

三江平原水资源承载力的泛系观控与风险评估

宫凡荔¹, 付强^{1,2,3}, 姜秋香^{1,2,3}, 李天霄^{1,2,3}, 刘巍¹

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省粮食产能提升协同创新中心, 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省普通高等学校节水农业重点实验室, 哈尔滨, 150030)

摘要: 水资源系统风险评估是保障水资源安全及其可持续利用的关键。针对三江平原存在着水资源开发利用率低、水资源短缺和供需不平衡等诸多问题, 利用观控风险分析模型对三江平原及其区划内8个区域进行水资源承载力的风险评估。通过对风险和收益值的同步分析, 确定了各区域的水资源承载力强弱程度, 并在此基础上提出相应管理措施。研究结果为三江平原科学合理地制定水资源可持续利用策略提供了重要的理论依据, 同时也为水资源系统的风险评估研究开辟了新的思路。

关键词: 水资源; 承载力; 泛系理论; 观控风险; 风险评估

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0001-04

Pansystems Observation Control and Risk Assessment of Water Resources Carrying Capacity in Sanjiang Plain

GONG Fan li¹, FU Qiang^{1,2,3}, JIANG Qiu xiang^{1,2,3}, LI Tian xiao^{1,2,3}, LIU Wei¹

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering of Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Collaborative Innovation Centre of Promote Grain Production in Heilongjiang Province, Harbin 150030, China;

3. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Regular Institutions of Higher Education in Heilongjiang Province, Harbin 150030, China)

Abstract Risk assessment of water resources system is the key to ensure the security and sustainable utilization of water resources. Aiming at the issues existing in the development and utilization of water resources in the Sanjiang Plain, such as low rates of water resources development and utilization, water shortages, and imbalance between supply and demand, the observation control risk model was applied to perform risk assessment of water resources carrying capacity of eight regions in the Sanjiang Plain. According to the synchronized analysis of risk and gain, the degree of water resources carrying capacity of each study area was determined, and the corresponding management measures were proposed. The research results can provide important theoretical basis for formulating scientific and reasonable water resources sustainable utilization strategy in the Sanjiang Plain, and also open up a new way for the research in the field of risk assessment of water resources system.

Key words: water resources; carrying capacity; pansystems theory; observation control risk; risk assessment

水资源承载力是指在可持续发展的准则下, 以维护生态环境良性循环为前提, 在一定时期、一定生活水平和一定生产技术条件下的区域水资源对社会经济发展的最大支撑能力^[1]。随着经济的快速发展, 水资源承载能力的研究已成为水资源领域的热点。已有研究成果大体上分为两类: 一是利用投影寻踪、模糊综合评价和主成分分析等^[1-3]评价方法对水资源现状进行承载力综合评价; 二是基于系统

动力学、熵模型和多目标规划分析等^[4-6]方法仿真和预测未来年份水资源承载力的变化趋势。不过, 这些研究重点分析资源承载能力的强弱, 而缺少对于水资源承载力结果进行风险评估。

鉴于此, 本研究将风险的思想引入到水资源承载力的分析中, 运用观控风险分析技术, 对风险和收益进行对比分析。泛系观控风险方法克服了层次分析^[7-8]、蒙特卡洛^[9-10]、模糊

收稿日期: 2013-12-09 修回日期: 2014-01-02 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179032; 51209038; 51279031); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301096); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531009); 黑龙江省普通高校新世纪优秀人才培养计划(NO. 1155 NCE-T-004)

作者简介: 宫凡荔(1987-), 女, 黑龙江牡丹江人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统风险评估研究。E-mail: gongfanli1118@163.com

通讯作者: 付强(1973-), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土资源优化利用与管理等方面的研究。E-mail: fuqiang@neau.edu.cn

综合评价以及多目标决策等传统方法在风险评估时需要提供大量样本信息、确定较多未知因素以及计算量巨大的弊端,与此同时,增添了风险评估方法中将风险与收益相结合分析的研究优势。通过对三江平原水资源承载力进行风险评估,不仅为区域水资源的可持续利用提供科学指导,同时为水资源系统的风险评估提供了新的评估方法和研究思路。

1 水资源系统的泛系观控分析与风险评估

1.1 泛系观控理论介绍

泛系理论是我国学者吴学谋于 1976 年创立的,该理论注重可观测建模的思想,侧重于探讨结构、功能与广义信息的某些相对守恒性与封闭性,为许多事物的量化模拟提供方法论^[1]。

泛系观控理论以泛系理论为基础,其核心是观控风险 (Viewing Controlling Risk, VCR) 分析技术^[12,13]。泛系观控理论认为时间、空间、物质、能量和信息科学五基元都不能独立存在,唯有作为泛系的“时间-空间-物质-能量-信息”方能独立存在^[14]。这一新的科学观与复杂的水资源巨系统相契合,为水资源系统的充分可观测建模提供了一套简单易行而又行之有效的技术手段。

1.2 水资源系统的泛系观控分析

利用泛系观控理论进行水资源系统分析,可以通过对水资源系统中的观控对象采用不同的调控手段来展现风险不确定性的本质特征。同时,该理论更注重在某一或多种观控目标下对各观控对象的“风险-收益”进行分析^[15],例如以水资源可持续利用为观控目标,对各区域水资源承载力的风险和收益进行对比分析,有利于权衡决策,更符合决策者的习惯。风险客观存在,其可能伴随水资源系统中不同的观控对象、观控指标、观控主体和目标导向而产生不同的变化^[16]。

1.3 研究方法

从观控技术角度出发,风险是指观控对象及其背景的不确定性与观控主体之观控能力的有限性所导致期望不能实现的危险^[11]。观控风险模型的构建要尽可能完整、确切地映射实际原型,并且要尽可能地简化^[12],因此,该模型以其特有的观控风险 (Risk, R)、比较收益 (Gain By Comparison, G) 和约束信息量 (Binding Information, BI) 作为其观控的度量,实现水资源系统中风险和收益间的定性及定量分析。观控风险模型构建步骤如下^[11,17]。

步骤 1: 观控指标值的处理。

(1) 确定待评估系统中 m 个观控对象, n 个观控指标,其中第 i 个观控对象的第 j 个观控指标值为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。为了消除观控指标值的量纲和统一各观控指标值的变化范围,采用下式进行规范化处理:

$$\begin{cases} y_{ij} = x_{ij} / \max\{x_{ij}\} & \text{第 } j \text{ 个观控指标为效益型指标} \\ y_{ij} = \min\{x_{ij}\} / x_{ij} & \text{第 } j \text{ 个观控指标为效益型指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中, y_{ij} 为 x_{ij} 规范化处理结果,并将其规范化集合记为 Y 。本研究中,观控对象 $m=8$,观控指标 $n=20$ 。

(2) 对规范化结果 Y 进行归一化处理。

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (2)$$

式中, p_{ij} 为 y_{ij} 归一化处理结果。

步骤 2: 计算隶属度 $F(j)$ 。

计算各观控指标的隶属度 $F(j)$, 并对其进行正则化处理,结果记为 ω_j ($j=1, 2, \dots, n$), 求出 ω_j 的所有组合数即可得到权重矩阵 W , 计算公式如下:

$$F(j) = \ln(n-j+2) / \ln(n+1) \quad (3)$$

$$\omega_j = F(j) / \sum_{j=1}^n F(j) \quad (4)$$

$$W = (\omega_j)_{qn} \quad (q = n \times (n-1) \times (n-2) \times \dots \times 2 \times 1; s = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: ω_j 为正则化处理后,对 ω_j 进行的全排列组合 (s 组) 后得到权重矩阵 W 中的元素。

步骤 3: 计算观控风险 R 。

观控风险 R 表征观控对象及其背景的不确定性与观控主体观控能力的有限性而导致期望不能实现的危险^[14]。观控风险越大,系统可能面临的不确定性因素就越多,也就越难实现预期的结果;反之亦然。各观控对象在不同权重配置下的观控风险 R 采用下式进行计算:

$$R = (r_k) = \left| \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot (y_{ij} - e_k)^2 \right|^{1/2} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, q) \quad (6)$$

式中, $e_k = Y \cdot W^T$ ($i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, q$), 为各观控对象在不同权重配置下的期望值。

步骤 4: 计算比较收益 G 。

比较收益 G 是指基于风险条件下系统单位投资所获得的相对收益^[15], 是风险评估中特有的一种将风险和收益相结合分析的度量指标。比较收益的大小反映的是在一定风险情况下,观控对象单位投资获得收益的高低程度。各观控对象在不同权重配置下的比较收益 G 采用下式进行计算:

$$G = (g_k) = e_k / (1 - r_k) \quad (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, q) \quad (7)$$

步骤 5: 计算约束信息量 BI 。

约束信息量 BI 的实质是映射观控对象风险的本征性测度^[12], 即约束信息量值的大小在一定程度上可以反映观控对象风险值的大小。各观控对象的约束信息量 BI 值采用下式进行计算:

$$BI_i = \log_2^3 + \sum_{i=1}^n (p_{ij} \cdot \log_2 p_{ij}) \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

2 数据来源

三江平原位于黑龙江省东北部,北起黑龙江,南抵兴凯湖,西至小兴安岭,东界为乌苏里江,总面积达 10.9 万 km^2 , 占黑龙江省总面积的 24%, 其行政区域包括鹤岗、佳木斯、双鸭山、七台河、鸡西、穆棱以及哈尔滨的依兰县 (见图 1)。三江平原拥有丰富的水资源,土壤肥沃、气候适宜,较适合农业发展,因此成为我国重要的商品粮生产基地。但近年来,在高强度人类活动的干扰下,水资源供需矛盾、开发利用率低、供水结构不合理和水资源污染严重等现象都威胁着水资源的可持续利用。

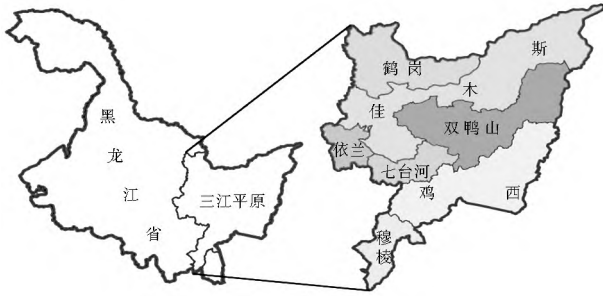


图1 三江平原地理位置及其区域划分

Fig. 1 Geographic location and administrative divisions of the Sanjiang Plain

表1 三江平原水资源承载力评价指标统计值^[18]

Table 1 Statistical values of WRCC evaluation indexes in the Sanjiang Plain^[18]

指标	指标类型	鸡西	鹤岗	双鸭山	佳木斯	七台河	穆棱	依兰	三江平原
单位面积水资源量/(万 m ³ · km ²)	+	20.0	24.5	16.8	16	13.4	19.9	23.2	18.5
水资源开发利用率(%)	-	70.60	32.88	53.00	82.17	15.69	5.53	28.95	55.03
水资源可利用率(%)	+	71.66	67.40	66.13	77.99	64.00	60.82	57.85	69.79
供水模数/(万 m ³ · km ²)	-	14.11	8.07	8.89	13.16	2.11	1.10	6.71	10.19
人口密度/(人 · km ²)	-	85	75	68	77	145	50	88	79
人口自然增长率(%)	-	3.67	0.67	0.38	4.66	7.71	2.99	8.32	3.58
城镇化率(%)	-	62.89	80.62	62.26	49.26	56.43	41.72	32.01	58.14
城镇生活用水量/(L · (d · 人) ⁻¹)	-	126	128	139	137	146	144	189	144
农村生活用水量/(L · (d · 人) ⁻¹)	-	67	57	55	55	61	65	62	59
人均水资源占有量/m ³	+	2356	3292	2456	2081	927	3969	2647	2337
人均GDP/万元	-	1.66	1.69	1.73	1.58	2.08	1.96	1.29	1.69
GDP增长率(%)	-	12.3	12.3	15.2	15.9	26.1	13.4	17.6	16.11
第一产业占GDP比例(%)	-	16.7	24.1	29.8	31.6	9.3	23.2	31.5	23.7
单位耗水生产GDP/(元 · m ³)	+	9.95	15.60	13.28	9.26	142.69	89.17	16.82	13.13
万元工业增加值用水量/m ³	-	82.5	29.0	37.0	13.7	22.8	6.4	18.5	36.4
耕地灌溉率(%)	-	50.62	43.81	35.11	45.20	9.80	7.70	14.34	39.37
单位面积灌溉用水量/(m ³ · hm ²)	-	8153	6019	6509	6981	5006	6009	10858	7093
单位耗水粮食产量/(kg · m ³)	+	1.61	2.36	2.68	2.04	7.70	5.14	3.38	2.17
森林覆盖率(%)	+	35.45	45.01	41.74	19.26	52.8	74.58	38.75	36.61
生态环境用水率(%)	-	0.52	0.36	0.24	0.89	0.35	0.23	0.49	0.44

注: 表中的“+”表示上升型指标, 即指标值越大越好; 反之“-”表示下降型指标, 即指标值越小越好。

表2 各区域的观控风险R、比较收益

G和约束信息量BI值及其排序

Table 2 Observation control risk R, comparative gain G and binding information BI values and their sequences in each region

观控对象	R值	R排序	G值	G排序	BI值	BI排序
鸡西	0.3360	8	0.7721	6	0.3548	8
鹤岗	0.3220	6	0.8768	2	0.2348	5
双鸭山	0.3134	5	0.8427	4	0.2454	6
佳木斯	0.3297	7	0.7633	7	0.3444	7
七台河	0.2820	2	0.8438	3	0.1633	2
穆棱	0.2332	1	1.0505	1	0.0711	1
依兰	0.3044	4	0.7930	5	0.2270	3
三江平原	0.3019	3	0.7277	8	0.2769	4

注: 表中R排序为升序, 排序值越大, 表示风险度越大; G排序为降序, 排序值越小, 表示收益度越大。

量BI排序大体上一致, 反映约束信息量具有映射风险本征性测度的作用, 而且各观控对象具有“越自由, 风险度越小”的特征。本研究8个研究区域的“风险-收益”排序位置和

本研究以三江平原及其区划内的共计8个区域的20项水资源承载力评价指标统计值(见表1)作为数据支撑, 将8个区域作为观控对象, 20项评价指标作为观控指标, 分别对每个区域的不同承载能力进行风险评估。

3 结果分析

利用 Matlab 软件编制 VCR 模型程序, 运行该程序进行 1.3 研究方法小节中步骤 1~5 的计算, 得到各观控对象在观控指标权重依次递减情况下的观控风险 R、比较收益 G 和约束信息量 BI 值(见表2)。

从表2分析可知, 各观控对象的观控风险 R 与约束信息

数值关系见图2。

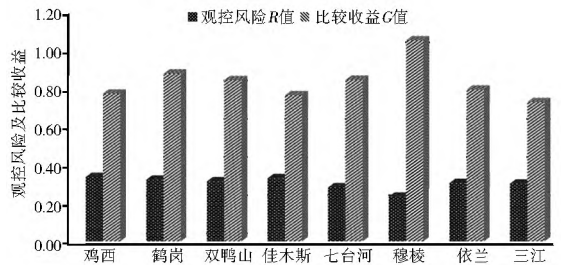


图2 三江平原水资源承载力观控风险及比较收益

Fig. 2 Observation control risk and comparative gain of water resources carrying capacity in the Sanjiang Plain

分析表2中穆棱与七台河的水资源承载力观控风险和比较收益值及其排序可知, 两者均处于“低风险、高收益”的优势地位, 表示该地区的水资源承载力相对较强, 水资源处于弱无压力区, 水资源尚有富裕, 因此, 在满足该区域经济发展对水资源需求的基础上, 需加强区域间调配水工程的建

设,提高水资源开发利用率,更好地做到“物尽其用”。

图2中,三江平原、依兰、双鸭山和鹤岗4个区域的水资源承载力观控风险值相差甚微,但其比较收益值却相差颇大。依据排序位置分析,双鸭山和鹤岗的观控风险值虽然略微高于另外两个区域,但其比较收益值却远远大于三江平原和依兰,遵循“风险在一定条件下可以转化为巨大收益”的原则,双鸭山市和鹤岗水资源承载力的相对优势显而易见。

结合表2和图2分析可知,佳木斯和鸡西处于一种“高风险、低收益”的状态,与“风险和收益同在”的理论相悖,水资源承载能力相对较弱,水资源和社会经济处于平衡发展的态势。这反映了目前水资源能基本满足工农业生产和人们日常生活的需求,但随着经济的快速发展和人口数量的巨增,风险也剧增,因此必须在充分利用现有水资源的基础上,大力加强水资源管理和水利工程投资力度,提高水资源开发利用率,以保证该区域水资源对社会经济发展的持续供给能力。

4 结论

本研究利用观控风险模型,对三江平原及其区划内共计8个区域的水资源承载力进行风险评估。依据各观控对象的观控风险和比较收益值及其排序位置综合分析得知:穆棱、七台河、双鸭山和鹤岗的水资源承载力相对风险小、收益高,既具有保障社会发展需求的较强的水资源承载能力,又能够满足水资源与社会经济的协调发展;而依兰、三江平原、佳木斯和鸡西的水资源则处于一种平衡发展、基本可持续的状态,从长远角度考虑,须对该区域加大水资源管理调控措施,尽快使其从耗水型经济结构转向节水型经济结构,以保证水资源的可持续利用。

参考文献(References):

- [1] 姜秋香,付强,王子龙.三江平原水资源承载力评价及区域差异[J].农业工程学报,2011,27(9):184-190.(JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Evaluation and Regional Differences of Water Resources Carrying Capacity in Sanjiang plain [J]. Transactions of the C.A.S.E., 2011, 27(9): 184-190. (in Chinese))
- [2] GONG Li, JIN Churling. Fuzzy Comprehensive Evaluation for Carrying Capacity of Regional Water Resources [J]. Water Resources Management, 2009, 23(12): 2505-2513.
- [3] 许朗,黄莺,刘爱军.基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(12):1468-1474.(XU Lang, HUANG Ying, LIU Aijun. Study on the Carrying Capacity of Water Resources in Jiangsu Province Based on the Principal Component Analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(12): 1468-1474. (in Chinese))
- [4] 王勇,李继清,王霁景,等.天津市水资源承载力系统动力学模拟[J].中国农村水利水电,2011,(12):F4.(WANG Yong, LI Jiqing, WANG Aijing, et al. A System Dynamics Model and Simulation for Water Resources Carrying Capacity in Tianjin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, (12): F4. (in Chinese))
- [5] 赵军凯,李九发,戴志军,等.基于熵模型的城市水资源承载力研究——以开封市为例[J].自然资源学报,2009,24(11):1944-1951.(ZHAO Jun kai, LI Jiufa, DAI Zhi jun, et al. Study

on Water Resources Carrying Capacity of Urbanized Area Based on Entropy Model—A Case Study in Kaifeng City [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(11): 1944-1951. (in Chinese))

- [6] WANG Shuo, YANG Fenglin, XU Ling, et al. Multi-scale Analysis of the Water Resources Carrying Capacity of the Liaohe Basin Based on Ecological Footprints [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 53: 158-166.
- [7] 刘涛,邵东国,顾文权.基于层次分析法的供水风险综合评价模型[J].武汉大学学报,2006,39(4):25-28.(LIU Tao, SHAO Dong guo, GU Wenquan. Comprehensive Assessment Model of Water Supply Risk Based on Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Wuhan University, 2006, 39(4): 25-28. (in Chinese))
- [8] CHEN Yiru, Chao Hsien Yeh, Bofu Yu. Integrated Application of the Analytic Hierarchy Process and the Geographic Information System for Flood Risk Assessment and Flood Plain Management in Taiwan [J]. Natural Hazards, 2011, 59(3): 1261-1276.
- [9] GU Wenquan, SHAO Dongguo, JIANG Yufang. Risk Assessment of Water Shortage in Source Area of Middle Route Project for South to North Water Transfer in China [J]. Water Resources Management, 2012, 26(12): 3479-3493.
- [10] 金菊良,刘丽,汪明武,等.基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型[J].地理科学,2011,59(3):1261-1276.(JIN Juliang, LIU Li, WANG Mingwu, et al. Comprehensive Risk Assessment Method for Groundwater Environment System Based on Stochastic Simulation and Triangular Fuzzy Numbers [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 59(3): 1261-1276. (in Chinese))
- [11] 吴学谋.泛系理论与数学方法[M].南京:江苏教育出版社,1990.(WU Xuemou. Pansystems Theory and Mathematical Method [M]. Nanjing: Jiangsu Education Publishing House, 1990. (in Chinese))
- [12] 于宏义,王佑棣.风险观控分析[J].科技进步与对策,1997,14(3):67-70.(YU Hongyi, WANG Youdi. A Viewing Controlling Analysis to Risk [J]. Science & Technology Progress and Policy, 1997, 14(3): 67-70. (in Chinese))
- [13] 董前进,曹广晶,王先甲,等.洪水资源化多目标决策的风险观控分析[J].水力发电学报,2008,27(2):6-10.(DONG Qianjin, CAO Guangjing, WANG Xianjia, et al. Risk Observation control Analysis of Multi-objective Decision of Flood Resources Utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2): 6-10. (in Chinese))
- [14] 黄强,李勋贵,Leon Feng,等.系统周界的观控模型及其应用[J].系统工程理论与实践,2005,(3):101-106.(HUANG Qiang, LI Xun gui, LEON Feng, et al. Observation control Model of Boundary of System and Its Application [J]. System Engineering Theory & Practice, 2005, (3): 101-106. (in Chinese))
- [15] 董前进,王先甲.干旱期水安全风险评价与观控分析[J].系统工程理论与实践,2012,32(4):867-871.(DONG Qianjin, WANG Xianjia. Risk Assessment and Observation control Analysis of Water Security During Drought Period [J]. System Engineering Theory and Practice, 2012, 32(4): 867-871. (in Chinese))

(下转第9页)

- during the Last Three Decades [J]. Journal of Geographical Sciences 2005, 60(1): 3-10. (in Chinese)
- [3] 莫中国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 88-96. (MO Sheng guo, ZHANG Bai ping, CHENG Wei ming, et al. Major Environmental Effects of the Tibetan Plateau [J]. Progress in Geography, 2004, 23(2): 88-96. (in Chinese))
- [4] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636. (FENG Song, TANG Mao cang, WANG Dong mei. The Tibetan Plateau is New Evidence of Climate Change in the Promoter Region [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. (in Chinese))
- [5] 高治定, 王玉峰, 张志红, 等. 南水北调西线工程调水地区水文气象特征[J]. 人民黄河, 2001, 23(10): 41-45. (GAO Zhi ding, WANG Yu feng, ZHANG Zhi hong, et al. Hydrological and Meteorological Characteristics of the Western Route Water Diversion Area [J]. Yellow Rivre, 2001, 23(10): 41-45. (in Chinese))
- [6] 俞烜, 张明珠, 严登华, 等. 南水北调西线工程水源区降水时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 41-45. (YU Heng, ZHANG Ming zhu, YAN Deng hua, et al. On the Spatial and Temporal Distribution of Precipitation in the Western Route of South to North Water Transfer Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin 2008, 17(1): 41-45. (in Chinese))
- [7] 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 南水北调西线一期工程引水区和黄河上游区域气候特征分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 149-156. (LI Zhen chao, WEI Zhi gang, LYU Shi hua, et al. Analyses of the Climatic Characteristics in the Water Diversion Areas of the Western Route Project of South to North Water Diversion and the Upstream Areas of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 149-156. (in Chinese))
- [8] 张润润. 香港地区降水趋势及其演变过程分析[J]. 河海大学学报, 2010, 38(5): 505-510. (ZHANG Run run. Trend and Evolution of Precipitation in Hong Kong [J]. Journal of Hohai University, 2010, 38(5): 505-510. (in Chinese))
- [9] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann Kendall 法的水文序列趋势成份比重研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585-1591. (YU Yan sheng, CHEN Xing wei. Study on the Percentage of Trend Component in a Hydrological Time Series Based on Mann Kendall Method [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1585-1591. (in Chinese))
- [10] 王文圣, 丁晶, 金菊良. 随机水文学[M]. 中国水利水电出版社, 2008. (WANG Wen sheng, DING Jing, JIN Ju liang. Stochastic Hydrology [M]. China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [11] 钟登华, 石明华. 水文时间序列长期相关性的识别[J]. 天津大学学报, 1998, 31(4): 31-34. (ZHONG Deng hua, SHI Ming hua. Identifying Long term Dependence of Hydrological Time Series [J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(4): 31-34. (in Chinese))
- [12] 侯保俭. 长江上游流域统计降尺度方法研究[D]. 重庆交通大学, 2012. (HOU Bao jian. Statistical Downscaling Methods in Upper Reaches of Yangtze River Basin of China [D]. Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [13] 谢平, 雷红富, 陈广才, 等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文, 2008, 28(4): 26-32. (XIE Ping, LEI Hong fu, CHEN Guang cai, et al. Analysis of Spatial and Temporal Variation of Rainfall Based on Hurst Coefficient [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(4): 26-32. (in Chinese))
- [14] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 32-39. (XIE Ping, CHEN Guang cai, LEI Hong fu. Hydrological Alteration Analysis Method Based on Hurst Coefficient [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 32-39. (in Chinese))

(上接第 5 页)

- [16] 左其亭, 吴泽宁, 赵伟. 水资源系统中的不确定性及风险分析方法[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 116-121. (ZUO Qi ting, WU Ze ning, ZHAO Wei. Uncertainties and Risk Analysis Method of Water Resources System [J]. Geography of Arid Land, 2003, 26(2): 116-121. (in Chinese))
- [17] 李勋贵, 黄强, Leon Feng, 等. 界壳的泛系观控模型及其在水资源中的应用[J]. 兰州大学学报, 2005, 41(5): 16-17. (LI Xun gui, HUANG Qiang, LEON Feng, et al. Pansystems Observation Control Model of Periphery and its Application to Water Resources [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2005, 41(5): 16-17. (in Chinese))
- [18] 姜秋香. 三江平原水土资源承载力评价及其可持续利用动态仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011. (JIANG Qiu xiang. Study on Carrying Capacity Evaluation and Dynamic Simulation of Sustainable Utilization of Water and Land Resources in Sanjiang Plain [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011. (in Chinese))