偏离值、土地利用类型和地表水水质来反映研究区域自然条件状况,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,但对于降水量丰富的地区,较小的地形坡度有利于地表水的充分下渗,对地下水补给有重要作用。土壤类型对渗入地下水的补给量具有显著的影响,因此对污染物垂直运移至渗流区有显著影响。实际埋深与生态水位偏离值是指实际地下水位与标准的地下水生态水位之间的差值,其偏离值越大,地下水生态功能越弱,敏感性越强。天然总补给量、土地利用类型和地表水水质也都是反应区域自然条件的重要指标。

(3) 外界压力

由于不合理利用地下水资源,导致地下水生态系统日趋恶化,地下水开采量越大,含水层中污染物由于浓缩效应而浓度越大。过量开采地下水会引起区域地下水位持续下降,形成水位降落漏斗。因此,将地下水开采量作为评价地下水生态敏感性的一个指标,开采量越大,地下水生态敏感性相对越高。同时,施肥强度对地下水生态敏感性的压力也不容小视,施肥强度越大,含水层中氮的浓度相应越大,地下水生态敏感性越高。此外,人们在生产生活和社会经济发展过程中对地下水资源的消耗和破坏,使地下水资源面临水位下降,水质破坏等一系列威胁,主要选取人口密度和农业灌溉耗水率两个指标来表征。

(4) 资源与保护

地下水资源模数是衡量地下水资源丰富程度的一个指标,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。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,因此,降水量丰富的地区,地下水资源量大,敏感性相对较低。此外对于地下水资源要进行保护利用,通过各种节水措施、工程项目和污水处理技术等,控制污水排放量,提高水资源的利用效率和复用次数,在一定程度上减小地下水资源压力,保护地下水生态系统,可用工业废水达标处理率和生活污水处理率表示。

(5) 生态环境

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,选用植被覆盖指数、生物丰富度指数、水网密度指数和地下水矿化度表示。

将文中提到的主要的地下水生态敏感性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)。

表 2 评价指标标准分级

Table 2 The standard classification of assessment indicators

评价指标 Assessment indicators	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitivity	中度敏感 Moderate sensitivity	高度敏感 High sensitivity	极敏感 Extreme sensitivity
1 保护层 ^[26]	Ⅵ	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ, I
2 含水层厚度/m ^[26]	>280	140—280	60—140	20—60	<20
3 含水层渗透系数/(m/d) ^[24,27]	<10	10—20	20—40	40—80	>80
4 土壤有机质含量/% ^[26]	>4	3—4	2—3	1—2	<1
5 实际埋深与生态水位偏离值/m ^[14,28-29]	-5—4	4—8	8—12	12—16	16—20
6 地形坡度/% ^[26]	>0.2	0.15—0.2	0.1—0.15	0.05—0.1	<0.05
7 天然总补给量/(mm) ^[30]	0—51	51—102	102—178	178—254	>254
8 土壤类型 ^[12,26]	黄土状亚砂土	亚粘土含砾	粘土、亚粘土	亚砂土	砂、基岩

续表 2

评价指标 Assessment indicators	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitivity	中度敏感 Moderate sensitivity	高度敏感 High sensitivity	极敏感 Extreme sensitivity
9 土地利用类型 ^[31]	水域、沼泽和建设用地	林地	草地	耕地	未利用土地
10 地表水水质 ^[32-34]	I	II	III	IV	V
11 地下水开采率/(mm/a) ^[26,30]	<50	50—150	150—250	250—350	>350
12 农业灌溉耗水率/(m ³ /万元) ^[35]	<500	500—1000	1000—1500	1500—2000	>2000
13 人口密度/(人/km ²) ^[36]	<100	100—250	250—400	400—600	>600
14 施肥强度/(kg/hm ²) ^[26]	<0.02	0.02—0.03	0.03—0.04	0.04—0.05	>0.05
15 地下水资源模数/(10 ⁴ m ³ /km ² ·a) ^[37-38]	>20	13—20	8—13	4—8	<4
16 工业废水排放达标率/% ^[36]	>97.5	92.5—97.5	85—92.5	80—85	<80
17 降水量/(mm) ^[36,39]	1300—2000	1000—1300	800—1000	500—800	<500
18 生活污水处理率/% ^[36,38]	>90	75—90	55—75	35—55	<35
19 植被覆盖指数 ^[40]	>75	55—75	35—55	20—35	<20
20 生物丰富度指数 ^[40]	>75	55—75	35—55	20—35	<20
21 水网密度指数 ^[40]	>75	55—75	35—55	20—35	<20
22 地下水矿化度/(g/L) ^[41]	<1	1—3	3—10	10—50	>50

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：保护层厚度自净能力中等；VI：保护层厚度自净能力强

指标标准的确定参考国家相关规范以及已有文献中其它省市的标准,鉴于地下水生态系统敏感性的研究过少,各地区地下水生态系统敏感性问题不尽相同,各时段地下水生态系统敏感性也不是一个定值,所以在应用评价指标标准的时候应该结合研究区的具体情况划分合理的评价等级;其中,地形坡度、含水层渗透系数和天然总补给量按水质标准给出,水量标准与水质标准相反

1. Protective layer; 2. Aquifer thickness; 3. Aquifer permeability; 4. Soil organic matter content; 5. Deviation between the actual and ecological depth of groundwater; 6. Topography; 7. The total amount of natural recharge; 8. Soil type; 9. Land use type; 10. Surface water quality; 11. Groundwater exploitation; 12. Rate of agricultural irrigation water; 13. Population density; 14. Fertilization intensity; 15. Groundwater resources module; 16. Percentage of industrial wastewater treatment; 17. Precipitation; 18. Percentage of sanitary sewage treatment; 19. Vegetation Index; 20. Biological richness; 21. Water network density index; 22. Groundwater salinity

4 下辽河平原地下水生态敏感性评价

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—140km,南北长 240km,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 50m 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

4.2.1 单准则评价分析

下辽河平原地下水生态敏感性的系统结构特征评

价中,主要以轻度、中度和高度敏感为主,分别占研究区总面积的 31.92%、35.65% 和 18.54%。根据分析,在各类敏感区域中,中度以上的敏感区域最为危险,主要分布在东部、西北部山前平原以及平原周围的低山丘陵

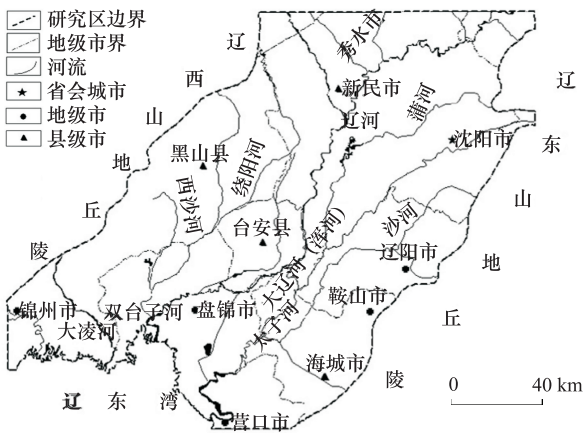


图 1 下辽河平原地理位置图

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

区,原因主要是这些地区含水层厚度较薄,土壤有机质含量低,并且保护层较薄,甚至某些地区根本没有保护层。

在区域自然条件评价中,主要以轻度和中度敏感区为主,占总面积的 66.40%,主要分布在中部平原及滨海三角洲平原,由于这里土壤类型主要为亚砂土和亚粘土为主,并且耕地面积广、内涝盐碱灾情严重等多重原因综合作用致使地下水生态敏感性较高。

外界压力评价结果显示,主要以中度敏感为主,占总面积的 53.90%,但轻度和高度敏感区域所占比重也不能忽视,极敏感区所占比重为 5.12%,主要集中在沈阳、辽阳和鞍山等经济比较发达地区,主要因为这些地区工业发达、人口密集,导致污水排放量、开采量均较大。

从资源与保护因素可以看出,极敏感区域所占比重为 1.14%,不敏感区域占 49.41%,所占比重较大,分布于东部山前冲洪积平原,因为这里降水丰富,地下水资源模数大,并且对地下水资源的保护力度相对较强。

下辽河平原生态环境评价中,以高度敏感和极敏感区域为主,主要分布在西部基岩裸露的山区、法库低丘地区,尽管这里有林地覆盖,但是水网密度及生物丰富度过低,且水资源贫瘠而导致地下水生态敏感性过高。此外,滨海平原地区也有分布,主要因为海水入侵,土壤盐渍化及地下水矿化度较高等因素导致。

基于单准则评价的地下水各级生态敏感性面积比例见下表(表 3)。

表 3 基于单准则评价的地下水各级生态敏感性面积比例

Table 3 the percent of different sensitivity degree based on the single criteria assessment/%

准则 Criteria	敏感性级别 Sensitivity degree				
	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slight sensitivity	中度敏感 Moderate sensitivity	高度敏感 High sensitivity	极敏感 Extreme sensitivity
系统结构特征 System structure characteristics	3.75	31.92	35.65	18.54	10.14
区域自然条件 Regional natural conditions	11.66	32.19	34.21	17.23	4.71
外界压力 External pressure	1.27	21.02	53.90	18.69	5.12
资源与保护 Resources and conservation	49.41	7.03	13.35	29.07	1.14
生态环境 Ecological environment	0.77	8.59	25.17	34.36	31.11

4.2.2 综合评价分析

各指标对地下水生态敏感性影响不同,从水量和水质两个方面,对水量和水质影响不同的指标按地下水生态敏感性等级赋予不同的贡献值,含水层渗透系数、地形坡度和天然总补给量的贡献值为 1、3、5、7、9,而对水质则为 9、7、5、3、1,其他指标则赋予 1、3、5、7、9 的贡献值,然后将各单因子指标叠加分析,得到研究区地下水生态敏感性水量和水质评价指数及评价图(图 2,图 3),最后将水量和水质评价图按两种不同方案进行空间叠加分析得到最终的地下水生态敏感性综合评价图。

由图 2 可以看出,地下水的水量生态高度敏感和极敏感的地区主要分布在平原周围的低山地区,占研究区总面积的 29.51%,原因是这些地区含水层厚度和保护层较薄,地下水资源模数及天然总补给量少等综合作用导致地下水生态系统敏感性较高。

地下水生态敏感性的中度敏感区占研究区总面积的 24.61%,主要分布在西部山前冲洪积平原、新民—辽中平原、沈阳城区附近,尽管这一地区地下水资源模数和水网密度指数较大,但由于人口密度过大,社会经济发展带来的工业污染,农业灌溉耗水率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,而导致地下水生态敏感性较强。

地下水生态不敏感和轻度敏感面积占研究区总面积的 45.88%,主要分布在平原东北部、辽河冲积扇、浑河冲积扇、太子河冲积扇、滨海三角洲和海城河冲积扇等区域,其中平原东北部林地面积较大,水土保持较好,

尽管其地下水资源不十分丰富也使其地下水生态敏感性处于不敏感和轻度敏感区之间。其他地区由于保护层和含水层较厚,上覆亚粘土或粘土层,防渗作用较强,天然补给量大,水资源丰富,使地下水生态敏感性较低,生态环境较好,但滨海三角洲地区海水入侵、内涝盐碱灾情较严重及地下水资源的矿化度较高而对地下水生态敏感性有一定影响。

由图3可以看出,地下水的水质生态高度敏感和极敏感区主要分布在平原周围的基岩裸露的低山区,辽中—台安平原及柳河、辽河和双台子河等流域,由于植被覆盖指数、含水层和保护层过薄、生活污水处理率较低及地表水水质恶化等原因使地下水易污染,致使其生态敏感性处于高度敏感和极敏感区。

中度敏感区主要在中部平原、沈阳和辽阳城区附近及平原周边地区分布,占研究区总面积的50.17%。这里是下辽河平原工农业最发达的地区,地下水开采量、农业灌溉耗水率、施肥强度等非常大,工业污水达标排放率、生活污水处理率和地形坡度小等原因使水资源极易受到污染,造成地下水生态敏感性较高,此外,滨海平原地区由于地下水矿化度高而对其生态敏感性产生的影响也不容小视。由于保护层厚以及含水层的渗透系数较小等原因使得海城河冲积扇等区域地下水生态敏感性较低。

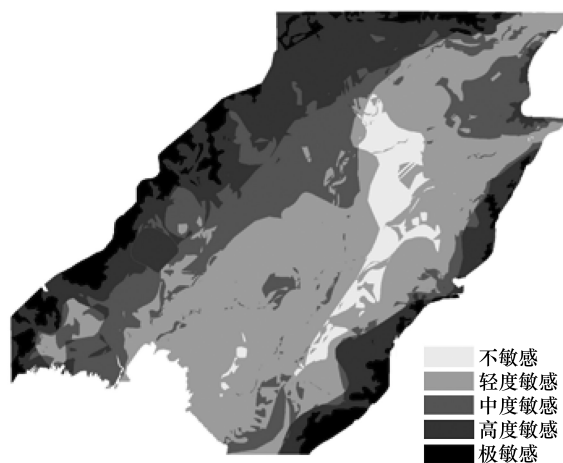


图2 辽河平原地下水水量敏感性评价图

Fig. 2 Groundwater quantity sensitivity map in the lower Liaohe river plain

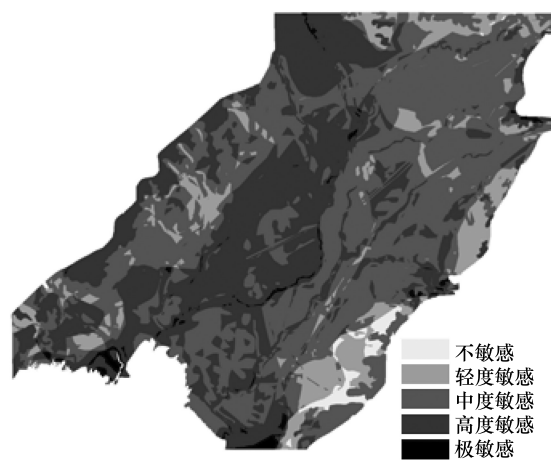


图3 下辽河平原地下水水质敏感性评价图

Fig. 3 Groundwater quality sensitivity map in the lower Liaohe river plain

由于对地下水生态敏感性评价考虑了水量和水质两个方面,因此,论文分两种方案将地下水生态敏感性水量评价图和地下水生态敏感性水质评价图进行叠加,得到两幅下辽河平原地下水生态敏感性综合评价图。

方案Ⅰ 地下水生态敏感性水量评价图权重赋予0.70,水质评价图的权重赋予0.30,将两图层进行叠加得到地下水生态敏感性评价综合图4。该模式下得到的地下水生态敏感性评价综合图主要从水量角度考虑地下水对自然环境及人类活动干扰的敏感程度。

方案Ⅱ 地下水生态敏感性水量评价图权重赋予0.30,水质评价图的权重赋予0.70,将两图层进行叠加得到地下水生态敏感性评价综合图5。该模式下得到的地下水生态敏感性评价综合图主要体现了地下水的“防污”性能,主要从水质角度考虑地下水对自然环境及人类活动干扰的敏感程度。

方案Ⅰ 图4的地下水生态敏感性评价指数在3.6400—7.1810区间变化,在这一区间按地下水生态敏感性程度分为五个等级,可以看出下辽河平原地下水生态敏感性主要以轻度和中度敏感为主,共占研究区总面积的72.02%,主要分布在中部平原地区及东部山前冲洪积平原,主要是由于地形坡度、地下水开采量等区域自然条件和外界压力等因素造成的。高度敏感和极敏感区域主要分布在平原周围山区,主要是植被和水网等生态环境因素引起的。不敏感区分布在海城河冲积扇、新民—辽中平原等地区,因为系统结构特征和资源与保护等因素综合作用使其地下水生态敏感性维持在不敏感和轻度敏感之间。

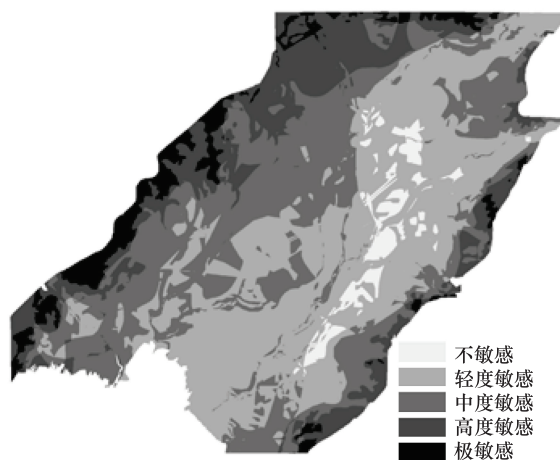


图4 方案 I 的地下水生态敏感性评价图

Fig. 4 Groundwater ecological sensitivity map under scheme I

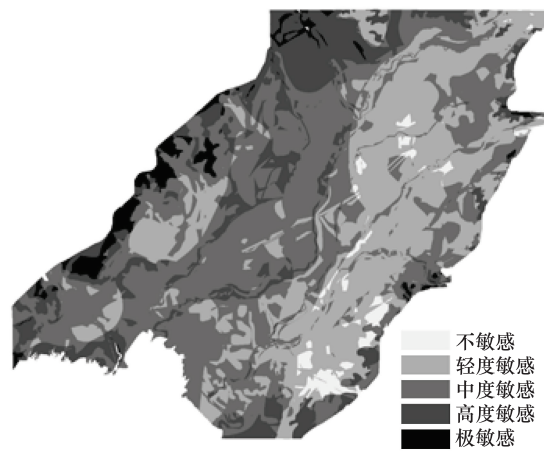


图5 方案 II 的地下水生态敏感性评价图

Fig. 5 Groundwater ecological sensitivity map under scheme II

方案 II 图 5 的地下水生态敏感性评价指数在 3.7502—6.3895 区间变化,将其分 5 个等级后可以看出下辽河平原地下水生态敏感性是以中度敏感为主,占研究区总面积的 44.90%,由于资源与保护及外界压力的综合作用使其主要分布在中部平原和西部低山地区。高度敏感和极敏感区分布在平原西部低山地区和辽阳、抚顺城区附近,造成这种分布的主要原因是生态环境和区域自然条件等因素。由于辽阳和抚顺的重工业发达,需水量多,导致开采量大,并且对地表水和地下水水质的破坏较为严重,致使其地下水生态敏感性处于高度敏感和极敏感区。不敏感和轻度敏感区分布在辽河冲积扇、浑河冲积扇、太子河冲积扇、海城河冲积扇及黑鱼沟河冲积扇,主要是由于系统结构特征等因素作用的结果。

综上所述,下辽河平原地下水生态敏感性较高,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

论文从水量和水质两个方面对下辽河平原地下水生态敏感性进行了评价,并应用 GIS 软件 Mapinfo 的外挂模块 Vertical Mapper 对图形网格化处理后进行空间叠加分析,分别得到研究区地下水生态敏感性评价图及评价指数。最后根据不同等级敏感性的划分,可以确定地下水生态建设与保护的重点区域以及其它区域在开发过程中的强度,对地下水生态健康的保护与开发有着积极的指导意义。方案 I 中地下水生态敏感性在中度敏感以上的面积占研究区总面积的 63.43%,方案 II 中地下水生态敏感性在中度敏感以上面积占研究区总面积的 55.80%,最后将方案 I 和方案 II 中地下水生态敏感性在中度敏感区以上的面积占研究区总面积的比重求取均值后得出研究区地下水生态敏感性较高,中度敏感以上区域面积平均占研究区面积的 59.62%,容易受到破坏,含水层厚度和渗透系数等本质指标对其敏感性的影响较大,此外,社会发展、城市化及人口增长对地下水生态敏感性的压力也不容忽视。所以,今后在对下辽河平原地下水资源开采利用时应着重考虑地下水生态敏感性较强的区域,合理开发与利用,实现地下水资源与人口、环境、社会和经济的协调发展。特提出如下建议:

(1) 今后应加强重点地区(沈阳、辽阳等)地下水开采的管理工作、压缩或限制地下水开采,调整开采布局,在漏斗区采用地下水人工回灌等方案,促使地下水位回升,保护地质环境,以控制地面沉降等地质灾害的发生。

(2) 平原周围的低山地区由于径流不畅、资源贫乏,加之保护层较薄,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。

(3) 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。

(4)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。

(5)发挥含水层调蓄功能,开发地下水库。研究区含水层厚度大,据科学测算^[42],东西部山前平原冲洪积扇的最大调蓄能力为 $153 \times 10^8 \text{ m}^3$,调节能力极强。干旱期大量抽取地下水,为雨季到来时雨水、洪水、河水入渗提供存储空间,使地下水获得较多的补给。

(6)推进城市污水处理与资源化,控制点源污染;发展生态农业和有机农业,综合防治面源污染;转变经济增长方式,调整产业结构,推广循环经济。通过以上措施切实保护和改善研究区水环境,减少对地下水生态系统的不良影响。

致谢:辽宁省水文水资源局吴法伟教授级高级工程师、栾天新教授级高级工程师为本文提供了下辽河平原地下水水位、地下水水质资料,特此致谢。

References:

- [1] Wan L, Cao W B, Hu F S. Ecological Hydrogeology. Beijing: Geological Press, 2005: 122-123.
- [2] China Groundwater Sciences Strategy Research Group. The Chances and Challenges of Groundwater Sciences. Science Press, 2009: 41-42.
- [3] Yang J F, Wan S Q, Chen X H. An evaluation of groundwater's role in regional economic and social development in China. Resources Science, 2007, 29(5): 97-104.
- [4] Zhou Y X, Wang Z H. Current situation investigation and comprehensive treatment to the land desertification of lower liaohhe plain. Protection Forest Science and Technology, 2009, 6(93): 58-59, 86-86.
- [5] Rong L B, Shu L C, Wang M M, Deng Z B. Study on estimation method of ecological water level of reasonable groundwater—case study on lower reaches of the Tarim river. Underground water, 2009, 31(1): 12-15, 43-43.
- [6] Li C M, Gao S H. Law of water resource evolvement and estimating of water supply and requirement in arid and semi-arid region of North China. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 68-71.
- [7] Carrington D P, Gallimore R G, Kutzbach J E. Climate sensitivity to wetlands and wetland vegetation in mid-Holocene North Africa. Climate Dynamics, 2001, 17(2/3): 151-157.
- [8] Horne R, Hickey J. Ecological sensitivity of Australian rainforests to selective logging. Australian Journal of Ecology, 1991, 16(1): 119-129.
- [9] Muzik I. Sensitivity of hydrologic systems to climate change. Canadian Water Resources Journal, 2001, 26(2): 233-252.
- [10] Rodriguez E, Vila L. Ecological sensitivity atlas of the argentine continental shelf. International Hydrographic Review, 1992, 69(2): 47-53.
- [11] Yang Y Y, Wang J L, Yang B F. Eco-sensitivity assessment of land in Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [12] Wang X K, Ouyang Z Y, Xiao H, Miao H, Fu B J. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 14-19.
- [13] Yang Z F, Xu Q, He M C, Mao X Q, Yu J S. Analysis of city ecosensitivity. China Environmental Science, 2002, 22(4): 360-364.
- [14] 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.
- [15] Feng P, Xiao L Y, Lin C. Studies on the estimation methods of water demand for groundwater eco-environment and its restoration problems. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(6): 102-107.
- [16] Liu Z, Liu C M. The analysis about water resource utilization ecological and environmental problems in Northeast China. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 700-708.
- [17] Sun C Z, Liu Y Y. Construction of evaluation index system for groundwater ecosystem health assessment. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5665-5674.
- [18] Zhao X Y, Sun C Q. Restoration ecology and its advance. Advances in Earth Sciences, 1998, 13(5): 474-480.
- [19] Zhang Y Z, Wang X. A review of ecological restoration studies on natural wetland. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(2): 309-314.
- [20] Li W W, Wang K Z, Li X. Pollution sensitivity evaluation of the shallow groundwater—taking Tai'an City for example. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(4): 18-22.
- [21] Yan L, Xu X G, Xie Z L, Li H L. Integrated assessment on ecological sensitivity for Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3117-3125.
- [22] Yin H W, Xu J G, Chen C Y, Kong F H. GIS-based ecological sensitivity analysis in the East of Wujiang City. Scientia Geographica Sinica,

2006, 26(1): 64-69.

- [23] Fan W. Groundwater Function Evaluation in Plain Area of Jilin Province. Changchun: Jilin University, 2007.
- [24] Zeng Q Y, Tian W Y, Wang Y X. Groundwater vulnerability assessment in Lower Liaohe River Plain based on GIS Model with Co-Weights. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(2): 23-26.
- [25] Cui B S, Yang Z F. Wetlands. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006, 12: 356-423.
- [26] Zuo H J. Research on the Groundwater Vulnerability Assessment of the Lower Liao He River Plain. Dalian: Liaoning Normal University, 2006.
- [27] Lei J. Study on Groundwater Vulnerability. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [28] 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.
- [29] Zhang C C, Shao J L, Li C J, Cui Y L. Eco-environmental effects on groundwater and its eco-environmental index. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(3): 6-10.
- [30] Yan M J, Zhang G H, Xu W D. Assessment on groundwater in Shijiazhuang. *Northwestern Geology*, 2005, 38(5): 105-110.
- [31] Wan Z C, Wang Z J, Dong L X, Wang Y S, Chen D G, Li X, Xu S L. Ecosystem sensitivity assessment of Liaoning Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(6): 677-681.
- [32] Gao H, Jin H. Evaluation of sustainable utilization for regional water resources based on AHP and fuzzy synthetic judgment — a case study for Jiangmen City in Guangdong Province. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, 18(3): 50-55, 59-59.
- [33] Zhang Z L, Liang C L, Guan Y B. Assessment of wetland ecosystem health in the Nansihu Lake. *China Population Resources and Environment*, 2008, 18(1): 180-184.
- [34] Duan S G, Xi X M. Set-up of index system to watershed ecosystem health assessment in the tarim river. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(5): 114-117.
- [35] Chen T T, Liang C. Multi-level fuzzy comprehensive discrimination for assessing water resources renewability in Yunnan Province. *Yunnan Water Power*, 2005, 21(6): 7-10.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Yang X H, Yang Z F, Shen Z Y, Li J Q, Jin J L. Genetic projection pursuit method for evaluating water resources reproducible ability. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 73-76.
- [39] Zhang J Y, Wang G Q. Studies for the Climate Change Impacting on Hydrology and Water Resources. Beijing: Science Press, 2004: 178-178.
- [40] Wan B T. Research on the eco-environment assessment in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 22-30.
- [41] Liu K, Ouyang Z Y, Wang X K, Xu W H, Miao H. Eco-environmental sensitivity and its spatial distribution in Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 26(12): 2711-2718.
- [42] Zheng D F, Wang B D. Evaluation method for regulation and storage capacity of underground reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 48(10): 56-62.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 中国地下水战略科学组. 中国地下水科学的机遇与挑战. 北京: 科学出版社, 2009: 41-42.
- [3] 杨建峰, 万书勤, 陈兴华. 中国地下水资源对区域经济社会发展的支撑作用评价. *资源科学*, 2007, 29(5): 97-104.
- [4] 周玉祥, 王志宏. 下辽河平原土地沙漠化现状调查与综合治理. *防护林科技*, 2009, 6(93): 58-59, 86-86.
- [5] 荣丽杉, 束龙仓, 王茂枚, 邓正波. 合理地下水生态水位的估算方法研究——以塔里木河下游为例. *地下水*, 2009, 31(1): 12-15, 43-43.
- [6] 李春梅, 高素华. 我国北方干旱半干旱地区水资源演变规律及其供需状况评价. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 68-71.
- [11] 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价. *生态学报*, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [12] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 苗鸿, 傅伯杰. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究. *生态学报*, 2001, 21(1): 14-19.
- [13] 杨志峰, 徐俏, 何孟常, 毛显强, 鱼京善. 城市生态敏感性分析. *中国环境科学*, 2002, 22(4): 360-364.
- [14] 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.
- [15] 冯平, 肖丽英, 林超. 地下水生态需水量的估算方法及其恢复问题的研究. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(6): 102-107.
- [16] 刘卓, 刘昌明. 东北地区水资源利用与生态和环境问题分析. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 700-708.

- [17] 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.
- [18] 赵晓英, 孙成权. 恢复生态学及其发展. 地球科学进展, 1998, 13(5): 474-480.
- [19] 张永泽, 王烜. 自然湿地生态恢复研究综述. 生态学报, 2001, 21(2): 309-314.
- [20] 李文文, 王开章, 李晓. 浅层地下水污染敏感性研究——以泰安市区为例. 安全与环境工程, 2009, 16(4): 18-22.
- [21] 颜磊, 许学工, 谢正磊, 李海龙. 北京市域生态敏感性综合评价. 生态学报, 2009, 29(6): 3117-3125.
- [22] 尹海伟, 徐建刚, 陈昌勇, 孔繁花. 基于 GIS 的吴江东部地区生态敏感性分析. 地理科学, 2006, 26(1): 64-69.
- [23] 范伟. 吉林省平原区地下水功能评价. 长春: 吉林大学, 2007.
- [24] 曾庆雨, 田文英, 王言鑫. 基于复合权重-GIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 23-26.
- [25] 崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 356-423.
- [26] 左海军. 下辽河平原地下水脆弱性研究. 大连: 辽宁师范大学, 2006.
- [27] 雷静. 地下水环境脆弱性的研究. 北京: 清华大学, 2002.
- [28] 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.
- [29] 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, 30(3): 6-10.
- [30] 严明疆, 张光辉, 徐卫东. 石家庄市地下水脆弱性评价. 西北地质, 2005, 38(3): 105-110.
- [31] 万忠成, 王治江, 董丽新, 王延松, 陈大光, 李璇, 徐少立. 辽宁省生态系统敏感性评价. 生态学杂志, 2006, 25(6): 677-681.
- [32] 郝彗, 金辉. 基于 AHP 和模糊综合评价的区域水资源可持续利用评价——以广东省江门市为例. 水资源与水工程学报, 2007, 18(3): 50-55, 59-59.
- [33] 张祖陆, 梁春玲, 管延波. 南四湖湖泊湿地生态健康评价. 中国人口资源与环境, 2008, 18(1): 180-184.
- [34] 段树国, 奚秀梅. 塔里木河流域生态系统健康评价指标体系的构建. 云南地理环境研究, 2007, 19(5): 114-117.
- [35] 陈婷婷, 梁川. 云南省水资源再生性的多级模糊综合评价. 云南水力发电, 2005, 21(6): 7-10.
- [36] 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.
- [37] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源再生能力评价模型. 水利学报, 2006, 37(4): 431-435.
- [38] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶, 酆建强, 金菊良. 水资源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.
- [39] 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, 2004: 178-178.
- [40] 万本太. 中国生态环境质量评价研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 22-30.
- [41] 刘康, 欧阳志云, 王效科, 徐卫华, 苗鸿. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布. 生态学报, 2003, 23(12): 2711-2718.
- [42] 郑德凤, 王本德. 地下水库调蓄能力综合评价方法探讨. 水利学报, 2004, 48(10): 56-62.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《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 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

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:100717	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