

中国区域水资源可持续利用评价及类型划分

刘毅¹, 贾若祥², 侯晓丽^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 国家发展和改革委员会国土开发与地区经济研究所, 北京 100038; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:基于可持续发展理念,分析了水资源可持续利用的特征,构建了评价水资源可持续利用的评价指标体系,从水资源现状、水资源利用效率、水资源可持续利用压力和水资源可持续利用能力 4 个方面对水资源可持续利用状况进行综合评价。按照此评价指标体系,采用定性和定量相结合的方法,对我国 31 个省市自治区的水资源可持续利用状况进行评价,然后按照评价结果将其分为高发展组、较高发展组、中等发展组、较低发展组和低发展组 5 个类型。从空间分布上看,水资源可持续利用状况基本呈现从东南沿海向西北内陆逐渐递减的趋势。从影响水资源可持续利用的因素看,除了水资源禀赋外,水资源利用效率低下成为制约水资源可持续利用的另一个重要因素。从评价中还发现,水资源禀赋同水资源利用效率呈现一定的反相关关系。

关键词:水资源可持续利用;影响因素;评价指标体系;类型划分

中图分类号:X921 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)01-0042-05

Evaluation of China's Regional Sustainable Utilization of Water Resources and Its Type Classification

LIU Yi¹, JIA Ru-xiang², HOU Xia-li^{1,3}

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Institute of Spatial Planning and Regional Economy National Development and Reform Commission, PRC, Beijing 100038, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract:Based on the idea of sustainable development, this paper analyzes the characteristics of sustainable utilization of water resources and builds the sustainable utilization evaluation system of water resources in the aspect of the status of water resources, the efficiency of water resources utilization, the stress of water resources sustainable utilization and the capacity of water resources sustainable utilization. According to this evaluation system, the sustainable utilization of water resources in China's 31 provincial regions is evaluated and is classified as 5 types correspondingly, namely high, relative high, medium, relative low and low types. The situation of water sustainable development presents the general decrease trend from the northeast coastal area to north west inland. Compared with water resources endowment, the low water utilization efficiency is becoming another restrict to water sustainable utilization. There is obvious inverse correlation between water resources endowment and its utilization efficiency.

Key words: sustainable utilization of water resources; affecting factor; evaluation system; type classification

1 水资源可持续利用的特征

工业化时期人口的快速增长和环境的严重破坏加剧了人与自然的矛盾,并制约了经济和社会的健康发展,若继续这种不可持续的发展模式,矛盾的最终激化会给人类带来灾难性的后果,在对传统发展模式进行不断反思后,人们提出了可持续发展的思想。联合国环境与发展委员会于 1987 年发表题为《我们共同的未来》的报告,认为可持续发展是既满足当代人的需求,又不危及后代人满足其需求能力的发展模式^[1],并得到社会的广泛认可。可持续发展是一个复杂的巨系统,其实质就是要协调好人口、资源和环境之间的关系,其目的就是保持社会和经济的持续发展。

水作为人类必需而不可替代的一种资源,是实现社会经济可持续发展的重要物质基础。水资源可持续利用就是在维持水的持续性和生态系统整体性的条件下,支持人口、资源、环境与经济协调发展和满足代内和代际人用水需要的全部过程^[2]。水资源可持续利用既要保证水资源开发利用的连续性和持久性,又要使水资源的开发利用尽量满足社会与经济不断发展的需求,两者必须密切配合。没有水资源的可持续利用,就谈不上社会经济的持续发展,反之,如果社会经济发展的需求得不到水资源系统的

收稿日期:2004-02-25;修订日期:2004-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40171028)。

作者简介:刘毅(1957~),男,中国科学院地理科学与资源研究所研究员,博士生导师,主要从事区域可持续发展方面研究。E-mail: liuy@igsnr.ac.cn

支持,则会反作用于水资源系统,影响甚至破坏水资源开发利用的可持续性^[3]。作为可持续发展中的一个重要子系统,水资源可持续利用具有如下特点。

1.1 区域性

区域是一个多层次的空间系统,既有等级差异,如国家级、省级、地市级和县级;又有类型之别,如城市和乡村、平原和山地等。对于不同的区域来说,它们的水资源禀赋、水资源利用效率、水资源可持续利用压力和水资源可持续利用能力差别很大。每个区域必须探索适合自己特点的水资源可持续利用模式,不可能千篇一律的套用同一种模式。

1.2 复杂性

水资源可持续利用是一个复杂的巨系统,涉及要素很多,不能只就水论水,而要从整体观念出发,各方协作,才能实现。能够使人类长期利用的水是在自然界通过全球水文循环可恢复、更新的淡水,水资源可持续开发利用应限制在其恢复、更新能力以内。因此,水资源可持续利用不仅仅涉及当地的水资源禀赋条件,而且还涉及到当地水资源利用方式、废水处理能力、城市化水平、经济条件等多方面内容,只有将各方面内容都协调好,才有可能实现水资源可持续利用。

1.3 相对性

水资源可持续利用是相对于传统发展模式而提出了一种新的发展模式,因此,是否可持续只是相对而言,量化后的结果只是一种相对值,而不是绝对值。目前不同评价水资源可持续利用水平高低的指标体系,只能表示各水资源可持续利用水平的相对高低,而不是水资源可持续利用的绝对水平。

2 影响水资源可持续利用的因素

影响水资源可持续利用的因素很多,其中水资源现状、水资源利用效率、水资源可持续利用压力和水资源可持续利用能力是影响水资源可持续利用的关键因素^[4]。

2.1 水资源现状

水资源现状是区域水资源可持续利用的物质基础。我国幅员辽阔,南北和东西跨度很大,各地区降水量、径流深、区域面积和人口数量差别很大,导致各地区不仅在水资源总量上差别很大,而且在人均水资源量和单位面积水资源量上也有很大差别。仅从降水量上看,我国降水量最高的省份为海南,年降水量高达 2170 mm,最低的为宁夏,仅为 214 mm,两者相差 10 倍多^[5]。

2.2 水资源利用效率

水资源利用效率是衡量水资源可持续利用的一项重要指标,尤其是对于缺水地区,提高水资源利用效率是实现水资源可持续利用的重要措施之一。目前,我国各地区间水资源利用效率差别很大,从单位 GDP 用水量上看,天津的万元 GDP 用水量是 140 m³,而新疆的万元 GDP 用水量高达 3520 m³,两者相差 25 倍多。此外,我国不同地区单位工业产值用水量和农业亩均灌溉用水量差别也很大,最大差距分别为 23 倍(天津和西藏)和 6 倍(河南和宁夏)。

2.3 水资源可持续利用压力

环境污染是制约水可持续利用的关键因素,也是不可持续的集中体现,水资源可持续利用压力主要体现在水资源污染程度上。水资源污染包括人们在生产过程中对水资源的污染,还包括人们在日常生活中对水资源的污染。随着人们可持续发展意识的逐步提高,人们对水资源污染问题愈来愈重视,但是各地区受经济实力等多种因素限制,水资源污染程度的区域差异仍然很大。如天津的工业废水排放达标率高达 99.5%,而宁夏的工业废水排放达标率仅为 41.7%。此外,各地区水资源开发利用程度也是影响水资源可持续利用压力的一项重要因素。

2.4 水资源可持续利用能力

水资源可持续利用能力是指解决水资源可持续利用中不可持续因素的能力,包括治理废污水的能力、提高水资源利用效率的能力等。水资源可持续利用能力的高低,既反映了当前水资源可持续利用现状,也从很大程度上反映了其将来可持续利用的潜力。提高水资源可持续利用能力是实现我国水资源可持续利用战略的重要措施之一。目前,我国水资源可持续利用能力的区域差别很大,仅从节水灌溉面积看,北京的节水灌溉面积占到总灌溉面积的 71%,而广东仅为 5%。

3 水资源可持续利用评价指标体系及评价方法

3.1 水资源可持续利用评价指标体系

指标体系是从系统角度对研究对象进行抽象和刻化的概念模型。指标体系最上为目标层,反映研究对象的总体目标,以下依次为二级子系统、三级子系统、四级子系统层,分别表示分目标、具体指标和计算方法。一般的指标体系分 2~4 层,实际运用中超过 4 层的很少,也不便于使用。基于以上分析,结合影响区域水资源可持续利用的关键因素,本文设计了如下水资源可持续利用评估指标体系(表 1)^[3-6]。

表 1 水资源可持续利用评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation system of sustainable utilization of water resources

总目标	分目标	具体指标	计算方法
水资源	现状	人均水资源 (S_1)	水资源总量/总人口
		水资源密度 (S_2)	水资源总量/国土面积
		地表水资源比重 (S_3)	地表水资源量/水资源总量
		降水量 (S_4)	统计口径
		径流深 (S_5)	统计口径
水资源	利用	GDP用水量 (E_1)	用水总量/GDP
		工业增加值用水量 (E_2)	工业用水量/工业增加值
		工业用水比例 (E_3)	工业用水量/用水总量
		农业灌溉用水量 (E_4)	农业灌溉用水/农业灌溉面积
		农村用水量 (E_5)	农村生活用水量/农村人口
		城镇居民用水量 (E_6)	城市生活用水/城市人口
水资源	可持续	水资源利用程度 (P_1)	用水量/水资源量
		GDP废水排放量 (P_2)	废水排放总量/GDP
		工业废水排放量 (P_3)	工业废水排放量/工业产值
		人均废水排放量 (P_4)	废水排放总量/总人口
		城市污水排放量 (P_5)	城市污水排放量/城市人口
		工业废水排放达标率 (C_1)	工业废水排放达标量/总排放量
水资源	可持续	工业用水重复率 (C_2)	重复用水/工业用水
		城镇生活污水处理率 (C_3)	城镇生活污水处理量/城镇生活污水
		污水处理投资比重 (C_4)	污水处理投资/污染治理投资
		节水灌溉比重 (C_5)	节水灌溉面积/总灌溉面积

3.2 指标权重的确定

指标体系是对水资源可持续利用系统的合理抽象和模拟,但各个指标对系统的贡献是不同的,这可以用一组归一化的权重 W_1, W_2, \dots, W_n 来刻画.传统的权重分配常用 Delphi 专家咨询法和层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP).其中 Delphi

表 2 指标权重

Table 2 Weight of each factor

指标	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
权重	0.3216	0.1857	0.1072	0.2444	0.1411	0.2693	0.1393	0.0898	0.2161	0.1118	0.1736
指标	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	
权重	0.3216	0.2444	0.1072	0.1857	0.1411	0.3216	0.1411	0.2444	0.1072	0.1857	

3.3 水资源可持续利用评价计算方法

水资源可持续利用评价计算是在无量纲化基础上进行的加权综合评价,所以评价模型分为无量纲化计算和综合评价 2 部分.

3.3.1 无量纲化计算模型

无量纲化计算是为了消除不同量纲之间的差别,使不同的指标之间可以相互叠加.这里采用极值无量纲化处理办法,公式如下:

$$f(x_i) = x_i / \max_i \quad \text{若 } x_i \text{ 为正作用指标}$$

法不仅对咨询专家要求较高,而且多轮咨询的工作量较大.AHP 采用九标度刻划比较判断结果,使专家感到操作困难,而且计算复杂,还需要进行一致性检验.在保证科学性的前提下,为了计算的简便,本文采用改进的三标度层次分析法 (Improved AHP, I-AHP),其计算步骤如式(1)~(3)^[7].

构造主观比较矩阵:

$$C = [c_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

$$\text{其中 } c_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{指标 } i \text{ 比指标 } j \text{ 重要} \\ 0 & \text{指标 } i \text{ 与指标 } j \text{ 同等重要} \\ -1 & \text{指标 } i \text{ 不如指标 } j \text{ 重要} \end{cases}$$

建立感觉判断矩阵:

$$S = [s_{ij}]_{n \times n} \quad (2)$$

$$\text{其中, } s_{ij} = d_i - d_j, \quad d_i = \sum_j c_{ij}$$

计算客观判断矩阵:

$$R = [r_{ij}]_{n \times n} \quad (3)$$

$$\text{其中, } r_{ij} = p^{(s_{ij}/s_m)}$$

$$s_m = \max_{i,j} S_{ij} = \max_i (d_i) - \min_j (d_j)$$

p 为使用者定义的标度扩展值范围,如 $p = 3$ 或 7,本文取 3.

对矩阵 R 的任意一行进行归一化处理就可以得到权重向量 $[W_1, W_2, \dots, W_n]^T$.

对于第 2 层次的 4 项指标,经过专家咨询和计算,得出它们的权重,其中水资源现状为 0.2765,水资源利用效率为 0.1917,水资源可持续利用压力为 0.1329,水资源可持续利用能力为 0.3988.然后对指标体系中下一层次的各项指标进行打分计算,得出指标体系中最后一层各指标因素的权重(表 2).

$$f(x_i) = \min_i / x_i \quad \text{若 } x_i \text{ 为负作用指标}$$

其中, \max_i, \min_i 分别为指标 x_i 的最大值和最小值.

3.3.2 综合评价计算模型

综合评价模型一般采用加权求和的计算方法.设第 i 个指标的无量纲化指标值为 y_i ,对应的权重为 w_i ,则综合评价计算模型为:

$$Z = \sum_i w_i y_i$$

该模型强调指标的群体性,即个别指标的落后对系统整体功能不会造成太大影响.

4 计算结果及类型划分

4.1 计算结果

根据水资源可持续利用评价指标体系,将上述有关水资源可持续利用的具体指标进行加权求和,得出水资源现状、水资源利用效率、水资源可持续利用压力和水资源可持续利用能力 4 项分目标的评价得分,然后再将这 4 项分目标进行无量纲化处理,进行加权求和,得出全国各省市水资源可持续利用状态综合评价得分(表 3)。根据全国 31 个省份可持续利用综合评价得分,将其分为 5 种不同的类型,并绘制出水资源可持续利用类型空间分布图(图 1)。

表 3 中国各省市水资源可持续利用状态评价及分类¹⁾

Table 3 Evaluation and classification of sustainable development types of water resources in China

类型	省份	水资源现状	水资源利用效率	水资源利用压力	水资源可持续利用能力	总体水平	
高	海南	0.6851	0.1985	0.3240	0.7146	0.7122	
	浙江	0.5254	0.3660	0.3162	0.6586	0.6690	
	福建	0.5882	0.2870	0.2721	0.5989	0.6575	
	北京	0.1078	0.5554	0.3647	0.8951	0.6476	
	较高	天津	0.0734	0.7195	0.4028	0.8293	0.6427
		山东	0.1728	0.5972	0.2125	0.6868	0.6332
		云南	0.4206	0.2969	0.2010	0.6030	0.6214
		上海	0.3638	0.4862	0.5410	0.6731	0.6149
		河南	0.2759	0.5571	0.2762	0.5959	0.6009
		陕西	0.2116	0.4714	0.2214	0.6171	0.5803
中等	安徽	0.3282	0.4445	0.2568	0.5534	0.5788	
	山西	0.1268	0.6240	0.3121	0.6090	0.5557	
	四川	0.3512	0.3959	0.3171	0.5440	0.5554	
	贵州	0.4292	0.2871	0.2836	0.5131	0.5520	
	黑龙江	0.1705	0.3500	0.2238	0.6653	0.5518	
	江西	0.5121	0.2909	0.2932	0.4403	0.5516	
	重庆	0.4288	0.4866	0.4685	0.4578	0.5512	
	广东	0.5279	0.2942	0.4448	0.4637	0.5450	
	河北	0.1203	0.5014	0.2488	0.6240	0.5441	
	甘肃	0.1418	0.3021	0.2300	0.7014	0.5411	
	江苏	0.2944	0.3208	0.3724	0.6217	0.5374	
	内蒙古	0.1054	0.3915	0.2011	0.6359	0.5341	
	辽宁	0.1600	0.4479	0.3015	0.6192	0.5291	
	较低	湖南	0.4824	0.2506	0.3463	0.4285	0.5127
		湖北	0.3730	0.3265	0.3206	0.4653	0.5100
广西		0.4307	0.1815	0.5013	0.5414	0.5051	
吉林		0.2020	0.4110	0.2533	0.5063	0.4991	
西藏		0.5925	0.3340	0.1572	0.0529	0.4846	
新疆		0.1422	0.1936	0.2336	0.6013	0.4663	
低	青海	0.1797	0.2644	0.2581	0.4524	0.4255	
	宁夏	0.1171	0.2636	0.7296	0.4514	0.3472	

1) 根据文献[8]~[10]中有关数据计算,受资料限制,未包括中国的港澳台地区。

4.2 类型划分

(1) 高发展组 包括海南省。海南省位于我国最

南端,年降水量位居我国 31 个省份之首,水资源禀赋条件最好。海南省人均 GDP 在全国处于中等水平,工业和生活污水排放较少,而且水资源储备丰富,水资源可持续利用能力较高。但是,从评价结果可以看出,海南省的水资源利用效率低下,仅高于新疆和广西而位居全国后列,同时,由于海南省用水效率低下,其水资源可持续利用存在一定的压力,在全国居于第 10 位。

(2) 较高发展组 包括浙江、福建、北京、天津、山东、云南、上海和河南。这一组又可以分为两种类型:①缺水高效型,包括北京、天津、山东、河南和上海,这 5 个省份人口密度大,人均水资源量很少,由于严重缺水,这些省份的水资源利用效率高,从而在一定程度上缓解了当地水资源可持续利用压力,提高了其水资源可持续利用能力。②丰水低效型,包括浙江、福建和云南,这些省份水资源禀赋条件好,具有较大的开发潜力,但是其水资源利用效率较低,在全国只处于中等偏上水平,影响了其水资源可持续利用总体水平。

(3) 中等发展组 包括陕西、安徽、山西、四川、贵州、黑龙江、江西、重庆、广东、河北、甘肃、江苏、内蒙古和辽宁。这些省份也可大致分为两种类型:①缺水高效型,包括陕西、山西、黑龙江、河北、甘肃、江苏、内蒙古和辽宁。这些省份大部分位于我国中部地区,水资源禀赋条件较差,江苏虽然位于沿海地区,但是人口密度大,苏北地区农业用水比重大,苏南地区工业用水量很大,导致其人均水资源量低下。由于水资源现状条件差,这些地方的水资源利用效率较高,从一定程度上缓解了水资源可持续利用压力,提高了其水资源利用能力。②丰水低效型,包括安徽、四川、贵州、江西、重庆和广东 6 个省份。这些省份水资源禀赋条件较好,但是安徽、四川、贵州、江西和重庆经济发展相对落后,水资源利用效率低下,影响了其水资源可持续利用能力,增加了其水资源可持续利用压力。广东虽然具有丰富的水资源,但其水田比重高,农业灌溉以粗放型为主,致使其水资源利用效率十分低下。同时,由于广东经济发展迅速,废污水治理也面临一定压力。

(4) 较低发展组 包括湖南、湖北、广西、吉林和西藏。这些省份除了吉林以外,大都具有比较丰富的水资源禀赋。湖南、湖北和广西水田比重大,农业灌溉用水效率低下,其中西藏受地形条件的影响,水资源开发利用难度很大,这些都影响了其水资源可持续利用能力,使其水资源可持续利用水平低下。

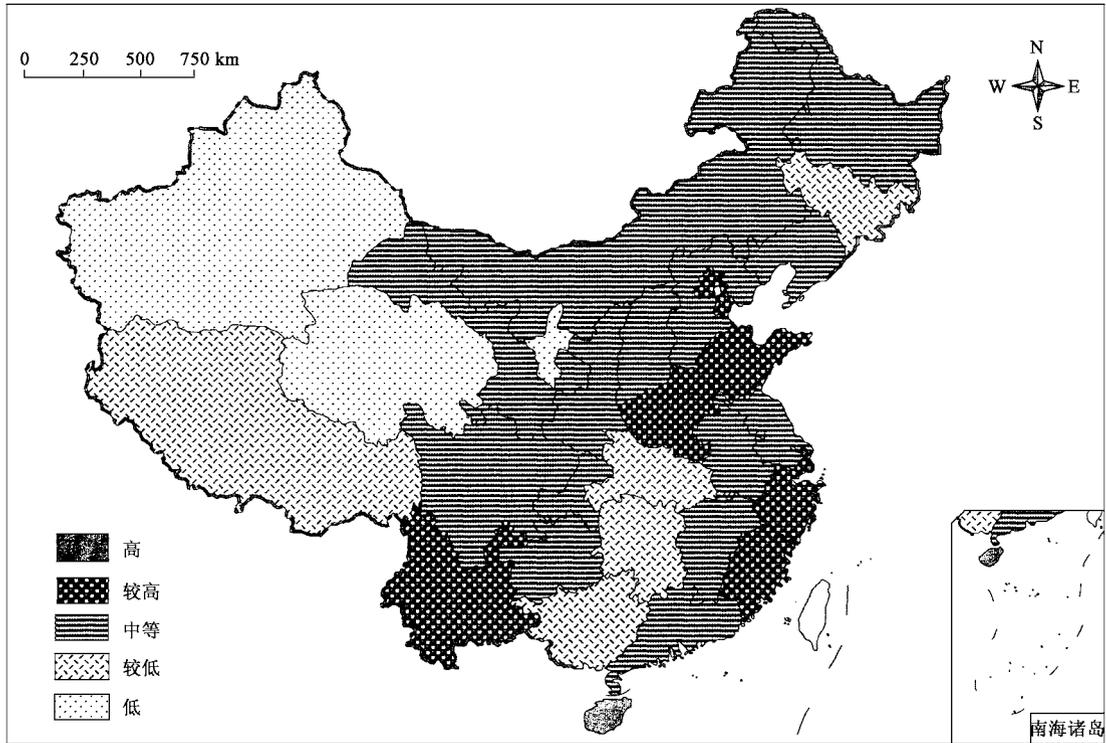


图 1 中国水资源可持续利用类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of different sustainable development types of water resources in China

(5) 低发展组 包括新疆、青海和宁夏。这些省份分布在我国西北地区，年降水量很少，水资源禀赋差。这些地区经济发展比较落后，农业比重大，水资源利用效率低下，水资源可持续利用压力较高，水资源可持续利用能力很低。

5 结论

从水资源可持续利用类型分布可以看出，我国水资源可持续利用水平的区域差异非常明显。从空间分布上看，水资源可持续利用状况从高到低基本上呈现从东南沿海向西北内陆逐步递减的趋势。但是由于水资源可持续利用受多种因素影响，某些地区在空间上并没有呈现比较明显的地带性。从评价结果看，我国水资源禀赋和水资源利用效率存在一定的反相关关系：丰水区水资源利用效率比较低，缺水地区水资源利用效率比较高。除人均水资源量少外，丰水区水资源利用效率普遍低下，成为制约我国水资源可持续利用的另一个重要因素。

参考文献：

- [1] 王伟中, 郭日生, 黄晶. 地方可持续发展导论[M]. 北京: 商务印书馆, 1999. 32 ~ 45.
- [2] 刘恒, 耿雷华, 陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 265 ~ 270.
- [3] 刘昌明. 水与可持续发展[J]. 水科学进展, 1997, 8(4): 378 ~ 379.
- [4] 左东启, 戴树声, 袁汝华, 等. 水资源评价指标体系研究[J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 365 ~ 374.
- [5] 贾绍凤, 张士锋, 王浩. 用水合理性评价指标探讨[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 260 ~ 264.
- [6] 柯兵, 柳文华, 段光明, 等. 虚拟水在解决农业生产和粮食安全中的作用研究[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 32 ~ 37.
- [7] 贾若祥, 刘毅. 中国区域可持续发展状态及类型划分[J]. 地理研究, 2003, 22(5): 2 ~ 10.
- [8] 中华人民共和国国家统计局编. 中国统计年鉴(2002)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002. 4 ~ 11, 49 ~ 68, 94 ~ 100, 818 ~ 819.
- [9] 《中国环境年鉴》编辑委员会编. 中国环境年鉴(2002)[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2002. 582 ~ 586, 598 ~ 602.
- [10] 《中国水利年鉴》编纂委员会编. 中国水利年鉴(2002)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 452 ~ 462, 530 ~ 532.