

黑河中游地区植被生态需水量估算

何志斌, 赵文智, 方 静

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 临泽内陆河流域综合研究站, 流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000)

摘要:以水量平衡关系为理论基础, 引用 1956~2000 年黑河中游地区各县的气象资料和 2002 年 4 月~2003 年 10 月不同类型植被区的土壤水分动态监测数据, 并采用 GIS 技术进行生态分区的基础上估算该地区的植被生态需水量, 分析生态需水量的时空变化以及缺水量。结果表明: 黑河中游地区每年最适生态需水量在 $9.48 \times 10^8 \sim 11.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间, 除去相应植被区域上的有效降水量 $4.74 \times 10^8 \text{ m}^3$, 还需要从径流中补给 $4.74 \times 10^8 \sim 6.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。除山丹和民乐县外, 其它各县的降水量均不能满足临界生态需水量。若以最适生态需水量为标准, 山丹县的缺水量最大, 占整个中游地区缺水量的 40.9%。另外, 在水资源配置方案中, 不仅要考虑空间上的差异, 而且更要注意生态需水量在时间上的变化。分析表明, 黑河中游地区的生态需水量的亏缺主要发生在 4~6 月份。

关键词: 黑河中游; 生态需水量; 植被; 土壤水分

Ecological water requirements of vegetation in the middle reaches of Heihe River

HE Zhi-Bin, ZHAO Wen-Zhi, FANG Jing (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Laboratory of Basin Hydrology and Applied Ecology, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 705~710.

Abstract: In order to reduce the environmental and ecological problems induced by water resources management and use, this paper proposes a concept of ecological water requirements (EWR). It is defined as three grades for EWR, including critical EWR, optimal EWR and saturation EWR. Critical EWR are the water regimes needed to maintain vegetation growth at a low level of risk. Optimal EWR are the water regimes needed to maintain ecological function of vegetation at a continuable level. Saturation EWR are water regimes needed to maintain maximum throughput of vegetation community. Based on the definition, the method for calculating the amount of ecological water requirements is determined, which is that according to the theory of relationship water amount balance, using meteorological data of each county from 1956 to 2000, monitoring data of soil moisture in the different vegetation areas from 2002 to 2003, and 3S technique including geographical information system (GIS), global position system (GPS) and remote sensing (RS) to calculate ecological water requirements and analyze ecological water shortage. In this study in the middle reaches of Heihe River, the water requirements is divided into three parts, including arbor forest, shrub forest and herbage community. The results of calculation show that the Critical ecological water requirements in the middle reaches of Heihe River are $5.78 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, optimal ecological water requirement is $9.48 \times 10^8 \sim 11.58 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ and saturation ecological water requirements are $30.33 \times 10^8 \sim 37.08 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, available precipitation of corresponding ecological areas is $4.74 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$. The arbor forest, shrub forest and herbage community water requirements account for 33%, 35% and 32% of the amount of total ecological water requirements, respectively. Except Shandan and Minle County, the precipitation of other counties could not provide critical ecological water requirements.

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX-SW-329); 中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX1-09); 国家自然科学基金重点基金资助项目(40235053)

收稿日期: 2004-02-26; **修订日期:** 2004-12-08

作者简介: 何志斌(1977~), 男, 宁夏固原人, 博士生, 主要从事生态水文学研究. E-mail: hzbmail@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX-SW-329); the West Action Project, Chinese Academy of Science (No. KZCX1-09) and National Natural Science Foundation of China (No. 40235053)

Received date: 2004-02-26; **Accepted date:** 2004-12-08

Biography: HE Zhi-Bin, Ph. D. candidate, mainly engaged in eco-hydrology. E-mail: hzbmail@ns.lzb.ac.cn

Furthermore, in the course of water resource adjusting, it is necessary that not only to consider spatial heterogeneity but also pay attention to season variability of ecological water requirements. This paper shows that ecological water shortages of April, May and June are the most serious in the middle reaches of Heihe River.

Key words: the middle reaches of Heihe River; ecological water requirements; vegetation; soil moisture

文章编号:1000-0933(2005)04-0705-06 中图分类号:S181 文献标识码:A

水是维持干旱区生态系统可持续发展的最重要因素,有水即为绿洲,无水即变荒漠^[1]。在水资源管理方面,生态需水问题十分重要但未引起人们足够重视的问题,尤其是在干旱内陆河流域,水资源的短缺引导人们走进了水资源利用的误区:攫取本属于天然植被和其它生命的水,人为地改变水资源的时空配置,实施不合理的再分配^[2]。目前,生态需水研究还处于起步阶段,其概念和计算方法等尚未得到统一认识。

黑河流域缺水问题日益突出,尤其是中游地区,水资源消耗量大、配置不均衡。自 20 世纪 60 年代以来,由于中游地区人口大幅度地增长,绿洲面积不断扩大,而且在水资源配置上极不合理,90% 以上的水用于发展农业,忽略了生态水的重要性。这不仅导致中游生态环境的恶化,而且使黑河进入额济纳绿洲的径流量逐年减少,正义峡断面下泄水量由 20 世纪 60 年代的 $11.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 90 年代的 $7.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,并直接导致流域终端湖泊干涸,下游天然绿洲生态环境退化加剧^[3]。科学地确定区域生态需水量已是黑河流域所面临的急需解决的关键问题。黑河流域在实施分水计划以来,已有相关研究并用于协调经济发展与生态环境保护之间的水资源配置上^[3],但在区域生态需水量等级划分、建立生态需水与区域生态系统健康之间的量化关系上还需要进一步研究。本文以水量平衡关系为理论基础,引用 2000 年 TM 影像解译资料、1956~2000 年气象资料和 2002~2003 年的土壤水分动态观测数据,通过 GIS 技术和统计方法,计算了黑河中游各县、市的生态需水量,为水资源合理配置提供科学依据。

1 研究方法

1.1 生态需水概念

生态需水研究是近几年才受到人们所关注,Covich 强调了在水资源管理中要保证恢复和维持生态系统健康发展的水量^[4]。Cleick 明确给出基本生态需水(basic ecological water requirement)的概念框架,即提供一定质量和一定数量的水给天然生境,以求最小化地改变天然生态系统的过程,并保护物种多样性和生态整合性^[5]。但是,目前生态需水量的概念仍然没有得到统一,而且提法也多样化,在有些文献中被称为生态用水量、生态环境用水量、生态环境耗水量^[1,6~8]。刘昌明对这些概念进行了比较分析,并指出生态需水量(D_d)、生态用水量(D_s)和生态耗水量(D_c)之间的量化关系,即 $D_d > D_s \geq D_c$ ^[9]。另外,河流系统的输沙需水量也属于生态需水量的范畴^[10,11]。张远和杨志峰提出林地生态需水量的概念,即林地生态系统为维护自身生长、发挥生态功能所需要消耗和占用的水资源量,包括林地蒸散量和土壤含水量两种形式^[12]。本文认为,干旱区生态需水量也存在这两种形式,为了便于流域水资源管理,还必须明确生态需水的等级概念,如赵文智提出干旱区植物生态需水量可划分为临界生态需水量、最适生态需水量和饱和生态需水量,临界生态需水量指维持干旱区植物生存的最小耗水量;最适生态需水量指干旱区植物具有正常的功能特别是防护功能的耗水量;饱和生态需水量指干旱区光温生产潜力得以最大发挥时的植物耗水量^[13]。

1.2 生态需水计算方法

干旱区生态系统作为植被-土壤综合系统,在无人为干扰的情况下,水量平衡关系可表示为:

$$W_{t+1} = W_t + P - R - ET \quad (1)$$

式中, W_{t+1} 为 t 时段末期土壤含水量(mm); W_t 为 t 时段初期土壤含水量(mm); P 为该时段降水量(mm); R 为该时段的径流量(mm),在干旱绿洲区包括径流和人工灌溉,即 $R = R_1 - R_2$, R_1 为地表径流和地下径流量, R_2 为人工灌溉量;为该时段蒸散量(mm),包括植被蒸腾和土壤蒸发。本文在计算上采用了杨志峰等^[14]对林地生态需水量的计算方法,即区域生态需水量(EWQ)的计算公式如下:

$$SWC = W_q \times A \times H \quad (2)$$

$$ET_j = (ET_q)_j \times A / 1000 \quad (3)$$

$$ETQ_j = SWC + ET_j \quad (4)$$

$$EWQ = SWC + \sum_{j=1}^{12} ET_j \quad (5)$$

式中, SWC 为植被区土壤含水量(m^3); W_q 为植被区土壤含水定额($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); A 为植被区域面积(m^2); H 为土壤深度(m); ET_j 为第 j 月植被区蒸散量(m^3); $(ET_q)_j$ 为第 j 月的植被区蒸散定额(mm); EWQ_j 为第 j 月生态需水量(m^3); EWQ 为植被区年生态需水量(m^3)。

1.2.1 植被区土壤含水量(SWC)计算 不同类型植被面积 A 采用 2000 年 TM 影像解译数据,土壤深度 H 取 1.5m(植物根系主要分布区)。土壤含水定额 W_s 的确定是根据生态需水量的等级概念和植被生长现状所能发挥的生态功能为标准,在临泽县选择不同植被区和相同的植被不同的生长状况进行土壤水分动态监测。不同植被区主要包括乔、灌、草 3 种,而相同植被不同生长状况的土壤水分动态监测,如杨树林地,绿洲农田林网每年灌水 7~8 次,使杨树能够发挥最大的生长潜能,因此该区域的杨树耗水量定为饱和生态需水量;绿洲边缘的杨树防护林每年灌水 3~4 次,使杨树能够发挥其可持续的防护功能,确定该类杨树的耗水量为最适生态需水量;分布在绿洲前缘阻沙林带上的杨树仅靠降水和绿洲水分侧渗来维持其生存,它的防护功能很低,与灌木相结合才有一定的作用,因此以该类杨树的耗水量为临界生态需水量。其它植被区也有相同的生态需水等级划分。土壤水分监测时间是 2002 年 4 月~2003 年的 10 月,在此期间,每月定期测定土壤含水量,测定深度为 180cm(在河滩地测定深度较浅,因为地下水埋深在 150cm 左右),每 20cm 取一个土样,3 个重复,用烘干(105℃)称重法测其含水量(表 1)。

表 1 不同植被类型区土壤含水量

Table 1 Soil moisture content in the different areas of vegetation				
生态需水等级 Grade of ecological water requirement	植被类型 Vegetation type	样地数 Number of sample	4~10 月份平均土壤含水量 Average soil moisture from April to October	土壤水分测定区域的 植被属性描述 Depiction of sampling plots
临界 Critical	草地 Grassland	3	1.86±0.23	绿洲边缘的荒漠戈壁植被、泡泡刺沙包和沙丘柽柳
	灌木林 Shrub forest	3	1.94±0.31	梭梭林、花棒和柠条(生长在绿洲边缘的沙丘上)
	乔木林 Arbor forest	3	2.32±0.52	绿洲内林场的杨树林(仅靠降水和地下水补给生存)
最适 Optimal	草地 Grassland	4	2.79±0.42	沙地芦苇、丘间草地(已固定 10a 以上的沙丘地)
	灌木林 Shrub forest	4	3.23±0.61	梭梭林、柽柳林和沙柳林(绿洲内固定沙丘及丘间地上)
	乔木林 Arbor forest	4	5.60±0.89	绿洲防护林,主要有杨树、沙枣(每年灌水 3~4 次)
饱和 Saturation	草地 Grassland	3	8.62±0.76	骆驼刺、沙蒿+芦苇、苦豆子、黑果枸杞(绿洲内)
	灌木林 Shrub forest	3	13.21±1.12	柽柳+沙柳(靠近河道的滩地上)
	乔木林 Arbor forest	3	18.15±2.42	农田防护林(灌水在 7 次以上)

1.2.2 植被区蒸散定额 ET_a 的确定 Penman 认为,在水分供应不足条件下,实际蒸散量与潜在蒸散量成正比^[15],即:

$$ET_a = \beta \times ET_p \tag{6}$$

式中, ET_a 为实际蒸散量(mm); ET_p 为潜在蒸散量(mm); β 为蒸发比系数,其中 $\beta \approx w/w_k$, w 为土壤实际含水量(mm), w_k 为临界土壤含水量(mm),其值大约为田间持水量的 70%~80%^[16],本文取田间持水量的 70%(表 2)。黑河中游各县市的潜在蒸散量通过各县 1956~2000 年的气象数据获得。

表 2 黑河中游地区的蒸发比系数

Table 2 The coefficient of evaporation in the middle reaches of Heihe River

生态需水量等级 Grade of ecological water requirement	蒸发比系数 Coefficient of evaporation(β)		
	乔木林地 Arbor forest	灌木林地 Shrub forest	草地 Grassland
临界 Critical	0.1162	0.0971	0.0978
最适 Optimal	0.2940	0.1617	0.1463
饱和 Saturation	0.7563	0.6615	0.4317

1.3 研究区概况

研究区选在黑河中游地区(图 1),包括临泽县、高台县、甘州区、山丹县、民乐县、酒泉市和金塔县,总面积约为 $3.98 \times 10^4 \text{ km}^2$,该地区景观类型主要由绿洲和荒漠组成。近年来,绿洲经济快速发展,绿洲面积也有扩大趋势,在有限的水资源分配过程中,过分追求水资源的经济效益,而忽视其生态环境效益。使该地区生态环境不断恶化,导致植被衰退、沙漠化加剧等生态环境问题。另外,降水在时间和空间上分配不均,年内与年际降水量变化大等因素给水资源管理带来更大的困难。除民乐县(年平均降水量 357.2mm)外,其它各县均不超过 200mm,酒泉和金塔

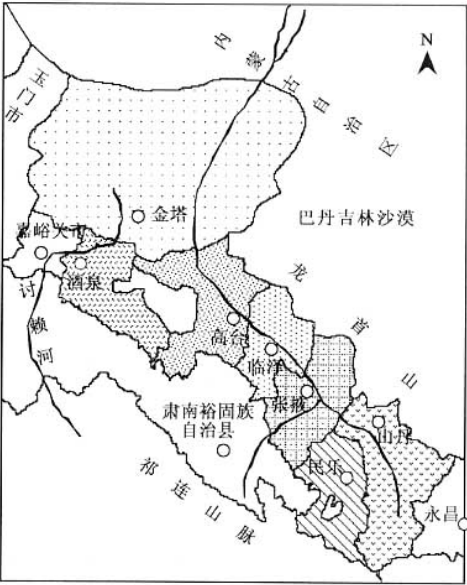


图 1 研究区示意图

Fig.1 The map of study area

更少,分别为 85.5mm 和 61.7mm,而且主要集中在 7、8、9 三个月份,占全年降水量的 60%以上。

2 结果分析

2.1 研究区植被生态需水量计算

利用 2000 年 TM 影像和 GIS 技术对研究区进行生态分区(表 3),林地划分为有林地、灌木林和疏林地;草地分为高、中、低覆盖度草地,一般高盖度草地分布在绿洲内部,中盖度草地分布在绿洲边缘,这两种草地对绿洲生态安全起到了保护作用,因此,在生态需水量计算过程中只计算这两种草地;农田防护林面积是通过县一级的林业统计资料获得的农田面积与防护林面积的比例所确定的。根据表 1、表 2 的数据资料,其中气象数据采用 1956~2000 年的地面气候资料,然后按(2)式~(5)式计算黑河中游各县的生态需水量,其结果如表 4。由表 4 可见,黑河中游地区每年临界生态需水量为 $5.78\times 10^8\text{ m}^3$,最适生态需水量在 $9.48\times 10^8\sim 11.58\times 10^8\text{ m}^3$ 之间,饱和需水量在 $30.33\times 10^8\sim 37.08\times 10^8\text{ m}^3$ 之间。其中蒸散消耗量占 86%以上,土壤含水量仅占 14%。按植被类型来分,乔木林生态需水量占 33%,灌木林占 35%,草地占 32%。由于各县的绿洲面积不一致,其生态需水也存在较大的差异(表 4),山丹和民乐县的生态需水量较大,约占整个中游地区的 70%。

表 3 黑河中游各县生态分区($\times 10^6\text{ m}^2$)

Table 3 Ecological zoning of each county in the middle reaches of Heihe River ($\times 10^6\text{ m}^2$)							
植被类型 Vegetation type	临泽县 Linze	高台县 Gaotai	甘州区 Ganzhou	山丹县 Shandan	民乐县 Minle	酒泉市 Jiuquan	金塔县 Jinta
乔木林地 Arbor forest	3.25	17.92	12.34	424.09	478.83	2.84	46.76
灌木林地 Shrub forest	77.50	50.51	149.52	125.26	167.70	103.64	52.96
草地 Grassland	15.59	62.73	105.92	413.94	409.72	14.38	11.64

表 4 黑河中游各县植被生态需水量($\times 10^8\text{ m}^3$)

Table 4 Ecological water requirement of each county in the middle reaches of Heihe River ($\times 10^8\text{ m}^3$)							
生态需水等级 Grade of ecological water requirement	临泽县 Linze	高台县 Gaotai	甘州区 Ganzhou	山丹县 Shandan	民乐县 Minle	酒泉市 Jiuquan	金塔县 Jinta
临界 Critical	0.26	0.29	0.67	2.50	2.05	0.32	0.33
最适 Optimal	0.56~0.69	0.52~0.63	1.29~1.57	3.89~4.74	3.24~3.96	0.69~0.85	0.62~0.77
饱和 Saturation	1.50~1.84	1.49~1.83	3.54~4.33	12.98~15.87	10.82~13.22	1.84~2.25	1.92~2.35

2.2 研究区生态缺水分析

黑河中游地区用水主要来源于降水和径流。根据各县降水资料统计表明,黑河中游相应的植被区域上平均每年能获得总降水量为 $6.40\times 10^8\text{ m}^3$,其中 $\geq 3\text{ mm}$ 的有效降水量为 74%,以此数据为基础,中游地区临界植被生态需水量每年需从径流量中补给 $1.04\times 10^8\text{ m}^3$,最适需水量需补给 $4.74\times 10^8\sim 6.84\times 10^8\text{ m}^3$,饱和需水量需补给 $25.59\times 10^8\sim 32.34\times 10^8\text{ m}^3$ 。但是降水和蒸散在空间上和时间内都存在较大的变异,因此,针对不同的地区、不同的时间给以适量的水分补给才能达到保护生态、使其健康发展的目的。由图 2 可见,黑河中游各县的植被生态需水量峰值出现在 4~6 月份,而降水量峰值出现在 7~8 月份,因此,在水资源配置过程中,应注意 4~6 月份生态需水量的补给。另外,民乐县的降水量较大,尤其是在 5~9 月份(图 2e),降水量超过了最适生态需水量,植被仅靠降水就能维持。为了达到可持续发展以及生态安全的目的,水资源配置以最适生态需水量为标准,除民乐县外,其它各县在各个月份都需要补给生态水,临泽县每年需要补给 $0.48\sim 0.61\times 10^8\text{ m}^3$,占中游总补给量的 9.2%;高台县需补给 $0.43\sim 0.53\times 10^8\text{ m}^3$,占总量的 7.5%;甘州区需补给 $1.04\sim 1.32\times 10^8\text{ m}^3$,占总量的 19.1%;山丹县需补给 $2.51\sim 3.36\times 10^8\text{ m}^3$,占总量的 40.9%;酒泉市需补给 $0.62\sim 0.78\times 10^8\text{ m}^3$,占总量的 11.9%;金塔县需补给 $0.57\sim 0.72\times 10^8\text{ m}^3$,占总量的 11.5%。

3 结果与讨论

(1)黑河中游地区是以人工绿洲为主体的生态系统,其平均每年最适植被生态需水量为 $9.48\times 10^8\sim 11.58\times 10^8\text{ m}^3$,该值只包括绿洲内和绿洲边缘的天然植被、人工防护林体系的生态需水量。对绿洲内的经济林、牧草和远离绿洲的天然植被的需水量并未计算在内,因为经济林和牧草虽然需要大量的补给水,而且对绿洲生态安全也起到一定维护作用,但它们都是以经济收入为主要目的,与农业生产的性质是一致的,而远离绿洲的天然植被对维护绿洲生态安全的作用很小,因此,这部分需水量也不计入生态需水范围内。另外,在忽略降水的空间异质性的情况下,相应植被区域上平均每年能获得有效降水量为 $4.74\times 10^8\text{ m}^3$,如果以最适生态需水量为标准,中游地区每年需从径流中补给 $4.74\times 10^8\sim 6.84\times 10^8\text{ m}^3$ 。

(2)在流域水资源配置过程中,不仅要考虑整个流域生态可持续发展,而且在具体管理措施上要根据各县的实际情况来进行水资源合理配置。因为黑河中游地区各县的降水量、蒸发量、绿洲面积以及植被类型都存在明显的空间差异,以致使各县的生

态需水量和缺水量也存在明显的空间差异。如民乐县位于中游地区的东南端,其降水量达到 360mm,能够满足最适生态需水等级的要求,而山丹县的植被面积较大,降水量相对较低,因此生态缺水量最大。而甘州区、临泽、高台、酒泉和金塔各县的降水量相差不大,其生态需水量主要以植被面积大小而不同。此外,生态需水量和缺水量不仅存在空间差异,而且在不同时间也存在显著的异质性。从图 2 可以看出,除民乐县外,其它各县的各个月份均需要补给生态水。一般规律为 1 月份到 4 月份缺水量逐渐上升,4~6 月份缺水量达到最大,6 月份到 12 月份又逐渐减小。该变化趋势与降水量变化一致,但峰值出现的时间不同,该区域的降水主要集中在 7~9 月份。在维持各个绿洲面积不再扩大的情况下,各县的生态需水量基本不变,而降水量在年上和年际间会有较大的变异,这就预示着水资源配置需要随降水量的变化做出相应的对策。

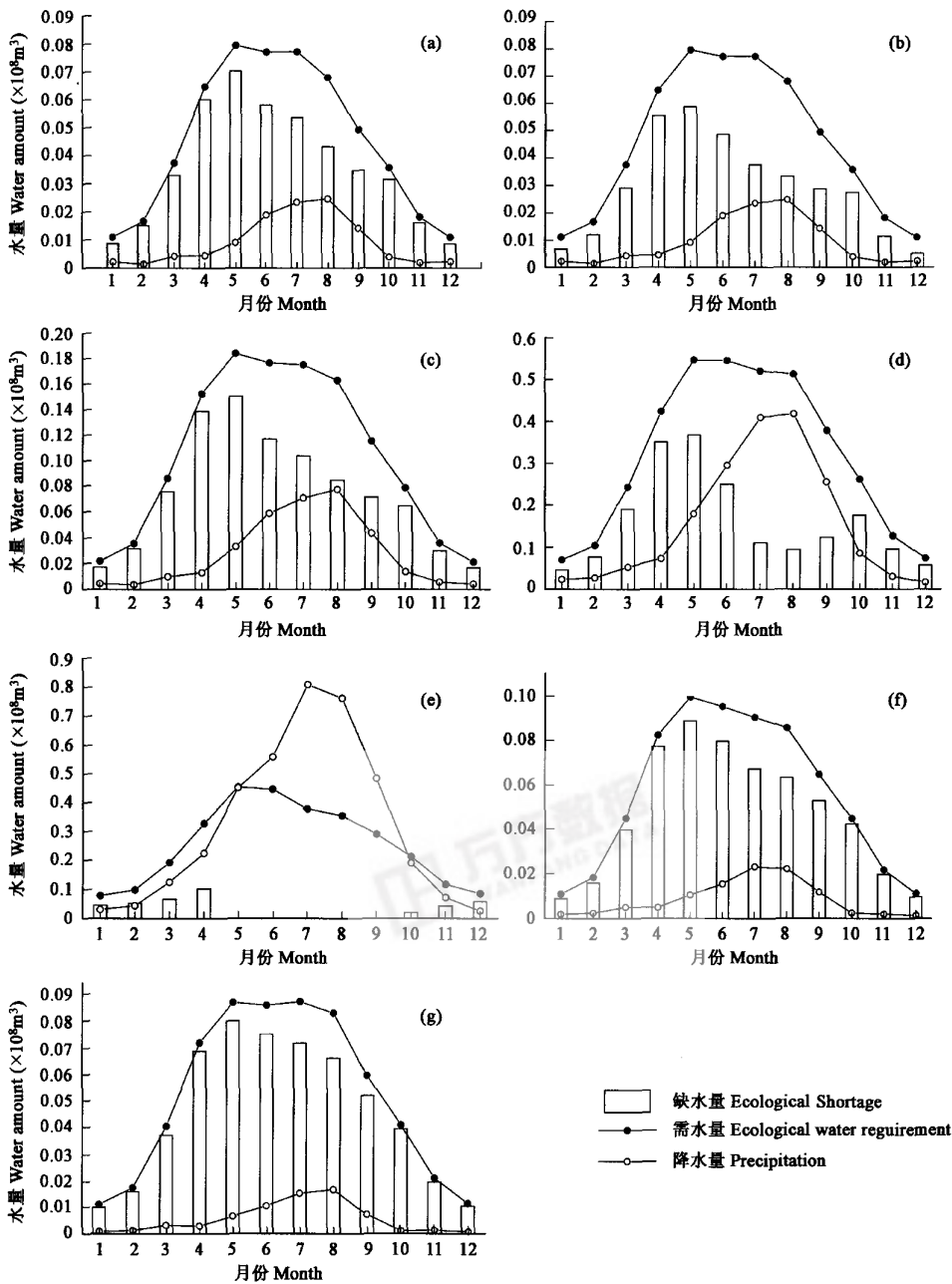


图 2 黑河中游各县在最适生态需水等级下的需水量、缺水量和降水量

Fig. 2 Ecological water requirements, shortage and precipitation of every county of middle reaches of Heihe River in the grade of optimal ecological water requirements

(a)临泽县 Linze; (b)高台县 Gaotai; (c)甘州区 Ganzhou; (d)山丹县 Shandan; (e)民乐县 Minle; (f)酒泉市 Jiuquan; (g)金塔县 Jinta

(3)本文以水量平衡关系为理论基础,引用土壤水分动态监测数据和气象数据能够较准确地计算干旱区植被生态需水量,而且反映出生态需水量的季节变化规律,为水资源配置提供了可靠的量化信息。但是由于土壤水分监测数据的局限性,因此,对各县的实际生态耗水量计算还需要补充土壤水分数据,并且在尺度转换上需深入研究。

References:

- [1] Jia B Q, Xu Y Q. The conception of the eco-environmental water demand and its classification in arid land——taking Xinjiang as an example. *Arid Land Geography*, 1998, **21**(2): 8~12.
- [2] Zhang S T, Yang L, Chen G P. Definition of ecological water and its application tactics in Northwest Arid Area. *Arid Land Geography*, 2001, **24**(3): 277~282.
- [3] Wang G X, Cheng G D. Water demand of ecosystem and estimate method in arid inland river basins. *Journal of Desert Research*, 2002, **24**(2): 129~134.
- [4] Covich A. Water and ecosystems Cleick P H. *Water in crisis——A guide to the world's fresh water resources*. New York: Oxford University Press, 1993. 40~55.
- [5] Cleick P H. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1996, **8**(3): 571~579.
- [6] Xia J, Zheng D Y, Liu Q G. Study on evaluation of eco-water demand in Northwest China. *Hydrology*, 2002, **22**(5): 12~17.
- [7] Zuo Q T. Study on vegetation ecological use of water resources in arid and semiarid region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(3): 114~117.
- [8] Chen L H, Wang L X. Classification of ecological water use and quota determination of ecological water use of forest cover in Beijing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2001, **8**(4): 161~164.
- [9] Liu C M. The conception and importance of ecological water requirements. *Impact of Science on Society*, 2002, **2**: 25~29.
- [10] Shi W, Wang G Q. Estimation of ecological water requirement for the lower Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(5): 595~602.
- [11] Li L J, Zheng H X. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe Basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(4): 495~500.
- [12] Zhang Y Yang Z F. Calculation method of ecological water requirement for forestland and its application to Huang-Huai-Hai Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(2): 1566~1570.
- [13] Zhao W Z, Cheng G D. Review of several problems on the study of eco-hydrological processes in arid zones. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(22): 1851~1857.
- [14] Yang Z F, Cui B S, Liu J L, et al. *The theory, method and practice of eco-environment water demand*. Beijing: Science Press, 2003. 67~72.
- [15] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. A*, 1948, **193**: 454~465.
- [16] Milly P C D. Potential evaporation and soil moisture in general circulation models. *Journal of Climate*, 1992, **5**(3): 209~226.

参考文献:

- [1] 贾宝全,许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类——以新疆为例. 干旱区地理, 1998, **21**(2): 8~12.
- [2] 张思玉,杨辽,陈戈萍. 生态用水的概念界定及其在西北干旱区实施的策略. 干旱区地理, 2001, **24**(3): 277~282.
- [3] 王根绪,程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, **24**(2): 129~134.
- [6] 夏军,郑冬燕,刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题讨论. 水文, 2002, **22**(5): 12~17.
- [7] 左其享. 干旱半干地区植被生态用水计算. 水土保持学报, 2002, **16**(3): 114~117.
- [8] 陈丽华,王礼先. 北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定. 水土保持研究, 2001, **8**(4): 161~164.
- [9] 刘昌明. 关于生态需水量的概念和重要性. 科学对社会的影响, 2002, **2**: 25~29.
- [10] 石伟,王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算. 地理学报, 2002, **57**(5): 595~602.
- [11] 李丽娟,郑红新. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报, 2000, **55**(4): 495~500.
- [12] 张远,杨志峰. 林地生态需水量计算方法与应用. 应用生态学报, 2002, **13**(2): 1566~1570.
- [13] 赵文智,程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 2001, **46**(22): 1851~1857.
- [14] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等. 生态环境需水量——理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003. 67~72.