

辽河流域各市水资源承载力计算分析

付玉娟¹, 何俊仕¹, 强小嫚², 刘洋¹, 韩宇洲¹

(1. 沈阳农业大学 水资源研究所, 沈阳 110866; 2. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003)

摘要:为了探讨辽河流域各市的水资源承载状况,以水资源的极限承载力作为水资源承载力的定义,根据最小生态需水量和适宜生态需水量分别计算了水资源可利用量的上限及下限,在此基础上用多目标计算了“生态一般型”、“生态良好型”及“生态良好节水型”三种方案下辽宁省辽河流域各市的水资源的“生产”、“生活”和“生态”的极限承载力,并根据各城市的特点对计算结果进行了分析,分析表明“生态良好节水型”方案生态经济效益最好。

关键词:水资源承载力; 辽宁省辽河流域; 多目标

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0171-06

Analysis of Water Resources Carrying Capacity in Liao River Basin, Liaoning Province

FU Yu-juan¹, HE Jun-shi¹, Qiang Xiao-man², LIU Yang¹, HAN Yu-zhou¹

(1. Institute of Water Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Farmland Irrigation Research Institute, Xinxiang, He'nan 453003, China)

Abstract: This paper had a discussion on water carrying capacity situation, based on the least and adequate ecological water calculated the lower and upper available water resources amount. Then using multi-objective algorithm calculated the water resources carrying capacity with three different social and economic development projects as ‘ecological maintenance’, ‘ecological soundness’, and ‘ecological soundness with water saving’, and then analyzed the calculation result with the character of the every city, which indicated that ‘ecological soundness with water saving’ has the best social and economic benefit.

Key words: water carrying capacity; Liao River Basin; multi-objective

水资源与社会经济发展具有密切的关系,随着经济的发展,水资源承载力已成为社会经济发展的“瓶颈”。只有在水资源承载力的范围内,才能满足水资源的可持续发展,才能合理安排产业发展布局和社会经济发展规模,才能实现社会、经济、资源、环境全面、协调、可持续的发展。目前水资源承载能力的定义还没有一个统一的认识,大致可以将其归纳为两种^[1],一种是从水资源承载客体出发的规模论,即现有的水资源可承载的社会经济发展规模^[2];另一种是从水资源承载主体出发的水资源支撑社会经济系统持续发展能力论^[3-4]。

针对本次研究的重点,对水资源承载力做如此定义:“在一定水资源开发利用阶段和经济技术条件下,以流域社会、经济、生态相互协调可持续发展为目标,满足生态需水的可利用水量能够支撑的最大人口数量及社会经济规模。”在本次承载力分析计算中,以辽

宁省内辽河流域各个城市为计算单元进行分析计算,研究的基准现状年为 2005 年,近期规划水平年为 2020 年,远期规划水平年为 2030 年。

1 水资源量及经济社会发展指标计算预测

1.1 水资源可利用量

根据辽河流域水资源紧缺及低温期长的特点,用修正的 Tennant 法计算了辽河流域的生态条件分别为“一般”和“好”时的河道内生态需水量;并将此作为河道内生态需水量的上限与下限,用倒扣法计算出相应的地表水资源可利用量和水资源可利用总量的上限与下限,使其作为水资源可利用量的域值区间,即水资源可利用量的上限与下限,根据辽宁省辽河流域 1965—2000 年的水资源资料计算辽河流域各城市水资源可利用情况,计算结果见表 1。

表 1 不同生态需水情况下地表水资源可利用量
和水资源可利用总量

水资源 一级区	行政区	地表水	地表水	水资源	水资源
		可利用 量上限	可利用 量下限	可利用 总量上限	可利用 总量下限
辽河区	鞍山市	33037	27480	63254	57452
	本溪市	86828	72371	86828	72371
	丹东市	1133	928	1133	928
	抚顺市	143432	117267	143461	117296
	阜新市	13577	10613	37037	34074
	锦州市	7639	4602	50246	47208
	辽阳市	50132	41271	68545	59685
	盘锦市	9426	7656	37037	34074
	沈阳市	61076	50054	172597	161574
	铁岭市	114677	104134	152662	133372
	营口市	5925	5925	8095	7359
合计		526884	442303	799733	704805

1.2 需水量社会发展预测

根据辽宁省水资源公报、辽河流域综合规划以及相关文献资料^[5],并为了与《松辽流域水资源综合规划》数据一致,本文选取以 2005 年为现状年,以 2020 年为近期水平年,2030 年为远期水平年,对辽宁省辽河流域各城市的各需水项目进行预测。

(1)需水预测。需水预测及相关部分的用水户采用“新口径”划分,分为生活、生产和生态环境三大类,并按城镇和农村两类分别进行统计。生活需水指城镇居民生活用水和农村生活用水;生产需水指经济产出的各类生产活动所需的水量,包括第一产业、第二产业和第三产业;生态环境需水在本次研究中指河道外需水,而河道内生态需水量已经在水资源可利用总量的计算中扣除^[6-7]。

(2)耗水预测。用水消耗量(简称耗水量)是指毛用水量在输水、用水过程中消耗的水量。根据用水户特性按工业、城镇生活、农民生活、农田灌溉、生态环境,分别估算其在输水、用水过程中通过蒸腾蒸发、土壤吸收、产品带走、居民和牲畜饮用等多种途径消耗掉,而不能回归到地表水体或地下含水层的消耗水量。耗水率则是指耗水量与用水量的比值,用来反映一个国家或地区用水水平的重要特征指标。根据辽河流域社会经济的发展水平,预测各计算单元耗水量。

(3)人口预测。人口预测是指根据一定区域人口现状和未来发展趋势,结合人口历史资料,探索人口发展变化规律,测算今后一定时期内的人口状况,为相关部门制定人口、经济、社会政策和规划提供科学依据。

(4)经济预测。根据辽宁省各地市国民经济和社

会发展的“第十一个五年规划”纲要,为了保证国民经济持续健康发展,对辽河流域的 GDP 进行预测。

(5)农田有效灌溉面积预测。鉴于辽河流域是重要的商品粮基地,其农业灌溉面积基本保持稳定,为方便量化研究,对辽河流域各流域分区的有效灌溉面积进行预测。

以《辽宁省水资源公报》(2005)、《辽河流域水资源综合规划》、《辽宁省水资源》等为基础资料进行以上数据的分析预测,得到辽宁省辽河流域各城市农田单位面积的耗水量及值、各产业的单方耗水产值及生活耗水定额,如表 2 所示。

2 多目标算法

2.1 基本理论

多目标算法是从 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种决策分析方法,它是对单目标规划的补充和发展。目前主要求解方法有函数法,交互规划法,分层求解法。

2.2 有关计算参数

本次研究用水户采用“新口径”划分,分为生活、生产和生态环境三大类,并按城镇和农村两类分别进行统计。

(1)生活需水指城镇居民生活用水和农村生活用水;

(2)生产需水指经济产出的各类生产活动所需的水量,包括第一产业、第二产业和第三产业;

(3)生态环境需水在本次研究中指河道外生态需水量,这是由于河道内生态需水量已经在水资源可利用总量的计算中扣除。

模型决策变量分为三个方面,经济方面的变量有农业耗水量、工业耗水水量、第三产业耗水量、居民生活耗水量;粮食方面的变量有水田灌溉面积、旱田灌溉面积;人口方面的变量有农村人口、城镇人口。

2.3 承载力计算模型

2.3.1 目标函数 目标函数分为三个,分别为国内生产总值(即 GDP)、粮食产量以及人口。

(1)水资源承载的国内生产总值最大:

$$\max(X_{GDP}) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m GDP(i,t) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m X(i,t)V(i,t) \tag{1}$$

式中: i ——计算单元; t ——不同部门; $GDP(i,t)$ ——规划年各计算单元各部门 GDP 值; $X(i,t)$ ——规划年各计算单元各部门的耗水量; $V(i,t)$ ——规划年各计算单元各部门单方耗水产值。

(2)水资源承载的粮食产量最大:

$$\max(\text{FOOD})=\sum_{i=1}^n\text{FOOD}(i) \quad (2)$$

式中:FOOD(*i*)——规划年各计算单元的粮食产量。

$$\max(\text{pop})=\sum_{i=1}^n[\text{pop}_{\text{town}}(i)+\text{pop}_{\text{coun}}(i)] \quad (3)$$

式中:pop_{town}(*i*)——第 *i* 个计算单元的城镇人口;
pop_{coun}(*i*)——第 *i* 个计算单元的农村人口。

(3)水资源承载的人口最多

表 2 各用水部门耗水计算指标

城市	规划年份	单位面积耗水/(m ³ ·hm ⁻²)		单方耗水产值/(万元·m ⁻³)			人均耗水/ m ³	城镇 化率	生态耗水量/ 万 m ³
		水田	水浇地	工业	火核	三产			
鞍山	2005	11117.70	2355.90	238.22	85.59	894.81	23.54	0.69	197.25
	2020	9093.75	2118.00	818.60	69.35	2404.78	30.91	0.84	986.44
	2030	8631.00	1984.65	1379.84	104.57	3477.35	33.62	0.87	1072.00
本溪	2005	8832.45	2205.90	118.21	19.00	1333.26	20.84	0.87	285.93
	2020	7423.50	1900.80	183.00	60.49	3420.73	29.69	0.95	355.54
	2030	7460.85	1860.90	262.86	95.25	6341.74	35.37	0.96	376.20
丹东	2005	8772.45	0.00	124.36	0.00	0.00	17.38	0.55	0.00
	2020	7596.45	0.00	156.20	0.00	1934.47	18.68	0.63	1.65
	2030	6434.85	0.00	252.55	0.00	4050.29	20.65	0.66	1.62
抚顺	2005	8258.85	1985.25	182.66	20.23	960.53	14.33	0.75	600.30
	2020	7177.05	1754.85	241.17	152.48	2835.05	21.46	0.85	483.60
	2030	6850.35	1688.25	376.03	232.49	4551.67	26.36	0.87	559.68
阜新	2005	8572.80	2090.55	202.93	0.00	571.43	26.67	0.22	1.00
	2020	6840.60	1771.20	371.89	0.00	3038.40	25.53	0.31	169.60
	2030	6905.55	1720.35	679.24	0.00	4829.60	27.99	0.34	195.00
锦州	2005	7330.50	1205.55	227.84	0.00	2309.86	25.36	0.21	31.00
	2020	6279.00	1166.70	328.83	0.00	5799.43	24.43	0.30	169.68
	2030	6264.75	1205.10	564.33	0.00	9218.86	27.12	0.33	186.16
辽阳	2005	5930.70	2647.05	150.82	23.39	615.65	12.15	0.53	45.00
	2020	5697.30	2281.05	351.76	100.63	2563.75	18.70	0.68	369.60
	2030	5876.10	2101.35	548.47	152.16	4396.76	22.60	0.73	420.29
盘锦	2005	9747.90	1836.60	298.36	467.47	2608.34	17.01	0.60	0.00
	2020	8639.25	1768.35	826.89	132.79	6133.27	23.43	0.74	378.00
	2030	8825.40	1800.00	1443.96	162.59	9526.34	26.71	0.79	399.62
沈阳	2005	7782.30	2355.90	238.34	71.95	688.13	20.43	0.70	3443.44
	2020	6720.00	2049.75	550.19	142.06	2039.73	31.29	0.84	6913.32
	2030	6451.80	1965.90	884.10	199.95	3590.44	34.91	0.86	6907.95
铁岭	2005	6766.65	1725.00	209.40	9.96	1754.39	23.46	0.40	114.00
	2020	6144.00	1615.50	269.73	207.95	4406.25	25.71	0.47	571.20
	2030	6430.50	1582.80	410.50	322.79	6578.17	30.00	0.50	616.55
营口	2005	9058.95	2647.05	302.18	75.17	1282.32	26.71	0.85	0.00
	2020	8457.46	2362.44	344.66	390.45	3478.80	27.34	0.95	276.08
	2030	8752.74	2325.69	446.26	515.85	4329.45	30.29	0.96	290.44

注:数据来源于辽宁水利水电勘测设计研究院

2.3.2 约束方程 模型的约束方程有:

(1)水量平衡约束。

①耗水水量:

$$X_{\text{WH}}(i)=X_{\text{WSC}}(i)+X_{\text{WSH}}(i)+X_{\text{WST}}(i) \quad (4)$$

式中: $X_{\text{WH}}(i)$ ——各行业的耗水量之和等于生产、生活、生态各方面的耗水之和; $X_{\text{WSC}}(i)$ ——生产耗水量; $X_{\text{WSH}}(i)$ ——生活耗水量; $X_{\text{WST}}(i)$ ——生态耗水量。

$$X_{\text{WSC}}(i)=X_{\text{indu}}(i,t)+X_{\text{Agr}}(i)+X_{\text{ser}}(i) \quad (5)$$

生产耗水指工业、农业以及第三产业的耗水量。

$$X_{\text{Agr}}(i)=\text{Area}(i,l)\text{IR}(i,l) \quad (6)$$
$$X_{\text{WSH}}(i)=\text{Li}(i)\text{POP}(i) \quad (7)$$

式中: $X_{\text{Agr}}(i)$ ——第 *i* 计算单元的农业耗水
 $\text{IR}(i,l)$ ——第 *i* 计算单元第 *l* 种作物单位面积耗水量; $X_{\text{indu}}(i,t)$ ——第 *i* 计算单元的工业耗水量;

$Li(i)$ ——第 i 计算单元人口人均耗水量;
 $X_{agr}(i)$ ——农业灌溉需水量,按照水田、水浇地两项进行计算。第一产业用水为农业用水分为水田和水浇地,第二产业用水,分为一般工业、火(核),生态耗水指的是河道外的生态耗水量,根据《辽河流域水资源综合规划》中的规划数据确定。

②可利用水量:

$$X_{WK}(i)=X_{WDB}(i)+X_{WDX}(i)-X_{WHS}(i)-X_{WST}(i)$$

(8)

式中: X_{WK} ——利用水量; X_{WDB} ——地表水水量; X_{WDX} ——地下水水量; X_{WHS} ——不可利用的洪水水量; X_{WST} ——河道内生态需水量。

(2)供需平衡约束。

$$X_{WK} \geq W_{WH}$$

(9)

(3)灌溉面积约束。

$$Area(i,l) \leq Area_{kgg}(i,l)$$

(10)

即灌溉面积小于等于可灌溉面积。

3 水资源承载力计算

3.1 社会发展方案

本次辽宁省辽河流域各城市水资源承载力计算将分为 3 个方案进行。

第一个方案为生态一般型,即考虑在流域内河道生态环境功能为中等水平(生态环境质量较低,仅能维持生态完整性时的最小生态需水量)、产业结构不变和各产业按目前的发展水平发展时的水资源承载力。

第二个方案为生态良好型,即考虑流域内河道内生态环境功能为良好水平(生态环境质量达到适宜水平,生物种生长最好,生殖最快,能够维持生态良性循环时的适宜生态需水量)、产业结构不变和各产业按目前的发展水平发展时的水资源承载力。

第三个方案为生态良好节水型,即在生态环境功能良好条件下考虑节水措施时的水资源承载力。此方案是在第二个方案生态保持良好的基础上,有计划、有目的的加大节水力度,在生产两方面进行全面节水建设。生产节水由农业灌溉定额和万元 GDP 耗水量两个因素控制。预计 2020 年用水定额在规划值的基础上灌溉用水定额在节水 10%,生产节水 5%; 2030 年的用水定额在流域规划值的基础上灌溉节水 15%,生产节水 8%。

由于目前辽宁省辽河流域水资源总体比较匮乏,供需矛盾日益突出,生态条件持续恶化,为了实现水资源的可持续发展,在本次研究中坚持“生态用水优先”的原则,同时根据短时期内耕地面积和有效灌溉面积相对稳定的特点,在水资源可利用量发生严重不足的情况下,优先考虑第二产业和第三产业。

3.2 计算结果及分析

水资源承载力的目标涉及到人口、经济、环境等多个系统,各个目标存在激烈的竞争,即一个目标的增加往往是以其他目标的减少为代价的。将各个目标用相应的经济指标转化成经济目标函数,将多目标优化模型转化为单目标的优化模型,且本模型中的变量之间都是线性的,因此通过 MATLAB 软件编程对转化后的单目标线性模型进行规划求解,计算不同方案下现状年和规划水平年各城市的水资源承载力结果见表 3—5。

从整体上看,如果辽河流域按照当前的经济发展水平进一步发展,在考虑水资源承载力(相对极限值)的前提下,未来一段时间内无论是人口还是经济增长均可承载。但各行政区情况有所不同,一些地区情况仍不容乐观。采取不用的发展方案后,水资源的承载能力状况如下。

表 3 生态一般型方案承载结果

地区	2005 年			2020 年			2030 年		
	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t
铁岭	2653	1318	730895	6669	1101	856315	9923	992	978211
抚顺	3265	965	213064	5068	502	239418	8147	453	272322
阜新	624	567	148502	2804	515	213003	4477	474	267714
丹东	10	9	0	46	3	0	96	3	0
锦州	2558	787	260530	5767	597	323832	9436	543	377564
辽阳	614	788	594227	2203	252	742956	3653	193	851928
本溪	4414	676	45504	7601	376	68027	11771	312	79562
沈阳	1610	1060	1233074	4523	932	1426773	7620	896	1658957
营口	20	18	75669	85	18	85640	132	17	88715
鞍山	394	285	445750	1948	298	539131	3785	286	594978
盘锦	54	26	199613	288	29	240197	531	28	259272
合计	16218	6498	3946827	37000	4624	4735290	59572	4198	5429223

表 4 生态良好型方案承载结果

地区	2005 年			2020 年			2030 年		
	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t
铁岭	1874	1159	730895	4880	983	856315	7162	883	978211
抚顺	2465	845	213064	3789	453	239418	6051	411	272322
阜新	543	538	148502	2461	490	123003	3918	450	267714
丹东	8	7	0	38	3	0	80	3	0
锦州	2306	757	260530	5254	576	323832	8594	524	377564
辽阳	391	595	594227	1467	194	742956	2404	147	851928
本溪	3594	594	45504	6138	338	68027	9433	284	79562
沈阳	1299	717	1226226	4775	725	1344944	8753	709	1499373
营口	19	16	68760	77	16	77544	120	15	80313
鞍山	363	263	410333	1791	274	495826	3481	263	547131
盘锦	49	23	178762	257	26	214685	475	25	231708
合计	12910	5513	3876802	30926	4079	4486548	50469	3715	5185825

表 5 生态节水型方案承载结果

地区	2005 年			2020 年			2030 年		
	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t	GDP/ 亿元	人口/ 万人	粮食 产量/t
铁岭	1529	1159	730895	6254	972	856315	10285	872	978211
抚顺	2382	845	213064	4347	434	239418	7232	388	272322
阜新	543	538	148502	2904	477	213003	4934	433	267714
丹东	8	7	0	41	3	0	89	3	0
锦州	2306	757	260530	6212	561	323832	10795	504	377564
辽阳	388	595	594227	1967	215	742956	3660	172	851928
本溪	3566	594	45504	6765	326	68027	10752	269	79562
沈阳	1321	839	1233074	5090	856	1426773	9440	862	1658957
营口	19	16	68760	85	17	85860	140	16	93449
鞍山	362	263	410333	1973	278	547064	4004	273	630126
盘锦	49	23	178762	284	26	237742	553	26	270043
合计	12472	5635	3883650	35923	4164	4740989	61883	3819	5479876

(1)方案一采用了保守发展的观点,社会、经济等均按照现有的发展水平发展,河道内生态环境用水仅为中等水平。在这种情况下,现状年 2005 年虽然从整个流域上看经济和人口是在水资源可承载的范围内,但细化到各行政区上情况却有所不同,但大部分地区在人口和经济方法还是有较大的发展空间,例如:铁岭、抚顺、阜新、丹东、锦州等。对于营口和盘锦地区无论在人口上还是经济上都处于超载状态,同时沈阳、鞍山地区人口还有一定发展空间但经济已经超载,即现有的水资源量不能满足他们的经济发展需求。

规划年 2020 年和 2030 年同样存在这样的情况,有所不同的是:从横向上看,营口地区人口在未来并不会超载,承载人口从 2005 年的 17.76 万人提高到 2020 年的 18.22 万人,到 2030 年 16.91 万人。这是因为营口通过节水改造工程,不断加强节水型社会建设,大力提高了水的利用效率,从而提高了该地区的

水资源承载力;从纵向上看,辽河流域各行政区可以承载的 GDP 会随着社会经济的发展而不断增加,而且增幅较大,从 2005 年可承载 16 217.7 亿元到 2020 年为 37 000.18 亿元,2030 年为 59 572.2 亿元;承载人口从整体上越来越少,这里的原因有二:一是因为随着东北老工业基地的不断振兴,这两个地区的工业将迅速发展,用水量也随之增多,同时生活用水定额也有所提高,导致水资源承载人口减少,二是因为在计算过程中优先考虑了经济和生态。

(2)方案二着重改善了河道内的生态环境,使其达到良好的水平。该方案辽河流域河道内生态环境需水量为 252 474.82 万 m³,比方案一多 75 637.3 万 m³,增加了 42.77%。因此,在没有采取节水措施,耗水不变的前提下,可利用水资源量随之减少了 11.30%,缺水量也随之增加,但流域整体上水资源可利用量还是可以支撑社会经济的发展。同方案一,局部问题仍很严重,缺水地区缺水将更加严重,沈阳市

在 2020 年便出现了缺水现象。

(3)方案三在保证生态环境功能良好条件的同时考虑了节水措施,水资源承载力有所提高。通过采取节水措施,辽宁省辽河流域 2020 年节水 55 076.96 万 m^3 ,平均节水率为 9.63%;2030 年节水 74 346 万 m^3 ,平均节水率为 11.47%。将计算结果与表 1 的水资源可利用量相比较,上述两个方案中缺水地区的缺水问题将得到缓解,未来 2020 年整个辽河流域将剩余水量 188 559.73 万 m^3 ,2030 年将剩余 169 343.15 万 m^3 。但是,流域内营口、盘锦地区仍然缺水严重。通过采取节水措施,辽河流域承载经济水平无论从横向上还是纵向上都有明显的提高。

4 结论

本文计算了最小生态需水量和适宜生态需水量对应的水资源可利用量的上限及下限,并在此基础上计算了“生态一般型”、“生态良好型”、“生态良好节水型”三种方案下水资源可承载的 GDP、人口及粮食产量。计算结果表明辽河流域在三种方案下总体不论是经济还是人口整体上都可以承载,但现有的水资源不能满足灌溉需水要求,不能承载流域内所有可灌溉农田按照定额计算的灌溉需水要求。三种方案下“生态一般型”方案承载的社会发展规模最大,但生态环境用水较少,只能保证生态环境不再继续恶化;“生态良好型”方案因生态需水量相对较大,可利用的水资

源量较少,所以可承载的社会发展规模相对较小;而“生态良好节水型”方案既保证足够的生态环境用水,又因采取了更强有力的节水措施,所以可承载的社会发展规模大于第二种方案。所以对三种方案进行比较,“生态良好节水型”方案所取得的结果是最好的,既满足生态环境的需水要求,又能保证水资源不成为社会经济充分发展的制约因素。本模型在计算过程中仅考虑了水资源可利用量的承载力,而没有考虑水质及水环境对承载力的影响,因此还需要以后进一步研究。

参考文献:

- [1] 王传武. 对水资源承载力几个基本问题的新认识[J]. 水文, 2009, 29(2): 24-27.
- [2] 王浩, 陈敏建, 秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [3] 陈卫宾, 董增川, 王声锋. 基于模糊识别理论的江西省水资源承载力分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 61-64.
- [4] 陈南祥, 班培莉, 张卫兵. 基于极大熵原理的水资源承载力模糊评价[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 57-60.
- [5] 辽宁省水利厅. 辽宁省水资源[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2006.
- [6] 王建生, 钟华平, 耿雷华, 等. 水资源可利用量计算[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 549-553.
- [7] 水利部水利水电规划设计总院. 水资源可利用量估算方法(试行)[S]. 2004.
- [4] 胡隐樵. 一个强“冷岛”的数值试验结果[J]. 高原气象, 1987, 6(1): 1-8.
- [5] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 477-486.
- [6] 薛具奎, 胡隐樵. 绿洲与沙漠相互作用的数值试验研究[J]. 自然科学进展, 2001, 11(5): 514-517.
- [7] 文莉娟, 吕世华, 孟宪红, 等. 环境风场对绿洲冷岛效应影响的数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 754-758.
- [8] 吕世华, 尚伦宇. 金塔绿洲风场与温湿场特征的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 623-628.
- [9] 张凤华, 赖先齐, 潘旭东. 沙漠增温效应特征及绿洲农业热量资源分异规律的研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 751-754.
- [10] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.
- [11] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [12] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D22): 4688-4697.
- [13] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.
- [14] Adams J B, Sabol D E, Kapos V, et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers; Application to land-cover change in the Brazilian Amazon[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 52(2): 137-154.
- [15] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4): 493-505.
- [16] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 583-594.

(上接第 170 页)