

民勤绿洲生态环境需水量计算研究*

王化齐^{1,2}, 蔡焕杰², 董增川¹, 张鑫², 吴钊³

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 3. 西安市水利规划勘测设计院, 西安 710000)

摘 要:生态环境需水量是在特定的时间和空间条件下, 为了维持和改善生态环境系统正常的生态结构与生态环境功能所需要的水资源量。从石羊河下游民勤绿洲的生态环境系统的特殊性和典型性出发, 为维持和保护区域生态环境系统正常的生态功能, 探讨区域生态环境需水量计算方法, 提出适合研究区的生态环境需水量计算模型, 并对研究区域生态环境需水进行定量化计算, 得出 2000 年民勤绿洲生态环境需水量为 $4.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。
关键词:生态环境需水量; 生态环境系统; 石羊河; 民勤
中图分类号: P331; X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2008)01-0032-04

Calculation of Eco-environmental Water Demand in Minqin Oasis

WANG Huaqi^{1,2}, CAI Huanjie², DONG Zengchuan¹, ZHANG Xin², WU Zhao³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Agriculture Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid Areas by Ministry of Education, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Water Conservancy Reconnaissance Programming Institute of Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Water demand of eco-environment is the needed water resources in the course of sustaining and improving the structure and the function of the eco-environment system. On the base of the particularity and representative of the eco-environment system in Minqin oasis, in the lower reach of Shiyang river, to sustain and protect the basic function of the area eco-environment system, the calculation model of water demand of eco-environment is studied. This paper establishes a calculation model of water demand of eco-environment, which is adapted to the research area. Finally, water demand of eco-environment in Minqin oasis in the lower reach of Shiyang river is calculated, it is up to $4.07 \times 10^8 \text{ m}^3$.
Key words: water demand of eco-environment; system of eco-environment; Shiyang river; Minqin oasis

石羊河下游民勤绿洲生态环境质量恶化, 生态平衡频频遭到破坏, 在生态环境系统中预留出一定的有质量保证的水量, 保护其生态环境功能, 已经成为使流域生态环境系统向良性状态转变的基本保证。到目前为止, 有关生态环境需水量的研究刚刚处于起步阶段, 国外研究主要集中在河流生态基流方面^[1], 许多学者从多个角度进行了有意义的探索, 取得了较多有价值的研究成果^[2-3], 该文对民勤地区生态环境需水量进行初步的研究, 以期为民勤水资源的合理配置及生态环境的改善提供借鉴。

1 研究区概况

民勤绿洲位于河西走廊东部的石羊河流域下游, 东经 $101^{\circ}49' - 104^{\circ}12'$, 北纬 $38^{\circ}03' - 39^{\circ}28'$, 南靠凉州区, 东、北、西三面与阿拉善左旗、右旗金昌市接壤, 是我国典型的荒漠绿洲之一。民勤县属典型大陆性温带干旱气候, 太阳幅射

强, 日照充足, 夏季短而炎热, 冬季长而寒冷, 昼夜温差大, 降水稀少, 蒸发强烈, 是我国最干旱的地区之一。目前, 由于地下水严重超采致使地下水位急剧持续下降, 土壤盐渍化、沙化, 水质恶化, 植被覆盖率降低, 生态环境遭到严重破坏, 这给区域内人民的生存和经济发展带来了严重的威胁。引起的生态环境问题主要表现在: 荒漠化日益严重、植被退化、风沙危害加剧^[4]。

2 民勤生态环境需水量计算模型

生态环境需水量是在特定的时间和空间组合条件下, 为了维持和改善生态环境系统正常的生态结构与生态环境功能所需要的水资源量。目前, 生态环境需水量的计算一般按照功能逐一分类计算, 然后进行耦合。

不同功能的生态环境需水量因地区、气候以及覆盖情况等因素的不同, 计算方法差异很大。计算流域生态环境需水

* 收稿日期: 2006-11-11
基金项目: 高等学校博士点基金(20020712020); 高等学校优秀博士论文基金(200052)
作者简介: 王化齐(1980-), 女, 陕西户县人, 在读博士, 主要从事水文水资源以及生态环境评价研究。

量必须考虑流域实际情况、生态保护目标等, 不同的生态系统情况就不同, 同一生态系统不同的时段也有差别, 所以在建立计算模型时, 既要考虑系统的一般性, 又要考虑系统的特殊性。该文所采用生态环境需水计算模型为

$$W_{\text{流域}} = W_{\text{植被}} + W_{\text{河流}} + W_{\text{湿地}} + W_{\text{地下水}} + W_{\text{景观}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{流域}}$ ——流域生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{植被}}$ ——植被生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{河流}}$ ——河流生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{地下水}}$ ——恢复地下水位生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{景观}}$ ——景观及水上娱乐生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)。

2.1 植被生态环境需水量计算模型

植被生态环境需水量是指在一定的时空条件和生态保护目标下, 维持植被生态系统稳定, 使其发挥期望的生态功能所需要的一定水质条件下的水资源量。在降水稀少的情况下, 地下水埋深可作为干旱区植被生长的主要环境因子^[3]。所以, 目前估算天然植被生态环境需水量采用较多的方法是潜水蒸发法; 人工植被需水一般采取定额法计算, 具体计算如下:

$$W_{\text{植被}} = W_{\text{天然}} + W_{\text{人工}} \quad (2)$$

$$W_{\text{天然植被}} = 10^{-7} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} W_{ij} K_{ij} \quad (3)$$

$$W_{ij} = \alpha E_{ij} (1 - H_{ij}/H_{\max})^\beta \quad (4)$$

$$W_{\text{人工}} = 10^{-8} \sum_{i=1}^n A_i m_i \quad (5)$$

式中: $W_{\text{植被}}$ ——植被生态环境需水量(10^8 m^3); $W_{\text{天然}}$ ——天然植被生态环境需水量(10^8 m^3); $W_{\text{人工}}$ ——人工植被生态环境需水量(10^8 m^3); A_{ij} ——第 i 个时段第 j 个研究区天然植被面积(hm^2); E_{ij} ——第 i 个时段第 j 个研究区的蒸发量(mm); H_{ij} ——第 i 个时段第 j 个研究区潜水埋深(m); H_{\max} ——第 i 个时段第 j 个研究区的潜水极限埋深(m); α ——第 i 个时段第 j 个研究区植被系数, 这里取 0.216; β ——参数, 这里取 2.45; A_i ——第 j 个研究区人工植被面积(hm^2); m_i ——第 j 个研究区人工植被灌溉定额(m^3/hm^2)。

2.2 河流生态环境需水量的计算模型

河流生态系统生态环境需水量是针对水资源开发利用中的生态环境保护以及科学地进行生态环境建设和改善等问题而提出来的新概念, 至今尚未有明确的定义^[57]。从维护生态环境的天然结构与功能出发, 河流生态环境需水量主要包括: 河流基本生态环境需水量, 河流输沙需水量; 河流稀释自净需水量; 河流蒸发需水量、河湖渗漏需水量等。由于河流基本生态环境需水量、输沙需水量和稀释自净需水量之间存在重复, 而且重复部分难以进行耦合计算。而且在汛期河流流量很大, 满足排沙需水的同时, 又可以满足基本生态环境需水和保持水体稀释自净能力所需要的水量, 河流基本的生态环境需水量的计算主要考虑非汛期的需水量。该研究区域属于石羊河下游, 基本属于河流断流区域, 只有红崖山水库渗漏损失。根据具体情况采用具体的计算模型如下:

$$W_{\text{河流}} = \max(W_{\text{基本}}, W_{\text{输沙}}, W_{\text{稀释}}) + W_{\text{蒸发}} + W_{\text{渗漏}} \quad (6)$$

$$W_{\text{基本}} = \frac{T}{n} \sum_n \min Q_{ij} \times 10^{-8} \quad (7)$$

$$W_{\text{输沙}} = \frac{S_n}{\frac{10}{n} \sum_{i=1}^n \max C_{ij}} \quad (8)$$

$$W_{\text{渗漏}} = 10^{-8} L \sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i \quad (9)$$

$$Q_{\text{稀释}} = \lambda \times Q_w \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &\text{当 } E > P \quad W_{\text{蒸发}} = 10^7 A \times (E - P), \\ &\text{当 } E < P \text{ 为 } 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $W_{\text{河流}}$ ——河流生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{基本}}$ ——河流基本生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{输沙}}$ ——河流输沙生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{稀释}}$ ——河流稀释自净生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{蒸发}}$ ——河流蒸发生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{渗漏}}$ ——河流渗漏生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); $W_{\text{重复}}$ ——重复计算部分的生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); Q_{ij} ——第 i 年第 j 月的月均流量(m^3/s); T ——换算系数, 其值为 $31.536 \times 10^6 \text{ s}$; n ——统计年数; $Q_{\text{稀释}}$ ——该河流污染物稀释净化需水量(10^8 m^3); Q_w ——达标排放的污水量(10^8 m^3); λ ——河流稀释系数。按照现行的《污水综合排放标准》(GB8978-1996), 河流稀释系数取 7~10; S_n ——多年平均输沙量(10^4 t); C_{ij} ——第 i 年第 j 月的河流月输沙量(kg/m^3); S_s ——多年平均泥沙淤积量(10^4 t); A ——河湖面积(hm^2); E ——蒸发量(mm); P ——降雨量(mm)。

2.3 恢复地下水位生态环境需水量的确定

恢复地下水位生态环境需水量是指在特定的时空条件下将地下水位恢复到目标水位下所需要的一定水质条件下的水量(包括地表水、地下水和土壤水)。恢复地下水位生态环境需水量的估算首先根据区域的实际情况确定所要恢复的合理的目标水位, 然后按以下模型进行计算。

$$W_{\text{地下}} = 10^{-4} \sum_{i=1}^n \mu_i \times A_i \times |H_{\text{目标}i} - H_{0i}| \quad (12)$$

式中: $W_{\text{地下}}$ ——整个计算区恢复地下水位生态环境需水量($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$); μ_i ——第 i 个计算区含水层给水度; A_i ——第 i 个计算区等地下水位埋深的面积(hm^2); $H_{\text{目标}i}$ ——第 i 个计算区恢复到的目标地下水位埋深(m); H_{0i} ——第 i 个计算区地下水位埋深(m)。

2.4 景观及水上娱乐生态环境需水量的确定

景观及水上娱乐生态环境需水量包括城市绿地生态环境需水量和水上娱乐生态环境需水量, 城市绿地采用定额法, 水上娱乐生态环境需水同蒸发需水量的计算方法相同。

3 实例应用

采用提出的植被生态环境需水量计算模型对民勤绿洲植被生态环境需水量进行计算, 结果如表 1:

表 1 2000 年民勤盆地天然林草地生态环境需水量

项目	疏林地	灌木林	未成林 造地	有林地 (防护林)	天然 草地
面积/ hm^2	10665	20486	126	1349	320759
地下水位/ m	4	3	4.5	2.5	4.4
K	1.2	1.3	1.1	1.47	1.1
E/mm	2644.7	2644.7	2644.7	2644.7	2644.7
极限水位/ m	5	5	5	5	5
生态需水/ 10^4 m^3	141.74	1611.68	0.28	207.32	1117.88
小计/ 亿 m^3	0.196	0.112			

表 2 2000 年民勤盆地人工植被生态环境需水量									
人工草地			人工林地						合计
			防护林			苗 圃			
面积/ hm ²	定额/ (m ³ · h m ^{- 2})	生态环境 需水量/ 10 ⁸ m ³	面积/ hm ²	定额/ (m ³ · h m ^{- 2})	生态环境 需水量/ 10 ⁸ m ³	面积/ hm ²	定额/ (m ³ · h m ^{- 2})	生态环境 需水量/ 10 ⁸ m ³	生态环境 需水量/ 10 ⁸ m ³
375	3750	1406250	13433	3600	0. 48	75	4500	0. 0034	0. 501

注:表中需水定额取值参照甘肃省水资源综合规划需水预测成果(表 1)。

3.1 河流生态环境需水量的计算

3.1.1 河流基本生态环境需水量

根据石羊河香家湾测站统计的流量资料,采用式(7),按照多年月最小流量计算,从表 4 可以看出民勤绿洲河流基本生态环境需水量为 0.84×10⁸ m³。采用 Tennant 法(取多年

平均年径流量的百分比作为河道基本生态环境需水量)在 30% 情况下,计算结果与按照多年月最小流量法的计算结果比较相近。两种方法比较,民勤河流基本生态环境需水量就取前两者的平均值为 0.923×10⁸ m³。

表 3 生态基流计算													
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
多年月平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	11.72	15.46	15.25	9.40	5.60	6.76	11.02	9.25	9.21	8.09	7.36	11.46	3.19
多年月最小流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	3.70	4.30	4.87	3.77	1.46	1.38	2.62	2.01	2.68	1.61	1.67	1.73	0.84
月基本生态环境需水量/ 10^8 m^3	0.10	0.11	0.13	0.10	0.04	0.04	0.07	0.05	0.07	0.04	0.04	0.05	0.84

表 4 Tennant 法计算生态基流										
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
基本生态环境 需水量/10 ⁸ m ³	0.335	0.670	1.006	1.341	1.676	2.011	2.347	2.682	3.017	3.352

3.1.2 输沙需水量

生态环境需水量则为非汛期的输沙需水量,采用式 8,计算出输沙需水量为 0.76×10⁸ m³。

表 5 输沙需水量计算													
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
最大月输沙率/(kg • s ^{- 1})	0. 58	1. 10	47. 80	20. 30	33. 10	53. 70	56. 20	211	33. 20	12. 20	1. 17	1. 08	
最大月含沙量/(kg • m ^{- 3})	0. 13	0. 24	0. 29	0. 24	0. 61	7. 31	8. 26	63. 24	2. 86	3. 25	0. 30	0. 33	
多年平均输沙量/10 ⁴ t	0. 10	0. 18	1. 67	0. 83	1. 29	3. 02	4. 00	15. 61	2. 15	0. 68	0. 08	0. 14	29. 73
输沙需水量/10 ⁸ m ³	0. 08	0. 07	0. 59	0. 34	0. 21	0. 04	0. 05	0. 02	0. 08	0. 02	0. 03	0. 04	1. 57

注:表中资料参考石羊河流域香家湾水文站资料。

3.1.3 稀释自净需水量

一般说来,当排入的污水量超过水体原水量的 1/8 时,这个水体就会受到严重污染^[8]。2000 年,城市污水再生利用率平均达到处理量的 10%。因此该文采用的达标排放污

水量为排污总量的 10%。采用式(10),稀释系数取 8,求得河流稀释自净生态环境需水量为 280×10⁸ m³。

3.1.4 河流蒸发需水量

研究区域河流蒸发需水量具体计算结果见表 6。

表 6 水域蒸发需水量计算						
河流面积/ hm ²	河流水面蒸发 需水量/10 ⁸ m ³	湖泊、水库、坑塘 面积/hm ²	平均降雨量/ mm	平均蒸发量/ mm	湖泊、水库、坑塘蒸发 需水量/10 ⁸ m ³	总的水域蒸发 需水量/10 ⁸ m ³
690.9	0.1698	1138.8	122.1	2576.4	0.2793	0.449

表 7 2000 年民勤绿洲河流生态环境需水量计算						
河流生态环境需水量/10 ⁴ m ³						推荐值/ 10 ⁸ m ³
基流	输沙	自净	前三者 最大值	蒸发	渗漏	
9230	7900	280	9230	1696	1530	1.2456

3.1.5 河流渗漏需水量

石羊河下游民勤绿洲中惟一地表水域是红崖山水库,红崖山水库的渗漏,减少了水库水量,因此将部分水量算在渗漏需水这部分。根据民勤县水利局提供的红崖山水库观测资料^[9],给出的不同库水位条件下的月渗漏量资料,求出民

勤县红崖山水库 2000 年的蒸发渗漏量为 0.153×10⁸ m³。

由于河流系统的复杂性,计算河流生态环境需水量必定存在重复计算部分。采用式(6)计算,从表 7 可以得到,民勤河流生态环境需水量为 1.245 6×10⁸ m³。

3.2 恢复地下水位生态需水量的计算

恢复地下水位生态环境需水量是指在特定的时空条件下将地下水位恢复到目标水位下所需要的一定水质条件下的水量(包括地表水、地下水和土壤水)。根据该文对恢复地下水位生态环境需水量的概念界定,要计算恢复地下水位生态环境需水量首先就得制定恢复地下水位的原则和目标。在考虑特殊区域民勤时,不能完全从恢复生态的角度去考

虑,而是要从民勤人民的生存、社会经济状况和生态环境的恢复角度去综合考虑。总之,地下水位恢复的原则就是兼顾生态和生存的原则^[4]。

根据地下水动态观测资料,各灌区地下水位下降速度不是同步的,具体情况如下表 8。

表 8 民勤县各灌区情况

灌区	昌宁	环河	坝区	泉山	湖区
面积/10 ⁶ km ²	446	294.7	570	517	731
给水度*	0.15	0.1	0.2	0.11	0.085
地下水位平均 年降/(m·a ⁻¹)	0.8	0.3	0.35	0.6	0.6
地下水位/m	20.14	7.58	19.93	18.94	12.79

* 参照《甘肃省流域平原区地质环境监测报告(1996– 2000 年)》。

依据石羊河下游民勤盆地恢复地下水位的原则,石羊河下游民勤绿洲近期内恢复地下水位的目标就是在近期内恢复急剧下降的地下水位,使地下水位不再进一步下降,然后

表 9 民勤绿洲恢复地下水位生态环境需水量

年份	昌 宁			环 河			坝 区			泉 山			湖 区			合 计
	H _{0i}	H _{目i}	W _{地下}	H _{0i}	H _{目i}	W _{地下}	H _{0i}	H _{目i}	W _{地下}	H _{0i}	H _{目i}	W _{地下}	H _{0i}	H _{目i}	W _{地下}	W _{地下}
2000	20.14	20.94	0.54	7.58	7.88	0.09	19.93	20.28	0.40	18.94	19.54	0.34	12.8	13.39	0.37	1.74
2005	23.54	24.04	0.33	8.78	8.93	0.04	21.28	21.43	0.17	21.44	21.79	0.20	15.3	15.64	0.22	0.97
2008	24.74	24.94	0.13	9.08	9.08	0	21.58	21.58	0	22.28	22.42	0.08	16.1	16.27	0.09	0.30
2010	25.04	25.04	0	8.98	8.78	0.06	21.28	20.98	0.23	22.49	22.49	0	16.3	16.34	0	0.29
2015	24.04	23.49	0.37	6.98	6.28	0.21	18.78	17.98	0.80	21.49	20.94	0.31	15.3	14.79	0.34	2.03
2019	20.94	19.79	0.77	3.58	–	–	14.98	–	1.25	18.39	17.24	0.65	12.2	11.09	0.71	3.39

注:表中 H_{目i}表示第 i 个计算区恢复到的目标地下水位(m);H_{0i}表示第 i 个计算区地下水位埋深(m);W_{地下}表示恢复地下水位生态环境需水量(10⁸ m³)。

表 10 景观及水上娱乐生态环境需水量

城市人/ 万人	绿地生态环境需水量			河湖生态环境需水量			景观及水上娱乐 需水量/10 ⁴ m ³
	城市绿地面积/ hm ²	需水定额/ (m ³ ·hm ⁻²)	需水量/ 10 ⁴ m ³	城市绿地面积/ hm ²	需水定额/ (m ³ ·hm ⁻²)	需水量/ 10 ⁴ m ³	
4.19	16.76	4500	7.542	0.5866	24543	1.44	8.98

表 11 民勤绿洲生态环境需水量汇总

植被	河流	景观及 水上娱乐	恢复 地下 水位	湖泊、 坑塘	总计
0.8089	1.2456	0.000898	1.74	0.2793	4.0747

4 结 论

(1) 根据石羊河下游民勤绿洲实际情况,从研究区域生态环境的完整性和系统性的角度出发,同时考虑模型的可操作性,针对民勤地区生态环境现状,提出了恢复地下水位生态环境需水量计算模型,进一步建立了适合研究区域的生态环境需水量计算模型。模型计算中以年为时间尺度,有一定的水文学依据,可行性强,以期 为石羊河下游区域以及其他西北干旱区生态环境保护、水资源的合理配置提供借鉴。

(2) 依据所建立的生态环境需水量计算模型,对石羊河下游民勤绿洲生态环境需水量进行分析计算,得出 2000 年民勤绿洲生态环境需水量为 4.07×10⁸ m³,其中植被生态环境需水量为 0.808 9×10⁸ m³,河流生态环境需水量为 1.245 6×10⁸ m³,景观及水上娱乐生态环境需水量为 0.000 9×10⁸ m³,恢复地下水位生态环境需水量为 1.74×10⁸ m³,湖泊、坑塘生态环境需水量为 0.279 3×10⁸ m³。

再逐年恢复到适宜的生态地下水位。由于区域内各灌区地下水位下降速度不尽相同,所以根据实际情况使 2010 年昌宁、泉山和湖区 3 个灌区的地下水位变化量 0 m/a,以后地下水位逐渐恢复,2011– 2015 年变化量为– 0.1 m/a,2015 年后年变化量– 0.1 m/a,而环河和坝区 2008 年地下水位变化量为 0 m/a,2008– 2015 年变化量为– 0.1 m/a,2015 年后变化量为– 0.15 m/a。

根据制定的地下水位恢复的原则和目标,规划出所要恢复的地下水位。采用式(12)计算出民勤盆地恢复地下水位生态需水量,计算结果见表 9。

3.3 景观及水上娱乐生态环境需水量的计算

城市绿化面积根据《甘肃省城市规划体系规划》,对于现状年 2000 年为 4 m²/人,需水定额按照 4 500 m³/hm² 计算;河湖补水面积 2000 年为 0.14 m²/人,需水定额按照(蒸发– 降水)×10×1.5 m³/hm² 计算。石羊河下游民勤绿洲景观及水上娱乐生态环境需水量计算结果见表 11。

参考文献:

[1] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507–512.
[2] 刘凌,董增川,崔广柏,等.内陆河流生态需水量定量研究[J].湖泊科学,2002,14(1):25–30.
[3] 张丽,董增川,赵斌.干旱区天然植被生态需水量计算方法[J].水科学进展,2003,14(6):745–748.
[4] 王化齐,蔡焕杰,张鑫.石羊河下游民勤绿洲恢复地下水位生态需水量研究[J].水土保持通报,2006,26(1):44–49.
[5] 刘昌明.中国 21 世纪水供需分析.生态水利研究[J].中国水利,1999(10):18–20.
[6] 贾宝全,慈龙骏.新疆生态用水量的初步估算[J].生态学报,2002,20(2):143–150.
[7] 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J].地理学报,2000(4):495–500.
[8] 环境科学 21 世纪科技大趋势[EB/OL].南宁政务信息网,2005.
[9] 张鑫.区域生态需水量与水资源合理配置[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2004.