

北方八省市水资源承载力研究

温利华¹, 刘红耀², 姚海娇¹, 张广录³

(1. 邯郸学院 地理与旅游系, 河北 邯郸 056005; 2. 邢台市农业科学研究所,
河北 邯郸 054005; 3. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 石家庄 050021)

摘 要:基于 2009 年自然、社会经济以及水资源相关数据,选取水资源利用率、缺水率、灌溉率、降水量、人均占有水资源量、生态用水率 6 个指标作为评价因素,应用模糊综合评判模型,对北方八省市水资源承载力进行了研究。结果表明,该研究区综合评分值高于 0.570,水资源开发已有一定规模,但仍有一定潜力,水资源供给在一定程度上能满足区域发展需要。对 8 个评价子区域而言,承载力状况差异很大,北京、天津、河北(京津冀)水资源承载能力比较脆弱,而山西、内蒙古、辽宁、山东、河南水资源承载能力相对较强,最后针对不同地区的水资源承载状况,提出了相应的措施。

关键词:北方八省市; 水资源承载力; 模糊综合评判模型

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)06-0168-05

Study on Water Resources Carrying Capacity in Eight Provinces of Northern China

WEN Li-hua¹, LIU Hong-yao², YAO Hai-jiao¹, ZHANG Guang-lu³

(1. Department of Geography and Tourism, Handan College, Handan, Hebei 056005, China;

2. Xingtai Institute of Agricultural Science, Xingtai, Hebei 054005, China; 3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract:Based on the relevant data of nature, society, economics and water resources of eight provinces of northern China from 2009, six main evaluation factors were selected including use efficiency of water resources, water deficient ratio, irrigation ration of arable land, amount of precipitation, per capita water resources and ecological water use rate, and quantitatively researched water resources carrying capacity of eight provinces of northern China by using the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the comprehensive grade of the study area was greater than 0.570, and the current water exploitation and use have reached a considerable scale, and there still has a water carrying capacity. For the eight sub-areas, the water resources carrying capacity status is very different; Beijing, Tianjin and Hebei province have a low water resources carrying capacity, while water resources carrying capacity of other regions are relatively strong. Finally, according to different regions of the water resources carrying condition, the corresponding measures were puts forward.

Key words:eight provinces of northern China; water resources carrying capacity; integrated fuzzy assessment model

中国是水资源短缺的国家,加之旱涝灾害频繁、水资源地区分布不均、水土资源布局不匹配,水的供需矛盾已日趋尖锐,水资源短缺和水环境恶化已成为制约中国社会经济可持续发展的重要因素^[1-2]。伴随可持续发展理论的提出,人们在对社会可持续发展与水环境相互关系有了深刻认识的基础上提出了水资源承载力的概念,它是水资源支撑的社会、经济、生态环境可持续发展的阈值^[3-4]。施雅风等对水资源承载

力做了科学定义,认为水资源承载力是某一地区的水资源,在一定社会和科学技术发展阶段,在不破坏社会和生态系统时,最大可承载的农业、工业、城市规模和人口水平,是一个随社会经济和科学技术水平发展变化的综合目标,它往往是水资源紧缺和贫水地区制约社会发展的瓶颈因素,对一个国家或地区的综合发展有至关重要的影响^[5-7]。国外研究通常将水资源承载力纳入可持续发展理论;国内相关研究起步较晚,

研究领域主要集中在城市水资源承载力和流域水资源承载力两个方面,多侧重个案研究,而对北方资源性缺水地区缺乏整体、系统的研究,省域间的比较研究相对薄弱甚至尚未开展^[8-10]。目前常用的水资源承载力评价方法往往借助数学统计模型,主要有趋势法、系统动力学方法、主成分分析法、熵权法、神经网络法等^[11-12]。

我国北方省份多为资源性缺水地区,水资源总量少,经常出现连续枯水年导致水资源匮乏和水资源量衰减,不能适应经济发展的需要,如京津华北地区、西北地区、辽河流域、辽东半岛、胶东半岛地区。自上世纪 70 年代末的农村经济体制改革以来,京津冀及周边地区逐渐发展成为我国经济较发达地区和重要的工业基地和高新技术产业基地,在国家经济发展中占据重要战略地位,但水资源强度开发与水资源短缺制约了北方诸多城市的可持续发展,水资源、水环境和生态问题尤其突出,主要表现为河道断流干涸、湿地萎缩、河口生态恶化、地下水严重超采、水土流失加剧、水污染加剧、生物多样性减少等,如何解决经济社会发展与水资源供需的矛盾,加强我国北方省域内可利用水资源的管理,实现水资源与社会、经济和生态环境的协调发展,是当前迫切需要解决的重要课题之一^[13-15]。模糊综合评判方法可以在对影响水资源承载能力的各个因素进行单因素评价基础上,通过综合评判矩阵对其承载能力作出多因素综合评价,从而可以较全面地分析研究区水资源承载能力的状况。鉴于此,本文应用模糊评判模型,以京、津、冀、晋、豫、鲁、蒙、辽 8 省(自治区、直辖市)为研究对象,综合评价北方诸省市水资源的承载力和开发利用状况,为水资源的优化利用和社会、经济、生态可持续发展提供依据。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本文所使用的统计数据包括水资源数据、人口数据和社会经济数据。其中水资源数据包括水资源利用率、缺水率、灌溉率、降水量、人均占有水资源量、生态用水率 6 个指标,根据数据的可获取性,采用 2009 年为水平年进行研究,数据均来源于 2009 年各省市区水资源公报。人口和社会经济数据均来源于《中国统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 模糊综合评判模型 给定评判因素集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 和评语集合 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ 。然后进行单因素评判,确定各评判因素 $u_i (i=1, 2, \dots, m)$ 对评价等级 $z_j (j=1, 2, \dots, n)$ 的隶属度 r_{ij} 。则 m 个

评判因素的评判决策矩阵为:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

R 为 U 到 Z 上的一个模糊关系。给各评判因素分配权数 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} (0 \leq a_i \leq 1, \sum_{i=1}^m a_i = 1)$, 则应用模糊变换可得到综合评判结果:

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_m) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

最后,把评判集 a_j 的值以及 B 矩阵中各等级的隶属度 b_j 的值代入式子 $a = \frac{\sum_{j=1}^n b_j \alpha_j}{\sum_{j=1}^n b_j}$ 中得到其综合评

分值。 α_j 为各评判等级 1 分制数量化后 j 等级相应的数值。 a 为综合评判结果矩阵 B 的水资源承载力的综合评分值,其值越大,说明该研究区水资源承载潜力越大。

1.2.2 评判因素的选取、分级和评分 根据我国北方水资源现状及利用特点,全面分析其影响因素,并参考全国水资源供需分析中的指标体系^[15],选取评价指标。各指标含义如下:

- (1) 水资源利用率(u_1): 现状 75% 频率的供水量/水资源总量(%);
- (2) 缺水率(u_2): 现状 75% 频率的缺水量/供水量(%);
- (3) 耕地灌溉率(u_3): 灌溉面积/耕地面积(%);
- (4) 降水量(u_4): 研究水平年内平均降水量(mm);
- (5) 人均占有水资源量(u_5): 区域水资源总量/总人口(m^3 /人);
- (6) 生态用水率(u_6): 生态用水量/总水量(%).

按照这 6 个评价因素对水资源承载力的影响程度,并借鉴其他水资源评价标准^[16],将其划分为 3 个等级,每个因素各等级数量指标见表 1。其中 z_1 级表示水资源承载能力较差; z_3 级表示水资源承载能力较强; z_2 级情况介于以上两级之间。为了更好地反映各级水资源承载能力情况,对评判等级进行 0~1 区间的评分 $\alpha_1=0.05, \alpha_2=0.5, \alpha_3=0.95$, 以便反映各等级因素对承载能力的影响程度,其值越高,水资源开发容量的潜力就越大。

表 1 综合评价指标的分级值

	评价指标						α_j
	$u_1/\%$	$u_2/\%$	$u_3/\%$	u_4/mm	$u_5/(\text{m}^3 \cdot \text{人})$	$u_6/\%$	
z_1	>75	>5	>60	<300	<1000	<1	0.05
z_2	$75 \sim 50$	$5 \sim 0$	$60 \sim 20$	$300 \sim 450$	$1000 \sim 1750$	$1 \sim 5$	0.50
z_3	<50	<0	<20	>450	>1750	>5	0.95

1.2.3 评价因素隶属度计算公式 参照相关文献^[16-17],根据各评价因素的实际数值,按照各因素的分级指标分析推求评判矩阵 R 隶属函数 r_{ij} 的值。采用模糊处理消除不同等级之间数值相差不大而等级相差一级的跳跃现象,使其各级间平滑过渡。对评价因素 u_1, u_2, u_3 各评价级隶属函数计算公式为:

$$r_{i1} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{u_i - k_1}{u_i - k_2}) & u_i > k_1 \\ 0.5(1 - \frac{k_1 - u_i}{k_1 - k_2}) & k_2 < u_i \leq k_1 \\ 0 & u_i \leq k_2 \end{cases}$$
$$r_{i2} = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{u_i - k_1}{u_i - k_2}) & u_i > k_1 \\ 0.5(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_1 - k_2}) & k_2 < u_i \leq k_1 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_3 < u_i \leq k_2 \\ 0.5(1 - \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \leq k_3 \end{cases}$$
$$r_{i3} = \begin{cases} 0 & u_i > k_2 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_3 < u_i \leq k_2 \\ 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \leq k_3 \end{cases}$$

对于评价因素 u_4, u_5, u_6 各评作级隶属函数计算公式为:

$$r_{i1} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_1}{k_2 - k_1}) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0 & u_i \geq k_2 \end{cases}$$
$$r_{i2} = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_1}{k_2 - k_1}) & k_1 < u_i \leq k_2 \\ 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_2}) & k_2 < u_i \leq k_3 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_3}{u_i - k_2}) & u_i > k_3 \end{cases}$$
$$r_{i3} = \begin{cases} 0 & u_i < k_2 \\ 0.5(1 - \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_2}) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_3}{u_i - k_2}) & u_i \geq k_3 \end{cases}$$

式中: k_1 ——评价等级 z_1 与 z_2 的临界值; k_3 ——评价等级 z_2 与 z_3 的临界值; k_2 ——评价等级 z_2 的中点值, $k_2 = \frac{k_1 + k_3}{2}$ 。各指标对应的评价指标临界值见表 2。

表 2 各评价指标对应的评价等级临界值

	评价指标						α_j
	$u_1/\%$	$u_2/\%$	$u_3/\%$	u_4/mm	$u_5/(\text{m}^3 \cdot \text{人})$	$u_6/\%$	
k_1	75	5	60	300	1000	1	0.05
k_2	62.5	2.5	40	375	1375	3	0.50
k_3	50	0	20	450	1750	5	0.95

2 水资源承载力综合评价

2.1 评价过程

将北方各省市 2009 年各评判因素的指标值(表 3)和 k_i 的值(表 2)代入隶属度函数,计算出各分区及整个研究区每个评判因素对各个等级的隶属度 r_{ij} ,从而求出综合评价矩阵 R 的值(表 4)。

综合考虑各评判指标间相互重复度以及不同指标对水资源承载力影响程度的大小,参考全国水资源评价标准,各评价因素赋予不同权重。其中水资源利用率、缺水率对水资源承载力影响较大,故分别赋予

权重 0.25,即 $a_1 = a_2 = 0.25$;而人均水资源占有量对水资源承载力的影响也不容忽视,故赋予权重 0.2,即 $a_5 = 0.2$;其他评价因素如耕地灌溉率、降水量、生态用水率权重为 0.1,即 $a_3 = a_4 = a_6 = 0.1$ 。因此权重矩阵 $A = (0.25, 0.25, 0.1, 0.1, 0.2, 0.1)$ 。根据模糊综合评价模型思路,将 $B = A \cdot R$ 按一般矩阵计算规则,可以求得水资源承载力的最终结果矩阵 $B = (b_1, b_2, b_3)$ 。进而根据公式 $a = \sum_{j=1}^n b_j \alpha_j / \sum_{j=1}^m b_j = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot (b_1, b_2, b_3)^T$ 得到各分区水资源承载力的综合评分值(表 5)。

表 3 水资源承载力评价因素指标统计

分区	评价指标					
	$u_1/\%$	$u_2/\%$	$u_3/\%$	u_4/mm	$u_5/(\text{m}^3\cdot\text{人})$	$u_6/\%$
北京	122	29	94	480.6	124.2	16.5
天津	115	26	79	566.2	123.8	7.2
河北	103	20	72	698.9	200.7	1.9
山西	49	0	31	625.1	250.4	1.5
内蒙古	36	0	41	265.0	1561.1	2.0
辽宁	63	0	37	657.7	395.9	1.9
山东	58	0	65	701.8	300.9	1.4
河南	53	0	63	762.5	346.6	1.9
研究区	57	0	55	4757.8	364.5	2.0

表 4 水资源承载力综合评价矩阵 R

分区	分级	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
北京	z_1	0.895	0.953	0.815	0.000	0.850	0.000
	z_2	0.105	0.047	0.185	0.355	0.150	0.074
	z_3	0.000	0.000	0.000	0.645	0.000	0.926
天津	z_1	0.881	0.947	0.744	0.000	0.850	0.000
	z_2	0.119	0.053	0.256	0.196	0.150	0.238
	z_3	0.000	0.000	0.000	0.804	0.000	0.762
河北	z_1	0.846	0.929	0.690	0.000	0.840	0.275
	z_2	0.154	0.071	0.310	0.116	0.160	0.725
	z_3	0.000	0.000	0.000	0.884	0.000	0.000
山西	z_1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.833	0.375
	z_2	0.463	0.030	0.775	0.150	0.167	0.625
	z_3	0.537	0.970	0.225	0.850	0.000	0.000
内蒙古	z_1	0.000	0.000	0.025	0.659	0.000	0.250
	z_2	0.236	0.015	0.975	0.341	0.752	0.750
	z_3	0.764	0.985	0.000	0.000	0.248	0.000
辽宁	z_1	0.020	0.000	0.000	0.000	0.808	0.275
	z_2	0.980	0.071	0.925	0.133	0.192	0.725
	z_3	0.000	0.929	0.075	0.867	0.000	0.000
山东	z_1	0.000	0.000	0.600	0.000	0.825	0.400
	z_2	0.820	0.051	0.400	0.115	0.175	0.600
	z_3	0.180	0.949	0.000	0.885	0.000	0.000
河南	z_1	0.000	0.000	0.565	0.000	0.818	0.275
	z_2	0.620	0.037	0.435	0.097	0.182	0.725
	z_3	0.380	0.963	0.000	0.903	0.000	0.000
研究区	z_1	0.000	0.000	0.375	0.000	0.814	0.250
	z_2	0.780	0.049	0.625	0.009	0.186	0.750
	z_3	0.220	0.951	0.000	0.991	0.000	0.000

2.2 评价结果及分析

由表 5 可以看出,2009 年该研究区对 z_1,z_2,z_3 和的隶属度分别为 0.225,0.383,0.392, z_2,z_3 隶属度高于 z_1 ,综合评分值为 0.575,表明我国北方水资源开发已有一定规模,水资源承载力开发仍有一定潜力。8 个评价子区中,北京、天津、河北三省市水资源承载较为脆弱,综合评分值分别为 0.250,0.255,0.221,对 z_1 的隶属度在 0.7 以上,对 z_3 的隶属度在 0.2 以下,这说明三省市水资源开发利用已有相当的

规模,进一步开发利用的潜力已相当小,特别是河北对 z_3 的隶属度仅为0.088,说明河北水资源开发程度已接近饱和,承载力相当脆弱,京津冀模糊评价数据表明:北京、天津凭借政治地位和经济上的优势,工农业生产用水及人民生活用水需求逐年增加,南水北调中线工程向北京的供水主要来自河北,而同样缺水的河北只能通过引黄河水获得有限的水资源,剩下的办法只有大量开采地下水,地下水位持续下降,将使河北水资源面临严峻考验。

山西、内蒙古、辽宁、山东、河南五省区综合评分值在 0.5~0.7 之间,对 z_1 的隶属度在 0.1~0.3 之间,对 z_2 、 z_3 的隶属度在 0.3~0.5 之间,明显高于对 z_1 的隶属度,可见这五省市的水资源承载能力相对较强,水资源的开发利用尚有一定的空间。

探讨各评价指标对 z_1 、 z_2 和 z_3 的隶属度之间的关系有助于根据水资源在利用和管理中存在的问题提出相应的对策,各评价指标中京津冀三省市中 u_1 (水资源利用率)对 z_1 的隶属度达 0.895, u_2 (缺水率)对 z_1 的隶属度高达 0.953, u_5 (人均占有水资源量)对 z_1 的隶属度高达 0.850,可见城市扩展和人口的急剧增加,制约了京津冀都市圈水资源可持续利用和生态环境的可持续发展,三省市水资源供需平衡仍维持在较低水平。

另外考虑生态用水 u_6 对 z_3 的隶属度,北京、天津分别高达 0.926 和 0.762,可见经济发达地区生态环境保护意识增强,通过行政手段实现生态用水补给的成效明显;灌溉率 u_3 对 z_1 的隶属度数据显示,除山西、内蒙古、辽宁滨海地区以外,其余省份均在 0.6 左右,可见北方农业灌溉用水量占有较大比重,应适度修正以追求粮食高产为目的的高耗水或低用水效率的农作模式,在保证灌溉面积不变的情况下,实行节水灌溉技术,逐步减少农业用水量。

表 5 研究区水资源承载力综合评价结果

分区	z_1	z_2	z_3	综合评分值
北京	0.714	0.129	0.157	0.250
天津	0.701	0.142	0.157	0.255
河北	0.708	0.204	0.088	0.221
山西	0.204	0.312	0.484	0.626
内蒙古	0.093	0.420	0.487	0.677
辽宁	0.195	0.479	0.326	0.559
山东	0.265	0.364	0.371	0.548
河南	0.248	0.326	0.426	0.580
研究区	0.225	0.383	0.392	0.575

3 结论及建议

应用模糊评价模型对北方八省市水资源承载力进行了分析评价,结果表明:总体来看,八省市水资源开发利用已有一定规模,但仍有一定潜力,但 8 个评价分区水资源承载状况差异很大。京津冀水资源开发程度已接近于饱和,承载力相当脆弱,进一步开发利用的潜力已相当小,其它各省区水资源开发仍有一定潜力。通过对各评价指标与评价等级的关系矩阵分析,结合各省实际情况对北方水资源管理提出以下对策:

(1) 北方水资源供需状况相对平衡,但随着经济

和社会的发展,水资源短缺问题会日益凸显,京津冀都市圈水资源短缺形势已相当严峻,今后要在充分利用自产水资源的前提下,全面实行高科技、现代化的节水技术,加强社会大众的节水意识,将水资源保护和管理提升到战略高度;加大跨流域调水工程的实施力度,防治长时间持续超采地下水给北方生态农业造成的严重负面影响。

(2) 对辽宁省、山东省、河南省而言,分析各指标对 z_1 、 z_2 和 z_3 的隶属度,可以发现近年来影响这些省份水资源承载力变化的主要因素是人口压力和农业灌溉用水的增加,人口与环境的矛盾仍然突出,应继续坚持计划生育促进人口长期均衡发展;大力发展农业节水,加强灌区节水改造和田间高效节水灌溉,提高农业节水水平;合理调整经济布局 and 产业结构,大力发展低耗水产业,完善农业、工业、生活用水体系,从而提高水资源承载力。

(3) 山西和内蒙古属于资源型极度缺水地区,改善气候条件及提高生态环境质量是该区域实现水资源可持续利用的根本,应进一步保持水土涵养水源,提高地区植被覆盖率,建立适应半干旱气候变化、应对农业资源性缺水的替代型农业生产新体系,加速发展以提高水资源利用效率、利用效益为中心和区域经济同步发展的节水高效型农业生产模式。

参考文献:

[1] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].地理科学进展,2001,20(3):227-233.

[2] 张利平,夏军,胡志芳.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.

[3] 秦伟,朱清科,吴宗凯,吴起县 2015 年水资源承载力评价[J].干旱区研究,2007,24(1):70-76.

[4] 张军,周冬梅,张仁陟.黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1779-1785.

[5] 张青峰,王力,邵明安,等.长武县水资源承载力分析计算与评价[J].水土保持研究,2009,16(6):88-91.

[6] 施雅风,曲耀光.乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M].北京:科学出版社,1992.

[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] Falkenmark M, Lundqvist J. Towards water security: Political determination and human adaptation crucial [J]. Natural resources forum, 1998, 21(3): 37-51.

[9] 王江,李靖,魏红义,等.基于 TOPSIS 法的区域水资源承载力预测评价:以陕西省关中地区为例[J].水土保持研究,2008,15(3):161-163.

市相对其他3个断面城市化较慢且其周边以农业生产为主,只受到轻度Zn污染。

(2) 4个断面沉积物中各重金属潜在生态风险指数均值由高到低为 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Mn}$, 均小于40; 潜在生态风险指数值由高到低为: 何家湾(33.43) > 凉港大桥(32.98) > 金花桥(32.43) > 马家市(23.67), 均小于140, 属于轻微生态风险。

(3) 城市化带来的江安河城乡交错段的重金属污染初见端倪, 建议对其进行疏浚清淤, 且环境管理部门应加强城乡交错带的环境管理与整治, 特别是对工业企业的环境管理, 以减少并避免沉积物污染带来的生态风险。

参考文献:

- [1] 陈佑启, 王伟. 城乡交错带人地系统的特征及其演变机制分析[J]. 地理科学, 1998, 18(5): 418-424.
- [2] 胡聃, 王如松. 城乡交错带的生态控制论分析: 天津实例研究[J]. 生态学报, 1996, 16(1): 50-57.
- [3] 马涛, 杨凤辉, 李博等. 城乡交错带: 特殊的生态区[J]. 城市环境与城市生态, 2004, 17(1): 37-39.
- [4] 肖笃宁, 高峻, 石铁矛. 景观生态学在城市规划和管理中的应用[J]. 地球科学进展, 2001, 16(6): 818-819.
- [5] 高峻, 宋永昌. 基于遥感和GIS的城乡交错带景观演变研究: 以上海西南地区为例[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 807-813.
- [6] 高雅玉, 唐家凯, 钱鞠, 等. 土地利用/覆被变化对水环境影响的研究综述[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 16-18.
- [7] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 160.
- [8] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版

社, 1992: 147-254.

- [9] Li Chunye, He Mengchang, Zhou Yuxiang, et al. Distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment of the Second Songhua River, China[J]. Environ. Monit. Assess, 2008, 137(1/3): 329-342.
- [10] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2599-2605.
- [11] 高文. 成都小学生调查江安河污染状况[EB/OL]. <http://www.lvsecn.org/html/Edu/lvsehuodong/2011/0520/16784.html>.
- [12] 陈家栋, 潘宝宝, 张金池, 等. 广东大宝山矿区土壤重金属含量及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 237-241.
- [13] 长江流域水环境监测中心. 水环境监测规范(SL219-98)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 23.
- [14] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geo. Journal, 1969, 2(3): 108-118.
- [15] 杨菊, 万新南. 成都市人工湖塘沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 156-157.
- [16] 周克元, 刘延国, 李均强, 等. 实用环境保护数据大全(第一分册); 环境监测分析实用数据[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 1991: 372.
- [17] 孟昭虹, 周嘉, 郑元福. 哈尔滨市城市土壤重金属生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 152-155.
- [18] Hankanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 李延吉, 宋政刚, 李润东, 等. 蒲河重金属污染现状及模糊综合评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 121-124.

(上接第172页)

- [10] 谢高地, 周海林, 甄霖, 等. 中国水资源对发展的承载能力研究[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 2-7.
- [11] 李丽娜, 石培基, 董翰蓉, 等. 干旱区石羊河流域水资源研究进展[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 280-284.
- [12] 吕萍, 刘东, 赵菲菲. 基于熵权的建三江分局水资源承载力模糊物元评价模型[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 246-250.
- [13] 温利华, 王永芹, 张广录, 等. 海河流域土地利用变化研究[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(5): 136-141.

- [14] 丁相毅, 贾仰文, 王浩, 等. 气候变化对海河流域水资源的影响及其对策[J]. 自然资源学报, 2010, 9(4): 78-87.
- [15] 黄永基, 马滇真. 区域水资源供需分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990: 65-70.
- [16] 苏永红, 冯起, 刘蔚. 应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 169-175.
- [17] 孟丽红, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 185-190.