

黄土高原典型矿区水环境承载力研究

康娜¹, 杨永刚^{2,3}, 李洪建², 李晋昌²

(1. 山西大学 环境与资源学院, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006; 3. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: [目的] 认清黄土高原矿区的水环境承载力, 科学合理地利利用有限的水资源。[方法] 以黄土高原典型矿区——山西省古交市为例, 基于其水文、生态、社会、经济的实际情况, 选取了水资源利用率、人均水资源可利用量、人均供水量、生态需水率、生活需水定额、需水量模数、供水量模数、耕地灌溉率和万元工业产值需水量 9 项评价指标, 构建水环境承载力量化模型, 对试验区 2000、2010、2020 和 2030 年的水环境承载力水平进行评价和预测。[结果] 各年综合评判结果显示其水环境承载力属于中等偏低的不安全水平, 试验区不仅存在资源型缺水, 还存在水质型缺水和工程型缺水的状况。[结论] 水资源的开发利用要注重开源节流、巩固基础工作和重视生态目标以提高黄土高原区域及类似地区的水环境承载力水平。

关键词: 模糊评价模型; 水环境承载力; 矿区; 生态需水; 评价预测

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0274-07

中图分类号: TV213.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.050

A Study on Water Environmental Carrying Capacity of Typical Mining Area in Loess Plateau

KANG Na¹, YANG Yonggang^{2,3}, LI Hongjian², LI Jinchang²

(1. College of Environmental and Resource Sciences of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi

030006, China; 2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

3. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] To recognize the water environmental carrying capacity in mining areas in Loess Plateau in order to use the limited water resources scientifically and efficiently. [Methods] Taking Gujiao City of Shanxi Province, a typical mining area in Loess Plateau as a case study, based on its hydrological, ecological, social and economic conditions, we selected nine evaluation indexes including utilization rate of water resources, per capita available volume of water resources, per capita water supply quantity, ecological water requirement quantity, water demand quota of lives, modulus of water requirement and supply, irrigation rate of cultivated land and water requirement quantity of industrial output per ten thousand yuan. We then constructed a quantitative model to evaluate and predict the water environmental carrying capacity in 2000, 2010, 2020 and 2030, respectively. [Results] According to the final integrated evaluation values in each year, the carrying capacity in the area was in moderate level, and weak and unsafe due to the scarcity of water resources water pollution and incomplete water-providing engineering constructions. [Conclusion] Some countermeasures were proposed for the development and utilization of water resources, including opening up the source and regulating the flow, the consolidation of foundation work, the consideration of ecological aims and so on, to improve water environmental carrying capacity in study area and other similar regions of Loess Plateau.

Keywords: fuzzy assessment model; water environmental carrying capacity; mining area; ecological water requirement; evaluation and prediction

黄土高原矿区水资源遭受着采矿活动影响破坏、过度开采及污染浪费等多重压力, 打破了生态环境的良性循环, 制约了社会经济的发展^[1]。认清黄土高原

矿区的水环境承载力, 科学合理地利利用有限水资源已迫在眉睫。目前, 国内外应用于水环境承载力研究的方法较多。系统动力学法^[2]由于参变量的控制问题

收稿日期: 2013-12-12

修回日期: 2014-01-21

资助项目: 山西省青年科技研究项目“生态脆弱矿区水生态退化成因与修复重建技术集成研究”(2012021026-3); 山西省软科学研究项目“煤炭开采对山西省水资源的影响评价及防治对策”(2014041016-1); 国家国际科技合作专项“山西汾河流域水资源联合调控技术合作研究”(2012DFA20770)

第一作者: 康娜(1988—), 女(汉族), 山西省太原市人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: kangna_sxu@163.com。

通信作者: 杨永刚(1982—), 男(汉族), 山西省运城市人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: gangyongyang@126.com。

更适用于短中期研究;主成分分析法适用于同一时间不同地区的研究;多目标决策或规划法只注重整体最优,且建模和求解较难;背景分析法和常规趋势法更多注重单因素的分析,忽略了各因子之间的联系^[3];模糊综合评价法是指通过模糊数学的方法对各主要影响因素进行单因子分析,再通过各因素的权重集和评判矩阵综合得出评价结果^[1,3],该结果简单直观,能比较真实而全面的反映研究区长期的水环境承载力情况^[4]。该法在技术方法上主要结合:IAHP法、AHP法、Delphi法、灰色关联分析法和3S技术等。在区域上主要涉及:西北干旱地区的阿克苏河^[5]和玛纳斯河^[6]等流域尺度;中国^[7]和西北新青陕甘宁5省等大区域尺度^[8-10];乌鲁木齐、石河子、克拉玛依^[11]、兰州市^[12]、河津市^[13]和长武县^[14]等县市尺度等。而针对黄土高原矿区水环境承载力的研究较少,对矿区水环境承载力水平的认识还很模糊。

本文基于对黄土高原典型矿区——山西省古交市水文、生态、社会、经济的调查分析,构建水环境承载力量化模型,对研究区2000,2010,2020和2030年的水环境承载力水平进行评价预测。研究以期对黄土高原类似地区的水资源管理与水效益提高提供科学依据与参考^[15-16]。

1 研究区概况

1.1 自然条件

试验区古交市地处 $37^{\circ}40'6''-38^{\circ}8'9''N, 111^{\circ}43'8''-112^{\circ}21'5''E$,属于北温带大陆性气候,夏季炎热多暴雨,冬季寒冷少雨,多年平均气温为 $8.7^{\circ}C$,多年平均降水为 473.2 mm ,从东南向西北递减,时空分布不均,年蒸发量为年降水量的4.1倍。位于山西省太原市的西北部,汾河一库和汾河二库、兰村泉域及太原市之间,山地丘陵面积占全区总面积的95.8%,仅有4.2%属于河谷平川,平均海拔 $1\ 607\text{ km}^{[17]}$;

1.2 社会经济条件

试验区国土面积为 $1\ 584\text{ km}^2$,2000年人口为20.57万人,2010年人口为20.53万人。该区煤炭资源丰富,占全省煤炭储量的5%,煤炭资源分布广泛,占全市面积的47.6%,以能源、化工为主,经济发展迅速,由山西省统计年鉴,古交市2000年工业总产值为369 034万元,2010年工业总产值为417 465万元。

2 研究方法

2.1 数据来源

研究依据2000—2010年《山西省统计年鉴》《山西省水资源公报》《中国水资源供需预测分析》等相关

资料,结合试验区野外调查,基于试验区实际情况,对所需数据进行收集整理和分析计算。

基于30 m空间分辨率的数字高程模型(DEM)图像,利用ArcGIS水文分析模块等功能,生成了流域盆地和集水范围(附图22)。汾河从西部的李八沟流入至东侧的一步岩流出进入太原市内,全长约46 km,南北两侧的狮子河、屯兰川、原平川和大川河等支流呈扇形汇入其中,兼有山地型和夏雨型的特征,该区年平均水资源总量为 $1.64 \times 10^8\text{ m}^3$,其中,地表水为 $9.43 \times 10^7\text{ m}^3$,地下水 $8.48 \times 10^7\text{ m}^3$,重复计算量为 $1.53 \times 10^7\text{ m}^3$ ^[18]。

2.2 水环境承载力量化评价模型的构建^[5,8,19]

2.2.1 构建关系矩阵R 设定两个有限集合 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, U 代表评判因素集, V 代表评语集, R 为模糊评判矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & r_{ij} & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: r_{ij} ——第*i*个因素对第*j*个等级的隶属度,矩阵中的第*i*行即代表第*i*个因素对应第*j*个等级的单因素评判结果。

2.2.2 AHP法计算权重模糊矩阵A 层次分析法是围绕决策问题建立一个多因素相互作用的大系统,利用评价因素构成一个多层次结构分析模型,通过确定判别矩阵,求出最大特征值,将特征向量归一化处理得到各因子权重的方法^[6]。首先,运用成对比较法构造判断矩阵S:

$$S = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x_{ij} ——因素 x_i 对因素 x_j 的相对重要性程度;其次,通过Matlab计算判断矩阵S的最大特征根值 λ_{\max} ,并将其对应的特征向量归一化处理得到各指标的权重;最后,计算一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 和随机一致性比率 $CR = CI / RI$,检验权重系数分配的合理性,当 $CR < 0.1$ 时,表明权重值有效,其中, n 为评价因素的个数,RI为平均随机一致性指标,通常1,2,3,4阶判断矩阵对应的RI值分别为0,0.058,0.9。

权重值通过检验后,得到U上的模糊子集A,代表评判因素重要程度的权重系数:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad (3)$$

$$(0 \leq a_i \leq 1 \text{ 且 } a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1)$$

式中： a_i ——第 i 个指标的权重，表示对 A 的隶属度，在一定程度上表示 U_i 评定等级的能力。

2.2.3 综合评判模型 模糊评判公式为：

$$B = A \cdot R \tag{4}$$

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \quad (0 \leq b_j \leq 1)$$

式中： B —— V 上的模糊子集； b_j ——等级 V_j 对综合评判所得模糊子集 B 的隶属度，代表综合评判的结果。

2.2.4 计算综合评分值 综合评定时，首先将评价因素划分为 j 个等级，同时对每个等级进行打分和赋值，评分值为 c_j ，结合矩阵 B 中所得 b_j 的值，按照公式(5)对水环境承载力进行综合评分。

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^3 b_j^k \cdot c_j}{\sum_{j=1}^3 b_j^k} \tag{5}$$

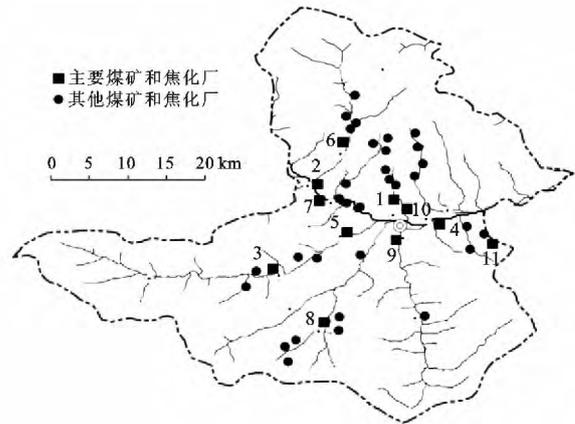
式中： k ——为突出优势等级的作用而设的系数，通常在半湿润半干旱地区 k 值为 1，最后计算所得的 α 值越大，水环境承载力水平越高，潜力也越大。

3 结果分析

水环境系统是一个复杂的大系统，其承载力水平的大小受水资源条件(数量和质量)、社会 and 经济发展水平(供应和需求)以及维持自然环境正常运转的生态需水量等多层次因素的制约^[9]。因此，本文以 75% 降水保证率(中等干旱年)和常规节水方案为前提，运用构建的水环境评价量化模型对试验区不同水平年(2000 年为基准年，2010 年为近期预测年，2020 年为中期预测年，2030 年为远期预测年)的水环境承载力状况进行评价分析。

3.1 矿区水文地质分析

目前，试验区的主要煤矿有：央企华润集团所属的原相矿，西山煤电集团所属的西曲矿、镇城底矿、马兰矿、东曲矿和屯兰矿，年产过百万吨的嘉乐泉矿和炉峪口矿，以及古交市政府所属的矾石沟矿和石千峰矿等(图 1)。



注:1. 西曲矿; 2. 镇城底矿; 3. 马兰矿; 4. 东曲矿; 5. 屯兰矿; 6. 嘉乐泉矿; 7. 炉峪口矿; 8. 原相矿; 9. 大川矿; 10. 矾石沟矿; 11. 石千峰矿。

图 1 研究区煤矿和焦化厂分布

黄土高原典型矿区—古交试验区的煤田主要是石炭、二叠纪煤层，即含煤层覆盖于寒武、奥陶纪的岩溶含水地层之上，因此，采矿活动会破坏地表水和地下水的水力联系导致水资源减少和地下水“矿坑水化”^[15]，使得试验区面临着资源型缺水和水质型缺水的双重压力，生态不断恶化。研究区分为两大构造地貌单元：东部、北部(灰岩)和西南部(大理岩)以流水侵蚀为主的构造侵蚀类型，中南部以风力剥蚀为主的构造剥蚀类型，地质构造和岩性特征复杂^[17]，使得地表水和地下水的转化较强烈。据相关研究，目前，受采矿活动的影响，试验区的孔隙地下水开采已达到极限状态，裂隙水已接近枯竭，深层岩溶地下水的水量也出现了衰减，水质不断恶化。

3.2 量化因子的选取计算

基于水环境系统的层次性，按照评价指标选取的科学性、可用性、可靠性、整体性(定性和定量)和典型性等原则^[7]，结合水资源供需分析，考虑典型试验区水资源利用的具体情况，从其水环境条件、社会、经济和生态环境状况 4 个方面出发，选取 9 项评价指标(表 1)。

表 1 试验区水环境承载力评价指标体系

评价因素	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年	因素含义
水资源利用率 $U_1/\%$	22.51	58.46	73.18	87.31	可供水资源量/可利用水资源总量
人均水资源可利用量 $U_2(\text{m}^3/\text{人})$	111.46	290.93	386.84	428.22	可供水资源量/总人口
人均供水量 $U_3(\text{m}^3/\text{人})$	85.83	226.93	283.63	267.02	实际供水量/总人口
生态需水率 $U_4/\%$	4.68	4.44	4.17	4.12	生态环境需水量/总需水量
生活需水定额 $U_5(\text{L}/\text{人} \cdot \text{d})$	61.71	89.68	97.66	106.95	生活需水总量/总人口
需水模数 $U_6/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	3.17	3.68	4.54	5.43	需水总量/土地面积
供水模数 $U_7/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	1.45	3.77	4.71	5.62	供水总量/土地面积
耕地灌溉率 $U_8/\%$	4.24	5.15	5.55	5.55	灌溉面积/耕地面积
万元工业产值需水量 $U_9(\text{m}^3/\text{万元})$	101.9	100.1	98.33	96.59	工业需水量/工业总产值

其中,在供需水量指标的选取和计算中充分考虑了采矿活动对水环境的影响。主要指标的具体计算方法与过程见下:

(1) 人口增长预测。运用趋势外推法,即通过收集长系列的数据得出拟合模型计算。

(2) 需水量的预测。包括生态需水、生活需水和生产(第一、二、三产业)需水。

生态需水量的计算具有实际和长远意义,主要包括河道内(维持河道系统正常运转的生态基流量)和河道外(城镇河湖、绿地、环境卫生需水量、地下水超采回灌需水量及水土保持需水量等)的生态环境需水量,通过资料中不同水平年的合理规划面积和各类用地的生态需水定额计算得出。生活需水的预测通过城乡人口数量及对应的需水定额得出。第一产业(农林牧渔畜业)需水量通过各类用地面积和需水定额得出;第二产业(工业和建筑业)需水量的计算根据实际情况,以煤炭、火电工业的万元产值取水量为主,结合各类工业总产值分区行业预测得出;第三产业需水量通过预测的产值和需水定额得出。

(3) 供水量的预测。为保障汾河二库和深层岩溶地下水的水质安全^[20],试验区工矿企业和居民生活所排放的污水必须经达标后再排放和回用,试验区近期和中期规划的地下水开采量将减少,中水利用工程将增多,2020 年之后将有引黄水作为外来水源供给本区,预测年份的供水量数据即根据这些资料综合计算得出。

3.3 评价等级的确定

各评价因子分级指标的确定借鉴了相关研究^[5,8,14]中用到的评价标准和一些专家的建议,结合试验区水资源现状,将评价因子的水环境承载力影响程度划分为 3 个等级(表 2): V_1 属良好级别,代表研究区水环境承载力和开发潜力均较大,对社会经济发展的制约力较小; V_2 属中等级别,代表该区的水资源开发利用程度较大,水环境承载力水平较小,但在合理调控水资源的前提下仍具有一定的开发利用潜力; V_3 级别则代表水环境承载力水平已达到极限,开发利用潜力较小,如果不采取节水、调水、污水回用和转变产业结构等相关措施,区域的发展将受到严重的制约。

表 2 各评价因子的分级指标

评价因素	良好级别	中等级别	极限最低
水资源利用率 $U_1/\%$	<30	30~80	>80
人均水资源可利用量 $U_2(\text{m}^3/\text{人})$	>550	550~400	<400
人均供水量 $U_3(\text{m}^3/\text{人})$	>400	400~200	<200
生态需水率 $U_4/\%$	>5	5~2	<2
生活需水定额 $U_5(\text{L}/\text{人} \cdot \text{d})$	<70	70~130	>130
需水量模数 $U_6/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	<1.5	1.5~4.7	>4.7
供水量模数 $U_7/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	<1.5	1.5~3.9	>3.9
耕地灌溉率 $U_8/\%$	<20	20~30	>30
万元工业产值需水量 $U_9(\text{m}^3/\text{万元})$	<20	20~100	>100
评分值 c_j	0.95	0.5	0.05

为更好的反映和定量分析不同水平年试验区水环境的承载力水平,参考全国水资源供需分析和相关研究中的有关标准,按照每个级别的大小分别赋予 0.95,0.5 和 0.05 的评分值^[13,19],数值越高,水环境承载力水平越高,开发潜力越大。表 2 显示,评价因素 U_2, U_3 和 U_4 与水环境承载力水平呈负相关,其余因素与水环境承载力呈正相关。

3.4 评判矩阵 R 的计算——相对隶属函数

根据以上分析可知:评判因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_9\}$,评语集 $V = \{V_1, V_2, V_3\}$,评判矩阵中的 r_{ij} 可以通过评价因素的实际值和分级指标临界值进行计算。由表 2 可以看出,各等级之间数值是平滑过渡的,但评语等级存在着相差一级的跳跃现象,对于中

间区间 V_2 ,令其落在区间中点时的隶属度为 1,落在两侧边缘点的隶属度为 0.5,中点向两侧则按线性递减处理^[6];对于两侧区间 V_1 和 V_3 则相反,令其距临界值越远属于两侧区间的隶属度就越大,位于临界值上属两侧等级的隶属度各为 0.5^[12]。按照上述方法和相对隶属函数的含义,构造了各评价等级的相对隶属函数:

$$\mu_{vi} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{K_1 - U_i}{K_2 - U_i}) & (U_i < K_1) \\ 0.5(1 - \frac{U_i - K_1}{K_2 - K_1}) & (K_1 \leq U_i < K_2) \\ 0 & (U_i \geq K_2) \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{v2} = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{K_1 - U_i}{K_2 - U_i}) & (U_i < K_1) \\ 0.5(1 + \frac{U_i - K_1}{K_2 - K_1}) & (K_1 \leq U_i < K_2) \\ 0.5(1 + \frac{K_3 - U_i}{K_3 - K_2}) & (K_2 \leq U_i < K_3) \\ 0.5(1 - \frac{K_3 - U_i}{K_2 - U_i}) & (U_i \geq K_3) \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{v3} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{K_3 - U_i}{K_2 - U_i}) & (U_i \geq K_3) \\ 0.5(1 - \frac{U_i - K_3}{K_2 - K_3}) & (K_2 \leq U_i < K_3) \\ 0 & (U_i < K_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中： K_1, K_3 —— V_1 和 V_2, V_2 和 V_3 等级的临界值； K_2 ——中间等级 V_2 的区间中点值， $K_2 = (K_1 + K_3)/2$ 。

根据所选因素与水环境承载力的正负相关关系知，对于正相关因素 U_1 和 $U_5 - U_9$ 选取公式(6)——(8) 进行计算，对于负相关因素 U_2, U_3 和 U_4 只需要将公式(6)——(8) 中的“ \leq ”改为“ \geq ”，“ $<$ ”改为“ \leq ”用原公式计算即可。图 2 和图 3 分别为正负相关性评价因子的相对隶属函数图解：

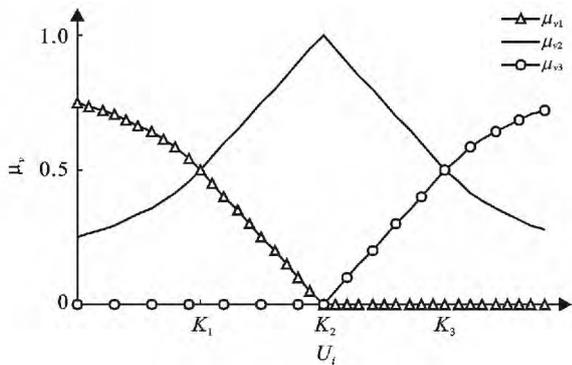


图 2 正相关评价因子相对隶属函数

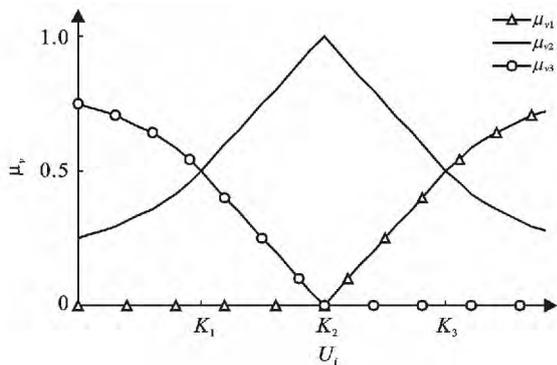


图 3 负相关评价因子相对隶属函数

通过公式(6)——(8)，可以得出各因素对应于各等级的隶属度 r_{ij} ，其中， $r_{i1} = \mu_{v1}(U_i)$ ， $r_{i2} = \mu_{v2}(U_i)$ ， $r_{i3} =$

$\mu_{v3}(U_i)$ ($i=1, 2, \dots, 9$)，经计算分别得到 2000, 2010, 2020 和 2030 年这 4 个水平年的评判矩阵 $R_1, R_2,$

R_3, R_4 ：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.6153 & 0.3847 & 0 \\ 0 & 0.1032 & 0.8969 \\ 0 & 0.2335 & 0.7665 \\ 0.3933 & 0.6067 & 0 \\ 0.6083 & 0.3918 & 0 \\ 0 & 0.9781 & 0.0219 \\ 0.5200 & 0.4800 & 0 \\ 0.8796 & 0.1204 & 0 \\ 0 & 0.4773 & 0.5227 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.9308 & 0.0692 \\ 0 & 0.2037 & 0.7963 \\ 0 & 0.6347 & 0.3654 \\ 0.3133 & 0.6867 & 0 \\ 0.1720 & 0.8280 & 0 \\ 0 & 0.8188 & 0.1813 \\ 0 & 0.5542 & 0.4458 \\ 0.8741 & 0.1259 & 0 \\ 0 & 0.4988 & 0.5013 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.6364 & 0.3636 \\ 0 & 0.4254 & 0.5746 \\ 0 & 0.9182 & 0.0819 \\ 0.2233 & 0.7767 & 0 \\ 0.0390 & 0.9610 & 0 \\ 0 & 0.5500 & 0.4500 \\ 0 & 0.2985 & 0.7015 \\ 0.8715 & 0.1285 & 0 \\ 0 & 0.5209 & 0.4791 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3869 & 0.6131 \\ 0 & 0.6881 & 0.3119 \\ 0 & 0.8351 & 0.1649 \\ 0.2067 & 0.7933 & 0 \\ 0 & 0.8842 & 0.1158 \\ 0 & 0.3434 & 0.6567 \\ 0 & 0.2055 & 0.7945 \\ 0.8715 & 0.1285 & 0 \\ 0 & 0.5426 & 0.4574 \end{bmatrix}$$

3.5 权重矩阵 A 的确定

利用层次分析法(AHP法)首先确定目标层为水环境承载力综合评价指数。准则层为水资源量指数(U_2)，供水状况指数(U_1, U_3, U_7)，需水状况指数(U_5, U_6, U_8, U_9)和生态安全指数(U_4)。指标层为 U_1

— U_9 各评价因素。其中,各层评价因素满足 $CR < 0.01$ 的一致性检验,权重值合理有效(表 3)。通过归一化处理 and 加权平均,确定 U_1-U_9 的权重矩阵为 (0.143 4,0.129 4,0.123 6,0.158 5,0.080 5,0.102 9,0.089 0,0.080 5,0.092 1)。

根据各评价因子对试验区水环境承载力影响程度的大小,参照全国水资源评价标准和山西省水环境承载力的相关研究成果,结合试验区水资源状况对各因素进行分析。水资源利用率最能反映出水资源供需状况和可持续利用的程度,人均水资源可利用量和

人均供水量能很好的反映出人口对区域水资源的需求状况,同时,考虑到试验区采矿活动导致生态环境破坏的事实,生态环境需水将对未来生态环境的保护和水资源可持续利用具有较大影响,所以,分别赋予 0.13,0.12,0.12,0.13 的权重值,其余因素均为 0.1,得到权重矩阵 (0.13,0.12,0.12,0.13,0.10,0.10,0.10,0.10,0.10)。

为保障权重值选取的科学性和典型性,将两种结果求平均值后得到权重矩阵 $A = (0.14,0.12,0.12,0.14,0.09,0.10,0.10,0.09,0.10)$ 。

表 3 试验区评价因子权重值与一致性检验

目标层	准则层			指标层			
	评价准则	权重	一致性(CR)	评价指标	权重	一致性(CR)	
力试 综验 合区 评水 价环 指境 数承 载	水资源量指数	0.129 4	0.008 1	U_2	0.129 4	0.008 6	
	供水状况指数	0.356 1		U_1	0.402 8		
				U_3	0.347 2		
				U_7	0.250 1		
	需水状况指数	0.356 1		U_5	0.226 2		0.002 1
				U_6	0.288 9		
				U_8	0.226 2		
	生态安全指数	0.158 5		U_9	0.258 8		
				U_4	0.158 5		

3.6 综合评分值的计算与分析

结合评判矩阵 R 和权重矩阵 A 的计算结果,对 $B_1 = A \times R_1 =$

水环境承载力进行模糊综合评判。如 2000 年(现状年)水环境承载力的多因素评判矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.14 & 0.12 & 0.12 & 0.14 & 0.09 & 0.10 & 0.10 & 0.09 & 0.10 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.615 3 & 0.384 7 & 0 \\ 0 & 0.103 2 & 0.896 9 \\ 0 & 0.233 5 & 0.766 5 \\ 0.393 3 & 0.606 7 & 0 \\ 0.608 3 & 0.391 8 & 0 \\ 0 & 0.978 1 & 0.021 9 \\ 0.520 0 & 0.480 0 & 0 \\ 0.879 6 & 0.120 4 & 0 \\ 0 & 0.477 3 & 0.522 7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.327 1 & 0.418 8 & 0.254 1 \end{bmatrix}$$

结合表 2 中评价因素 3 个等级的评分值 c_j 可以求出 2000 年试验区水环境承载力的综合评分值 α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{j=1}^3 b_j^k \cdot c_j}{\sum_{j=1}^3 b_j^k} = (0.95 \quad 0.50 \quad 0.05) \times \quad (9)$$

$$(0.327 1 \quad 0.418 8 \quad 0.254 1) = 0.532 9$$

按照相同的方法和步骤,分别得出 2010,2020 和

2030 年不同等级的多因素综合评价隶属度 B 的评判结果及综合评分值 α_i (表 4)。

表 4 试验区水环境承载力综合评估预测结果

年份	综合评价隶属度 B			综合评分值 α_i
	良好级别	中等级别	极限最低	
2000	0.327 1	0.418 8	0.254 1	0.532 9
2010	0.138 0	0.600 1	0.261 9	0.444 2
2020	0.113 2	0.594 0	0.292 7	0.419 2
2030	0.107 4	0.548 3	0.344 3	0.393 4

4 结论

综合评判结果 b_j 对中高评价等级的隶属度越大,评分值 α_i 越高,表明水资源的开采程度越低,水环境承载力水平越高,反之,则水资源的开采程度越高,水环境承载力水平越低。

(1) 综合评判结果 b_j 对 V_1 隶属度最大(0.327 1)且评分值 α_i 最高(0.532 9)的年份是现状水平年,这与 2000 年试验区的社会发展水平较低,水资源开采技术不高,且用水量较少的现状相符;同时,评分值 α_i 最高值小于 0.55,说明试验区水资源虽仍具备一定的开采潜力,但水环境承载力水平已较小,水资源供需矛盾较突出。

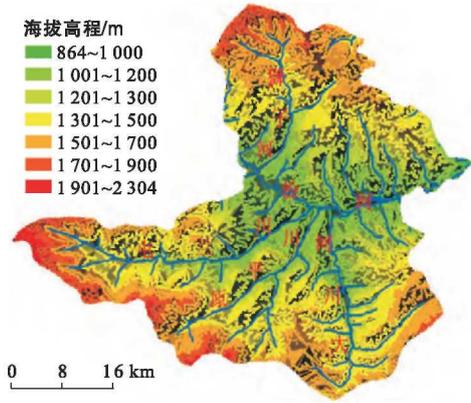
(2) 从 2000—2030 年,综合评判结果 b_j 对 V_1 的隶属度和评分值 α_i 均逐渐减小但幅度变缓,说明随着试验区人口的增加和社会经济的发展,对地表水和地下水的开采力度不断加大,水环境承载力水平不断下降,但由于后期规划供水工程和引黄水量的增加,水环境承载力的下降幅度减缓,这说明试验区存在工程型缺水的现状。

(3) 各年综合评判结果 b_j 对于中等级别 V_2 和最低级别 V_3 的隶属度较大,表明试验区的水环境承载力属于中等偏低的不安全水平;煤炭等主要工业需水量占总需水量的比例较大,生态需水量所占比例较小,节水工程和引水工程建设不足,使得试验区陷入资源型缺水、水质型缺水和工程型缺水的局面。

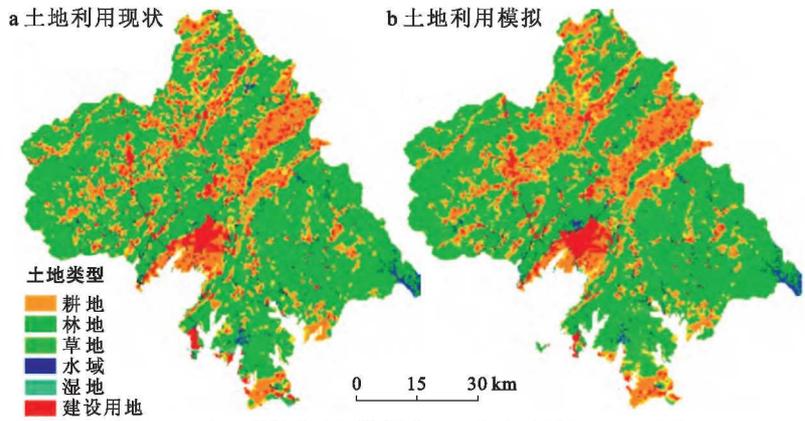
试验区水环境承载力处于低水平,水资源供需矛盾比较突出,在今后水资源开发利用中应更加注重开源节流,巩固和完善基础工作;合理开发利用与跨区域调水相结合,增加水资源供应量;调整产业结构与废污水回用相结合,提高水资源利用率;在水源区或生态脆弱区禁止开矿,以减少污染源;生产生活目标与生态目标相结合,实现可持续发展。

[参 考 文 献]

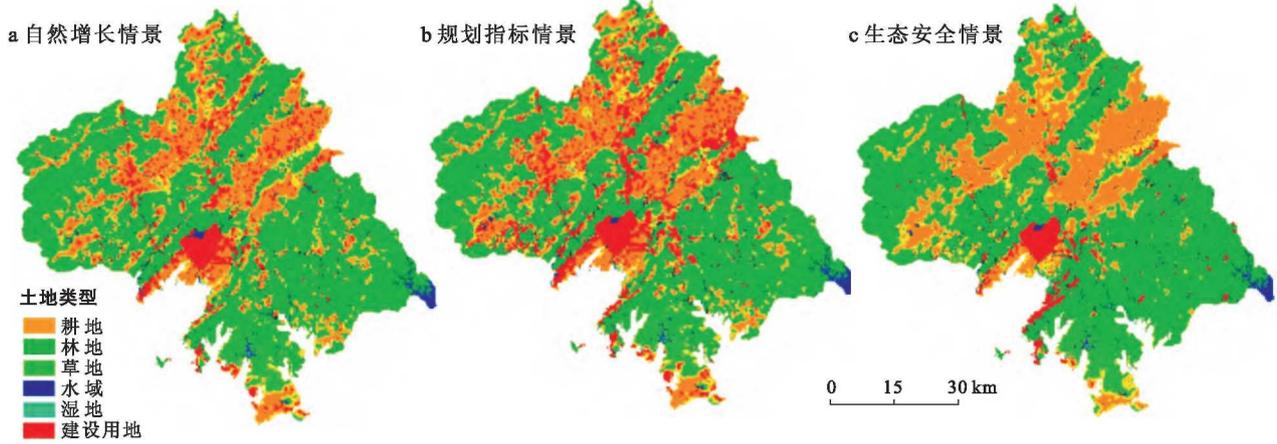
- [1] 孙英兰,宋荣兴,孙海涛.城市水资源系统模糊综合评价[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2008,38(2):232-236.
- [2] 徐毅,孙才志.基于系统动力学模型的大连市水资源承载力研究[J].安全与环境学报,2008,8(6):71-74.
- [3] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90.
- [4] Han Mei, Liu Yuan, Du Huan, et al. Advances in study on water resources carrying capacity in China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):1894-1903.
- [5] 张占江,李吉玫,石书兵.阿克苏河流域水资源承载力模糊综合评价[J].干旱区资源与环境,2008,22(7):138-143.
- [6] 凌红波,徐海量,乔木,等.基于 AHP 和模糊综合评判的玛纳斯河流域水资源安全评价[J].中国沙漠,2010,30(4):989-994.
- [7] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(2):258-269.
- [8] 王学全,卢琦,李保国.应用模糊综合评判方法对青海省水资源承载力评价研究[J].中国沙漠,2005,25(6):944-949.
- [9] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.水资源承载力评价指标体系研究[J].水土保持通报,2001,21(1):30-34.
- [10] 朱一中,夏军,谈戈.西北地区水资源承载力分析预测与评价[J].资源科学,2003,25(4):43-48.
- [11] 李艳红,楚新正,王丽,等.新疆天山北麓典型绿洲城市的水资源模糊综合评价研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(3):86-90.
- [12] Gong Li, Jin Chunling. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources [J]. Water Resources Management, 2009, 23 (12): 2505-2513.
- [13] 闵庆文,余卫东,张建新.区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J].水土保持研究,2004,11(3):14-16,129.
- [14] 张青峰,王力,李熈楷,等.长武县水资源承载力的模糊评价[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(5):161-166.
- [15] 山西省水利厅,中国地质科学院岩溶地质研究所,山西省水资源管理委员会.山西省岩溶泉域水资源保护[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [16] Aryafar A, Yousefi S, Ardejani F D. The weight of interaction of mining activities: Groundwater in environmental impact assessment using fuzzy analytical hierarchy process(FAHP)[J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(8):2313-2324.
- [17] 王秀云.古交市河川径流特性分析[J].科技情报开发与经济,2005,15(13):174-175.
- [18] 徐建斌.古交市水资源开发利用现状及对策[J].山西水利,2004,20(3):42-43.
- [19] 孙弘颜,汤洁,刘亚修.基于模糊评价方法的中国水资源承载力研究[J].东北师大学报:自然科学版,2007,39(1):131-135.
- [20] Cheng Cuiyun, Qian Xin. Evaluation of emergency planning for water pollution incidents in reservoir based on fuzzy comprehensive assessment[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):566-570.



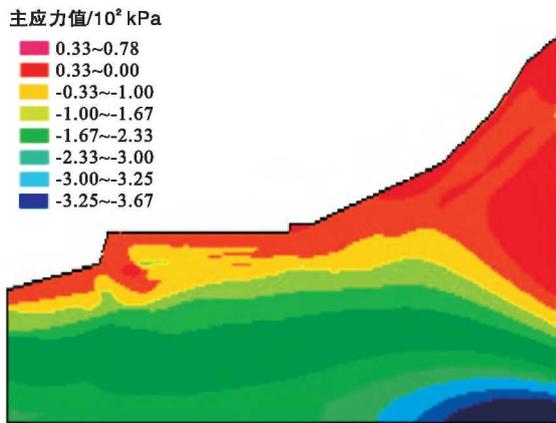
附图22 山西省古交市水系与地形图(275页)



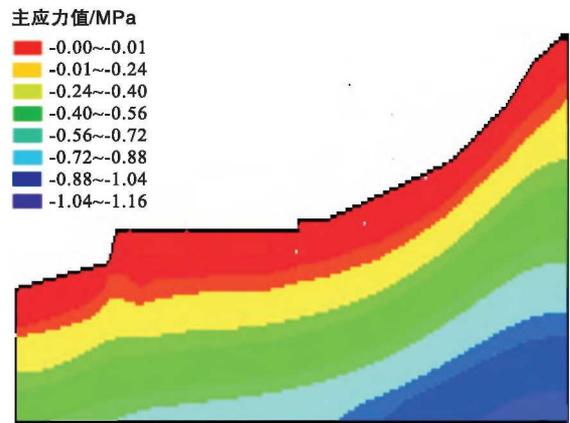
附图23 广西壮族自治区钦州市2010年土地利用图(284页)



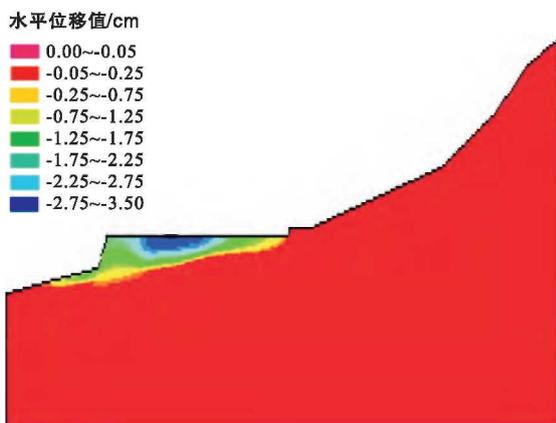
附图24 广西壮族自治区钦州市2020年不同情景模拟图(285页)



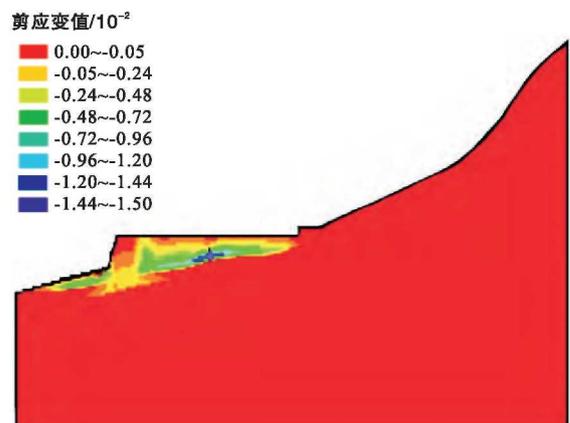
附图25 滑坡主剖面第1主应力分布图(暴雨,290页)



附图26 滑坡主剖面第3主应力分布图(暴雨,290页)



附图27 滑坡主剖面Y方向位移分布(暴雨,290页)



附图28 滑坡主剖面剪应变云图(暴雨,290页)