

# 基于 Model Builder 的库区生态敏感性分析

周扬<sup>1,2</sup>, 李潇丽<sup>3\*</sup>, 吴文祥<sup>2</sup>, 胡莹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 北京自然博物馆, 北京 100050)

**摘要** 以密云库区为研究对象, 利用生态环境现状调查资料和相关研究成果, 通过生态服务价值、地质灾害、植被覆盖指数、坡度及土地覆被类型 5 个指标对密云库区生态环境敏感性进行了综合评价, 识别出主要生态敏感区域。结果表明: 生态服务价值变化对生态环境最为敏感, 地质灾害因子次之; 生态敏感性极高的区域主要为石城镇大部分地区、高岭镇西北部及北庄东南部和西南地区, 不敏感区包括十里堡、巨各庄、大城子中部等地区。

**关键词** 生态敏感性; Model Builder; 分析; 密云库区

**中图分类号** X826 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)29-14272-04

## Analysis of Reservoir Ecological Sensitivity Based on Model Builder

ZHOU Yang et al (Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Taking Miyun Reservoir as the research object, 5 sensitive indices for eco-environment were selected based on the information of eco-environmental investment and previous studies, such as ecological service value, geology disaster, vegetation-cover index, slope, land-use types. A comprehensive evaluation was made on the eco-environmental sensitivity of Miyun Reservoir. The main ecological sensitivity areas were distinguished. The results of the research showed that the most sensitive factor of ecological environment was ecological service value, followed by geological disaster factors. The most sensitive areas are most areas of Shicheng Town, northwest areas of Gaoling Town, southeast and southwest areas of Beizhuang. In addition, some towns, such as Shilibao, Jugezhuang and middle Dachengzi were non-sensitivity areas.

**Key words** Ecological sensitivity; Model Builder; Analysis; Miyun Reservoir

生态敏感性是指生态系统对人类活动反应的敏感程度, 用来反映产生生态失衡与生态环境问题的可能性大小<sup>[1]</sup>; 也可认为是指在不损失或不降低环境质量情况下, 生态因子对外界压力或变化的适应能力<sup>[2]</sup>。生态敏感性评价的实质就是评价具体生态过程在自然状况下潜在变化能力的大小, 用来表征外界干扰可能造成的后果<sup>[3]</sup>。生态敏感性评价主要是从自然资源的角度分析区域各系统对外来干扰的适应能力, 是进行生态规划的基础, 对指定区域规划、保护环境等具有重要的指导意义。生态敏感程度的高低直接反映区域生态环境承受人为胁迫能力的高低, 影响工农业生产的发展和人民生活水平的提高, 进而制约区域社会经济的发展<sup>[4]</sup>。敏感性越高的区域, 就越容易出现生态环境问题。目前, 国内外对生态敏感性的研究主要是针对单一的生态环境问题。其中国外侧重于对水环境的管理、流域内土地利用/土地覆盖(LULC)<sup>[5]</sup>和酸雨问题及水文系统、植被和农业对气候变化敏感性等<sup>[6-8]</sup>方面的研究, 而国内主要集中于某一生态功能或过程敏感性研究, 包括水土流失、土壤侵蚀、土地沙化和土壤盐渍化等<sup>[1, 9-13]</sup>。而亦有诸多研究的重点在于生态敏感因子的识别、评价指标体系的构建及探寻改善生态环境质量的对策等方面。

笔者在分析国内外生态敏感性生态安全综合评价指标的基础上, 结合研究区实际情况及其数据的可获得性, 选用坡度、土地覆被类型、地质灾害、植被覆盖指数及生态服务价值变化作为密云生态敏感性评价的指标, 并借助 Model Builder 建模工具构建综合生态敏感性评估模型, 基于层次分析法计算各指标权重。最后在已完成的综合生态敏感性评

估模型上实现空间权重叠加, 识别出主要生态敏感区并绘制综合生态敏感性分等级图。

## 1 研究区概况

密云位于北京市东北部, 东与河北省承德、兴隆县毗连, 南与顺义区、平谷区接壤, 西与怀柔区相邻, 北隔长城与河北省滦平县相接, 位于 116°41' ~ 117°30' E, 40°14' ~ 40°48' N。密云县地处华北平原与蒙古高原的过渡地带, 属燕山山脉, 境内山峦起伏, 全县域总面积 2 227.4 km<sup>2</sup>, 其中山地(丘陵、低山、中山)、平原、水域(河流、水库、沟渠等)分别占土地总面积的 83.3%、8.3%、8.4%。全县属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候, 四季分明, 雨热同期, 干湿冷暖变化剧烈。年平均温度 10.8 °C, 年平均降水量 661.3 mm。位于县域中央的密云水库总面积 224 km<sup>2</sup>, 最大水面 188 km<sup>2</sup>, 设计库容 4.35 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。水库依靠白河、潮河两大水系补水, 上游流域面积为 15 840 km<sup>2</sup>。密云水库作为北京市的主要水源地, 其水质的保护和水库安全对北京市起着极为重要的作用, 关系到北京作为首都的地位和国土安全。

## 2 评价指标体系的构建

**2.1 评价指标体系构建的原则** 敏感性不同于脆弱性, 一般指自然状态下可能发生生态环境问题的大小, 因此在构建评价指标体系时主要综合考虑自然因素。同时, 评价指标的选择也要遵循主导因素、科学性、综合性、实践性及规范性等原则。

**2.2 评价单元的划分与指标的选择** 根据国内外区域生态敏感性研究的成果, 区域生态敏感性评价单元的选择主要有基于面状的矢量评价单元和点状的栅格评价单元两类, 其中面状的矢量评价单元包括行政单元、小流域和景观单元等。该文考虑到研究区的实际情况, 采用基于面状的矢量评价单元, 即以密云县 18 个镇为评价单元。由于生态系统具有综合性和复杂性特点, 生态敏感性指标选取不宜过细, 否则难免交叉重叠<sup>[14]</sup>。鉴于此, 根据研究区的实际状况, 在充分

**基金项目** 北京市财政资助项目(PXM2008\_178219\_055160)。

**作者简介** 周扬(1984-), 男, 贵州普安人, 硕士研究生, 研究方向: 生态安全和能源风险预测评估。\* 通讯作者, 副研究员, E-mail: lixl\_547@126.com。

**收稿日期** 2009-06-22

考虑指标体系构建原则的基础上,主要通过地质灾害、生态服务价值变化、植被覆盖指数、土地利用和坡度等影响因子对库区生态敏感性进行了评估。

### 3 数据来源与研究方法

**3.1 数据来源与处理** 该文所用资料包括《密云统计年鉴》;《北京市密云县生态县建设规划》(2005~2020);《北京城市总体规划》(2004~2020);1:25 万全国行政区划图;15 m 精度的 DEM 数据;密云县土地利用现状图及 TM 遥感影像。其中使用 ENVI 4.5 软件对 TM 影像进行辐射校正、大气校正和去云处理,并利用地形图进行几何精纠正,误差小于 1 个像元,同时计算研究区植被覆盖指数 (NDVI);使用 Arcgis 9.2 的 Georeferencing 模块对 1:25 万行政区划图进行几何校正,提取密云行政边界并数字化。

**3.2 研究方法** 生态敏感性是多个敏感因子共同作用的结果,研究时需借助一些数学模型并将定量和定性分析结合起来。目前,借助数学方法建立生态学模型已成为数学生态学的一个重要研究领域,并已建立了不少经典的研究模型。然而,利用 GIS 中的建模工具 (Model Builder) 来建立生态学、土壤学和其他相关研究的模型仍处于探索阶段。而使用 Model Builder 建模评估可以使繁琐的工作变得简单,具有计算过程快速、准确且结果更具客观性等优点,评估结果更加接近实际情况。因此,该文采用 Model Builder 构建库区生态敏感性综合评估模型,综合评估研究区的生态敏感程度。

依据国家有关生态功能区划工作生态敏感性指标体系分级标准,参照国家制定和颁布的有关环境标准、行业标准与设计标准,同时参考有关省区生态环境质量指标分级、评分标准,将单因子分为极敏感区 (IV)、敏感区 (III)、低敏感区 (II) 和非敏感区 (I) 4 个等级,并使用专家打分法 (9 分制) 构造判断矩阵,用层次分析法计算 5 个因子的权重。然后借助 Arcgis 9.2 强大的空间分析功能实现空间数据的叠加,完成综合生态敏感度的计算,并绘制出密云库区生态敏感性等级分布图。

## 4 库区生态敏感性研究

**4.1 生态敏感性评估模型的建立** Model Builder 是 ESRI 公司研发的 Arcgis 模型生成器,提供了一个图形化的操作环境,可以在其中创建及修改模型<sup>[15]</sup>。在 Model Builder 的画板中拖放相应的数据和工具,并使用连接线将这些模型元素连接起来使得整个模型图变为彩色即可执行;在模型属性中设置相应的参数和环境,一个完整的可复用空间处理模型则设计完成。

Arcgis 空间叠加分析主要是基于栅格图层 (数据) 的基础上完成。该文在使用 Model Builder 建模过程中,需要完成以下几个方面的工作:①基于数值高程模型 (DEM) 坡度的提取和重分类;②矢量数据向栅格的转换;③基于 TM 影像植被覆盖指数的提取和重分类等。基于 Model Builder 的综合库区生态敏感性评估过程如图 1 所示。

### 4.2 生态敏感因子的分析

#### 4.2.1 坡度与地质灾害。

**4.2.1.1 坡度的提取与分级。**基于 DEM 提取的坡度信息,根据前人对坡度敏感因子的研究成果,将研究区坡度分为 4

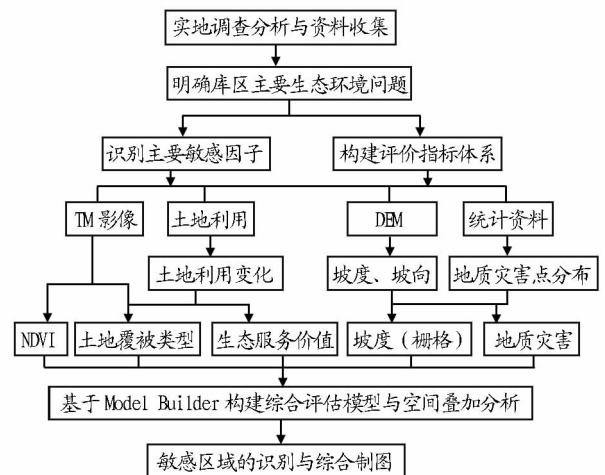


图 1 基于 Model Builder 综合生态敏感性评估

Fig. 1 Assessment of general ecological sensitivity based on Model Builder

个等级:0~5° (非敏感区)、5~15° (低敏感区)、15~25° (敏感区) 和大于 25° (极敏感区)。

**4.2.1.2 地质灾害分区。**根据对研究区的实地调查统计,结合《北京市地质灾害防治总体规划》(2001~2015)和李正国等<sup>[16]</sup>的研究成果可知:建国以来,研究区地质灾害主要以泥石流为主,共发生 11 次,占全县面积的 27.9%;崩滑塌易发区面积 281.54 km<sup>2</sup>,崩滑塌密度为 10.4 处/km<sup>2</sup>。据此,结合研究区坡度分布情况,将其地质灾害按易发程度及需治理的程度划分为 4 级 (图 2)。①较易发区:灾害主要发生在石城镇和冯家峪乡、不老屯镇、西田各庄镇北部,涉及 64 个行政村,为重点治理区;②中易发区 (次重点治理区):密云水库以东,包括古北口、高岭镇、新城子、太师屯镇等,涉及 116 个村庄,面积约 770.09 km<sup>2</sup>;③低易发区:占地面积 172.42 km<sup>2</sup>,包括东邵渠、巨各庄镇大部分地区以及河南寨部分地区,该区以低山丘陵为主,基本上不具备泥石流发生的条件,但由于坡度的原因,少数地区不排除地质灾害发生的可能性,为一般治理区;④不易发区:面积 544.92 km<sup>2</sup>,包括溪翁庄、西田各庄、十里堡、檀营和密云镇,该区不具备地质灾害发育的条件,也可划分为一般治理区。

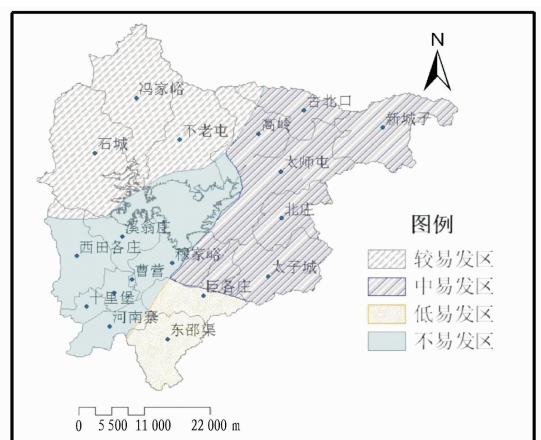


图 2 密云地质灾害易发区划分

Fig. 2 The division of geological disaster easy-happening areas in Miyun

**4.2.2 植被覆盖指数。**植被覆盖指数 (NDVI) 是指研究区

域内林地、草地、农田、建设用地和未利用地5种类型的面积占被评价区域面积的比重,用于反映被评价区域植被覆盖的程度。首先需要对TM影像进行辐射校正、去云,然后目视解译出植被覆盖类型和土地利用等信息,并计算植被覆盖指数。由于植被覆盖指数与区域的植被类型密切相关,其高低也会间接影响区域生态敏感性。采用ENVI 4.5专业软件完成密云地区植被覆盖指数的提取(图3),并在Arcgis的空间分析工具上完成NDVI随生态敏感性的分级(表2)。

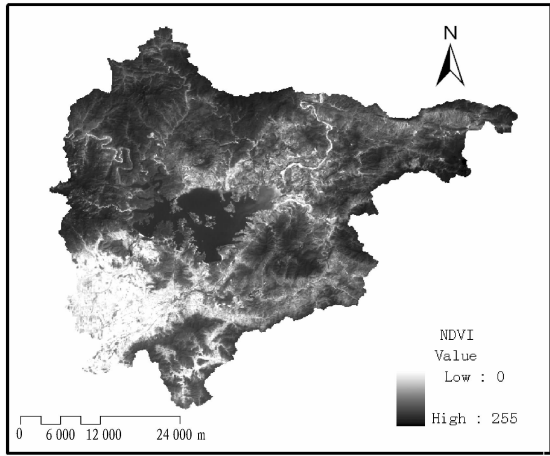


图3 密云植被覆盖指数

Fig. 3 Vegetation coverage index of Miyun

**4.2.3 生态服务价值。**生态系统服务功能是指人类从生态系统中获得的效益,包括生态系统对人类可以产生直接影响的供给功能、调节功能和文化功能,以及对维持生态系统的其他功能具有重要作用的支持功能。生态系统的敏感性受生态服务价值变化的影响,生态服务价值变化越大,生态系统受影响的程度就越高。

目前,计算生态服务价值的方法大多参照Costanza等<sup>[17]</sup>的方法,采用经济学方法计算得到几种生态系统单位面积的生态服务价值。考虑到密云县的具体情况,在已有相关研究成果的基础上,采用我国学者陈仲新等<sup>[18]</sup>提出的适合中国国情的计算参数。据此,在收集相关资料数据和分析Costanza和陈仲新等研究成果的基础上<sup>[17-18]</sup>,根据其对生态服务价值计算的方法和原理,对密云县各乡镇生态服务价值的变化进行了简单的计算(表1)。

表2 生态敏感因子分级

Table 2 Classification of the ecological sensitivity factors

生态敏感性分级 Classification of ecological sensitivity	坡度 Slope	地质灾害 Geological disaster	植被覆盖指数 Vegetation coverage index	生态服务价值变化 Ecological service value change	土地覆被类型 Land vegetation types
非敏感区(I)	0~5°	不易发区	150~255	-0.35~-0.02	建设用地
低敏感区(II)	5~15°	低易发区	100~150	-0.02~0.11	旱地、水田、公共用地
敏感区(III)	15~25°	中易发区	50~100	0.11~0.34	水库、河流、草地
极敏感区(IV)	>25°	较易发区	0~50	0.34~0.66	林地、灌木丛

4.3 生态敏感性综合评估

**4.3.1 指标权重的确定。**对生态系统敏感性进行定量评价时,由于各敏感因子的影响程度不同,除了客观选择正确的评价指标外,还需确定各指标在整个指标体系中的相对重要程度,即各指标的权重<sup>[5]</sup>。权重确定的方法很多,最常用的有

表1 密云县各乡镇生态服务价值及变化

Table 1 The ecological service value and change of various towns and villages in Miyun County

乡镇 Towns	2001年 元	2006年 元	变化率 Change rate	乡镇 Towns	2001年 元	2006年 元	变化率 Change rate
河南寨	1 945	2 516	0.29	高岭	5 063	8 210	0.62
东邵渠	1 958	1 115	0.23	古北口	3 775	4 012	0.06
冯家峪	7 040	7 189	0.02	新城子	4 810	5 208	0.08
十里堡	2 421	2 489	-0.35	太师屯	9 090	1 212	0.33
西田各庄	3 477	4 368	0.26	北庄	2 938	3 248	0.11
石城	9 892	1 466	0.48	檀营	49	48	-0.02
太子城	3 733	4 024	0.08	溪翁庄	2 222	2 456	0.11
巨各庄	3 823	4 216	0.10	密云镇	1 179	1 446	0.23
不老屯	5 221	4 682	-0.13	穆家峪	4 045	4 467	0.36

根据对密云生态服务价值变化的计算结果,把2001~2006年密云生态服务价值的变化率对生态敏感性的影响分为4个等级(表2),并绘制等级图(图4)。

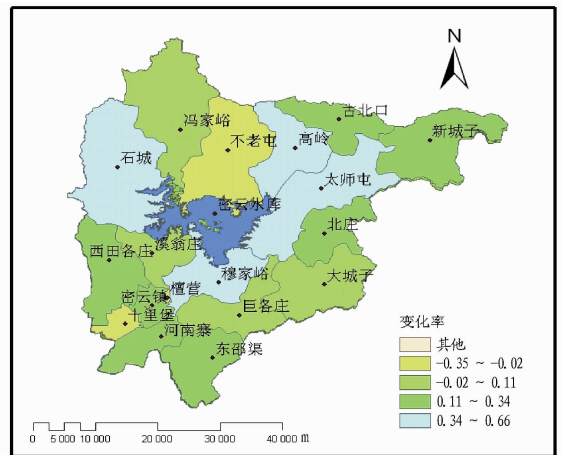


图4 密云生态服务价值变化情况

Fig. 4 Ecological service value changes of Miyun County

**4.2.4 土地覆盖类型。**根据TM遥感影像和土地利用现状图,考虑到生态服务功能的相似性,通过目视解译得出研究区土地利用类型,包括:①耕地;②林地;③草地;④居民工矿用地;⑤园地;⑥水域;⑦交通用地;⑧未利用地。据此,根据韩贵峰等<sup>[19]</sup>对山地生态敏感性评价的成果,将密云地区土地覆被对生态敏感性影响程度划分为4个等级(表2)。

层次分析法(AHP)、熵权法、灰色系统方法和模糊综合评价等。层次分析法具有可建立概念清晰、层次分明、逻辑合理的评价指标层次结构的优点。权重的确定应考虑具体情况,选择合适的方法以保证权重求取更具科学性。考虑到尽量避免指标间的重叠和数据的可获得性,结合指标体系的构建

原则,该文中的 AHP 仅包括目标层和指标层。其中目标层为综合生态敏感性;指标层包括植被覆盖指数、坡度、地质灾害、生态服务价值及土地利用。

结合研究区实际情况,建立层次清晰优点的基础上,采用层次分析法确定各评价指标的权重。层次分析法的主要步骤包括<sup>[20]</sup>:①明确问题;②建立层次结构;③构造判断矩阵;④层级排序和一致性检验。根据层次分析法的原理和计算步骤,请相关专家对研究区的敏感因子进行两两比较打分。打分采用 9 分制,两指标相比,前者比后者极端重要时赋 9 分;前者比后者强烈重要时赋 7 分;前者比后者明显重要时赋 5 分;前者比后者稍重要时赋 3 分;同等重要则赋 1 分,反之亦然,2、4、6、8 介于上述比较之间。通过统计多个专家的打分方案,取众数分值,得到 5×5 判断矩阵。求得该矩阵最大特征根为 5.01,由一致性检验公式  $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$  得到  $CI = 0.022$ 。查表得知 5 阶矩阵的随机一致性指标  $RI$  为 1.24,判断矩阵的随机一致性  $CR = CI / RI$ ,可得到  $CR = 0.018 < 0.1$ ,由此认为一致性通过。进而求出最大特征根所对应的特征向量,归一化后分别得到人口密度、植被覆盖指数、坡度、土地覆被类型、地质灾害和生态服务价值相对重要性权重  $W = [0.0579, 0.0873, 0.1569, 0.2869, 0.4109]$ 。

**4.3.2 生态敏感性综合评估。**从单因子得出的生态环境敏感性,只能反映某一因子的作用程度,不能综合反映区域生态敏感性的变异及变异程度<sup>[21]</sup>。鉴于此,对各敏感因子进行赋值,并通过下面的公式计算生态敏感性指数( $SS_j$ )。

$$SS_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n W_i \times C_i}$$

式中, $SS_j$  表示  $j$  空间单元生态敏感性指数; $C_i$  为  $i$  因子生态敏感性等级值; $W_i$  为第  $i$  个因子的权重; $n$  为因子数。然后利用分级标准来确定敏感性等级。

生态敏感性等级用百分制进行打分,极敏感(100)、敏感(75)、低敏感(50)、非敏感(25),然后在 Model Builder 已建好的生态敏感性综合评估模型上进行权重叠加(weighted overlay),叠加后得到研究区生态敏感性分区的值为 26.63 ~ 124.25。为了在图形上直观显示,将综合敏感性值进行线性拉伸到 0 ~ 100,然后在进行重分级:不敏感(0 ~ 25)、低敏感(25 ~ 50)、敏感(50 ~ 75)、极敏感(75 ~ 100),并绘制综合生态敏感等级分布图。由图 5 可知,密云地区生态敏感性极高的区域面积较小,占 6.5%,主要集中分布于石城镇大部分地区、高岭镇西北部及北庄东南部和西南地区;敏感区域面积相对较大,约占 24.3%,主要包括石城镇、北庄、冯家峪和不老屯以北、高岭镇、太师屯大部分地区以及东邵渠乡的部分地区;不敏感区和低敏感区占整个区域的 69.2%,不敏感区包括十里堡、巨各庄、大城子中部等地区,其余为生态低敏感区。分析其生态敏感性高低分布不均的原因可能包括:①地形:石城、北庄等地区坡度相对较高(部分地区大于  $25^\circ$ )、地势较为险峻,而坡度越大,对其生态敏感性的影响强度就相对较高;②地质灾害:密云地区地质灾害主要以泥石流为主,滑坡及崩塌为辅,地质灾害主要发生在密云水库的西北部,这也可能是研究区生态敏感的主要原因之一;③生态服务价值的变化:生态服务价值间接反映一个地区生态系统功能的运行情况,其变化程度很好地反映一个地区生态环境质量,

由权重计算可知,生态服务价值变化对生态环境的贡献率较大,是限制敏感性的因子等。

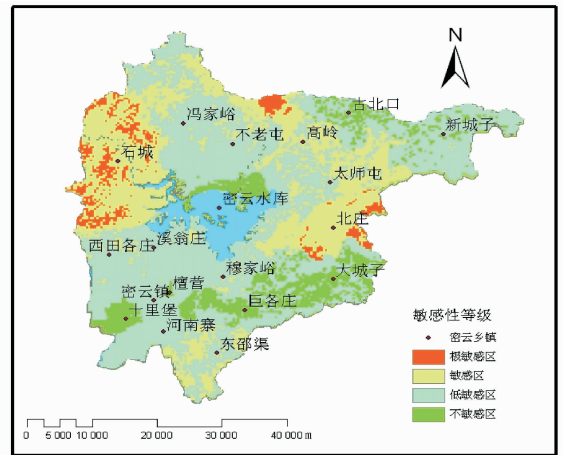


图 5 密云综合生态敏感性评价分级

Fig. 5 Classification of general ecological sensitivity assessment in Miyun Reservoir

## 5 讨论

总之,不同的敏感区域有各自的敏感特征,存在着不同的主导因子,应根据各自的特点实施不同的生态建设模式,尤其是加强对极敏感区域的保护和管理,应该是密云生态环境保护 and 建设的重中之重。该文结合研究区实际情况,把生态服务价值、地质灾害和坡度等自然因素结合起来,打破了以往仅从土地利用变化、土壤侵蚀等单因子评价区域的生态环境质量的方法。更为重要的是从生态服务价值变化的角度去审视区域生态敏感性,并使用 Model Builder 强大的建模工具建立多指标的综合生态敏感性评估模型,以准确、快速地完成评估工作。同时将研究结果与研究区的实际情况进行了对比,说明了选用的这些指标较具有实际意义,以期进一步推广到较大尺度的研究领域。

## 参考文献

- [1] 刘康,徐卫华,欧阳志云,等. 基于 GIS 的甘肃省土地沙漠化敏感性评价[J]. 水土保持通报,2002,22(5):29-31.
- [2] 杨志峰,徐俏,何常,等. 城市生态敏感性分析[J]. 环境科学,2002,22(4):360-364.
- [3] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报,2000,20(2):9-12.
- [4] 贺秋华,钱谊,李昌平,等. 贵州省生态环境敏感性评价方法研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(15):6432-6433,6515.
- [5] 林涓涓,潘文斌. 基于 GIS 的流域生态敏感性评价及其区划方法研究[J]. 安全与环境工程,2005,2(6):24-26.
- [6] MUZIK I. Sensitivity of hydrologic systems to climate change[J]. Can Water Res J, 2001, 26:233-252.
- [7] CARRINGTON D P, GALLIMORE R G, KUTZBACH J E. Climate sensitivity to wetlands and wetland vegetation in mid-Holocene North Africa[J]. Clim Dyn, 2001, 17:151-157.
- [8] KUMAR K S K, PARIKH J. Indian agriculture and climates sensitivity[J]. Global Environmental Change, Part A: Human and Policy Dimensions, 2001,11(2):147-154.
- [9] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [10] 王效科,欧阳志云,肖寒,等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. 生态学报,2001,21(1):14-19.
- [11] 王春菊,汤小华,郑达贤,等. GIS 支持下土壤侵蚀敏感性评价研究[J]. 水土保持通报,2005,25(1):68,70-74.
- [12] 卢远,华耀,周兴. 广西土壤侵蚀敏感性特征及防治建议[J]. 中国水土保持,2006(6):36-38.
- [13] 罗先香,邓伟. 松嫩平原西部土壤盐渍化动态敏感性分析与预测[J]. 水土保持学报,2000,14(3):36-40.

(下转第 14322 页)

酚的降解率就会下降。这是由于在 Fenton 反应系统中,加入少量的  $Fe^{2+}$  能与  $H_2O_2$  发生 Fenton 反应,促进  $H_2O_2$  分解产生  $\cdot OH$ ,但同时  $Fe^{2+}$  与  $H_2O_2$  反应也产生  $Fe^{3+}$ , $Fe^{3+}$  是  $H_2O_2$  的清除剂, $Fe^{2+}$  的浓度越大,产生  $Fe^{3+}$  就越多,这种清除作用就越强<sup>[4]</sup>。所以催化剂  $Fe^{2+}$  的用量应该适宜,在该体系中适宜的浓度为 0.3 mmol/L。

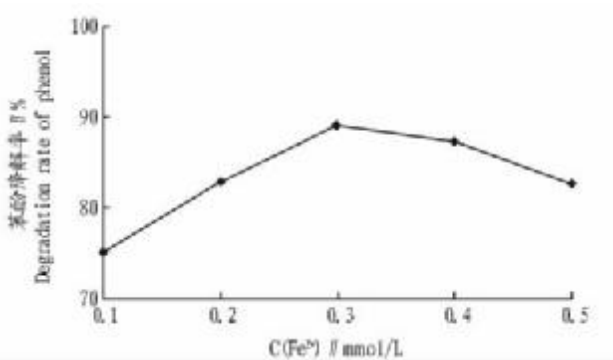
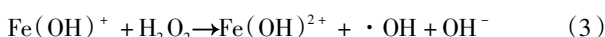
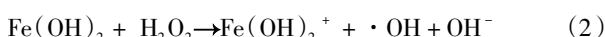
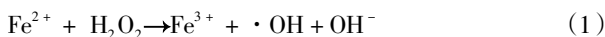


图2  $Fe^{2+}$  浓度对苯酚降解率的影响

Fig. 2 Effect of  $Fe^{2+}$  concentration on the degradation rate of phenol

**2.3 pH 值对苯酚降解率的影响** 苯酚初始为 100 mg/L,过氧化氢和硫酸亚铁浓度为 3.0 和 0.3 mmol/L,用波长为 254 nm 的紫外灯照射 20 min,不同 pH 值时苯酚的降解情况如图 3 所示。

在不同的 pH 值情况下,Fenton 系统有  $Fe^{2+}$ ,  $Fe(OH)^+$ ,  $Fe(OH)_2$  3 种存在形体,可分别与  $H_2O_2$  发生如下的反应:



pH 值较高时,易形成  $Fe(OH)_3$  胶体或  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$  不定形沉淀,导致体系的催化活性和光化学活性下降或消失,

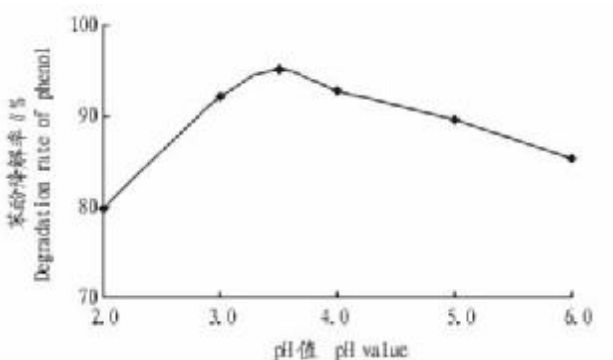


图3 pH 值对苯酚降解率的影响

Fig. 3 Effect of pH value on the degradation rate of phenol

不利于  $\cdot OH$  的产生;pH 值较低时, $H^+$  与  $\cdot OH$  反应生成  $H_2O$ ,降解率也将明显下降。所以该试验适宜 pH 值在 3.0 ~ 4.0。

**2.4 反应时间对苯酚降解率的影响** 反应时间对苯酚降解率的影响如图 4 所示。由图 4 可知,在最优化反应条件下,在开始反应的 15 min 内,苯酚降解率迅速增加至 80%,随后增长变缓,30 min 时降解率达到 97%,1 h 以后,苯酚基本反应完全。

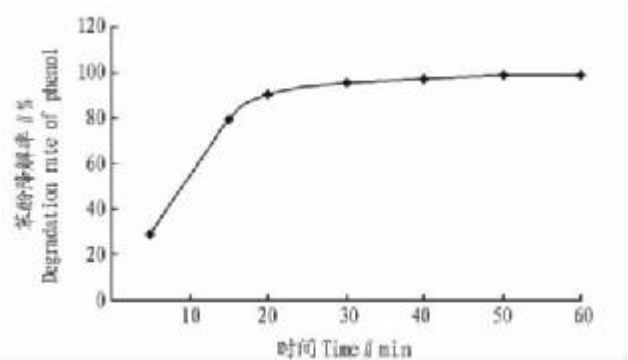


图4 反应时间对苯酚降解率的影响

Fig. 4 Effect of reaction time on degradation of phenol

**2.5 Fenton 法降解苯酚的动力学研究** 在最优化反应条件下,通过测定体系不同时刻吸光度值,再结合苯酚溶液吸光度与浓度的标准曲线,得到在反应时间分别为 5、15、20、30、40、50、60 min 时,苯酚浓度依次为 72、20、10、5、3、1.4、0.8 mg/L。按照均相光催化反应的一级动力学关系  $\ln c_0 - \ln c_t = kt$ ,笔者以  $\ln c_t$  对  $t$  作图,得到直线方程  $\ln c_t = -0.0777t + 4.214$ , $R^2 = 0.9685$ 。结果表明,该条件下的光催化降解苯酚反应符合一级反应动力学关系,速率常数为  $0.0777 \text{ min}^{-1}$ 。

### 3 结论与讨论

(1)采用紫外光助 Fenton 法降解废水中苯酚,苯酚浓度为 100 mg/L 时,其最适降解条件为: $H_2O_2$  浓度为 3.0 mmol/L; $FeSO_4$  浓度为 0.3 mmol/L;pH 值 3.5。

(2)在最适条件下反应 1 h,降解率为 99%,说明 UV-Fenton 法是一种非常有效的去除废水中苯酚的方法。

### 参考文献

[1] CHAMARRO E, MARCO A, ESPLUGAS S. Use of Fenton reagent to improve organic chemical biodegradability [J]. Water Research, 2001, 35 (4): 1047 - 1051.  
 [2] 杨岳平,吴星义,徐新华,等. 印染废水的光助 Fenton 处理[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(3): 242 - 247.  
 [3] 聂麦茜,吴蔓莉. 水分析化学[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社, 2003: 272 - 277.  
 [4] 陈传好,谢波,任源,等. Fenton 试剂处理废水中各种影响因子的作用机制[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 93 - 96.  
 [5] 褚衍洋,李玲玲,付融冰. Fenton 试剂氧化苯酚过程中  $Fe(II)$  浓度的变化[J]. 环境工程学报, 2008, 2(8): 1057 - 1061.

(上接第 14275 页)

[14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2002: 224 - 225.  
 [15] 罗鹏,石军南,孙华. 基于 GIS 空间模型的库区生态敏感性评价研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 255 - 258.  
 [16] 李正国,吴健生,李卫峰. 密云县地质灾害危险性评价[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 78 - 81.  
 [17] COSTANZA R, D'ARCE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253 - 259.

[18] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 2000, 45 (1): 17 - 22.  
 [19] 韩贵锋,赵珂,袁兴中,等. 基于空间分析的山地生态敏感性评价——以四川省万源市为例[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 531 - 537.  
 [20] 左伟,王桥,王文杰,等. 区域生态安全综合评价模型分析[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 209 - 224.  
 [21] 刘康,欧阳志云,王效科,等. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2711 - 2718.