

干旱内陆流域河道外生态需水量评价

——以黑河流域为例

王根绪^{1,2}, 张 钰^{1,2}, 刘桂民¹, 程雨菲², 胡宏昌²

(1. 中国科学院旱区寒区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:河道外生态系统需水量的合理评价是干旱区水资源合理配置与管理、生态环境保护与建设中最关键的科学问题。基于不同植被蒸散发潜力估算模型,依据不同生态系统及同一生态系统在不同气候与地理区域具有不同生态需水规律的特点,提出了可模拟和评价不同时期生态系统需水量的方法,不仅能体现生态系统需水量的年际变化,也能反映年内不同时间段(月、季节甚至每日)的需水量变化,并提出干旱区生态适宜需水量在不同时期是一个区间。以黑河流域中下游地区为研究区域分析其生态需水量,结果表明:黑河中游地区年平均生态需水量 $(11.16 \pm 2.67) \times 10^8 \text{ m}^3$,其中绿洲生态系统需水 $(9.13 \pm 2.29) \times 10^8 \text{ m}^3$;下游地区生态需水量 $(16.16 \pm 4.04) \times 10^8 \text{ m}^3$,现状绿洲生态体系需水 $(11.06 \pm 2.77) \times 10^8 \text{ m}^3$,现阶段实施的下游分水 9.7 亿 $\text{m}^3/\text{年}$ 的方案,可以促使现有绿洲生态系统有一个良好的结构与功能,并给出了不同典型年不同月份的生态需水量及其变化。

关键词:生态需水量;蒸散发潜力;评价模型;黑河流域

文章编号:1000-0933(2005)10-2467-10 中图分类号:Q148,X143 文献标识码:A

Water demand evaluation of riverside ecosystem in arid inland river basin: the case of Heihe River Basin

WANG Gen-Xu^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, LIU Gui-Min¹, CHENG Yu-Fei², HU Hong-Chang² (1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000 China*; 2. *College of Resources & Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000 China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2467~2476.

Abstract: Rational evaluation of water demand of the riverside ecosystem is a key scientific problem in the reasonable allocation and management and the eco-environmental protection in arid regions of northwest China. Based on the evaluation model of evapotranspiration potentials of different vegetation types and the water demand laws of different and similar ecosystems in different climatic and geographic zones, a method used for modeling and evaluation of water demands of different ecosystems was put forward. The results showed that this method not only reveal the interannual variations of water demands of different ecosystems but also reflect the variation processes of their water demands at different time intervals (month and season or day). The optimal ecological water demand of an ecosystem in different periods in the arid region varied in a certain range. With the mid and downstream reaches of the Heihe River as the study area, it has been obtained the analytical results of ecological water demand as follows: mean annual ecological water demand in the midstream region of the Heihe River is $911.16 \pm 2.67 \times 10^8 \text{ m}^3$; ecological water demand of oases ecosystem is $(9.13 \pm 2.29) \times 10^8 \text{ m}^3$; ecological water demand in the downstream region is $(16.16 \pm 4.04) \times 10^8 \text{ m}^3$; but the water demand of oasis ecosystem at present time is $(11.06 \pm 2.77) \times 10^8 \text{ m}^3$. In addition, the ecological water demand and their variation processes in different months in different typical years are

基金项目:中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX01-09-04);国家自然科学基金面上资助项目(40171002)

收稿日期:2004-05-10; **修订日期:**2005-04-02

作者简介:王根绪(1965~)男,甘肃天水人,博士,研究员,主要从事寒旱区现代环境过程、生态水文学与景观生态学研究. E-mail: gxwang@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX01-09-04) and National Natural Science Foundation of China (No. 40171002)

Received date: 2004-05-10; **Accepted date:** 2005-04-02

Biography: WANG Gen-Xu, Ph. D. Research professor, mainly engaged in modern environmental processes of cold and arid region, eco-hydrology and landscape ecology. E-mail: gxwang@ns.lzb.ac.cn

given out.

Key words: ecological water demand; potential evapotranspiration; evaluation model; Heihe River Basin

西北干旱区生态环境用水与国民经济用水矛盾突出,由于不合理的水资源开发利用而引发的生态环境问题极为严重且复杂多样,不仅严重制约了本区域的可持续发展,而且其影响波及全国以及整个国民经济在 21 世纪的稳定发展。因此从水资源合理配置、土地资源利用、生态环境保护以及经济合理布局等诸多方面的要求出发,迫切需要解决流域乃至区域内生态需水量的界定问题^[1,2]。系统开展干旱区生态需水问题是从 20 世纪 90 年代开始的,确切地讲始于国家九五攻关计划关于西北水资源合理利用研究时期,从那时起,不同学者即对干旱区生态需水量的概念、内涵以及分析方法提出了不同观点,并据各自的理解用不同的方法计算得出了一些地区的生态需水量计算结果^[3~5]。2002~2003 年间,由钱正英主持开展了中国工程院重大咨询项目“西北地区水资源配置、生态环境建设和可持续发展战略研究”,对整个西北地区的生态需水量进行了系统评价,给出了宏观尺度上不同地区的现状生态需水量^[6]。

现阶段,利用以干旱区典型植物(以旱生灌木为主)为对象进行的个体或群丛水分耗散机理观测实验结果,分析干旱区生态需水量^[6],不仅存在尺度以及空间异质性的问题,而且也不能代表实际存在的各种生态系统对水资源的不同需求特性;区域水均衡法将区域水资源消耗项中扣除水域蒸散、境外排泄和人类利用等量的剩余部分全部归结为生态消耗量^[7],由于区域水资源消耗项很难准确定量,并且很多情况下无法明确区别其他水消耗项与生态系统水资源消耗,该方法存在明显缺陷;基于遥感数据分析较大区域生态系统的水分需求是目前最为活跃的生态需水量研究途径^[7~9],然而生态系统需水量评价对象难以准确判定,同时生态水文要素诸多参数获取困难,限制了这一方法的有效应用,而且其计算对区域生态需水量只能给出一个定值,既不符合生态系统对水分需求的动态性,也不能满足水文过程的动态变化特性。从区域水资源规划和合理配置的实际需要,以及区域生态环境保护与区域生态安全应以生态系统安全为基本单元的客观角度,需要在流域或区域尺度上寻求基于生态系统水资源利用规律、符合水资源动态变化并能反映生态需水变化过程的简单易行的生态需水量评价方法。本文以黑河流域为例,提出一种干旱内陆流域生态需水量评价的尝试途径。

1 研究思路与方法

干旱区生态需水量,应指流域一定时期内存在的天然绿洲、河道内生态体系(河岸植被,河道水生态及河流水质)以及人工绿洲内防护植被体系等维持其正常生存与繁衍所需要的水量^[3~5]。其中河道内生态需水量是维系河流生态环境平衡的最小水量,主要从实现河流的功能方面考虑为维持河道内生物及其生境的基本生态环境需水量和汛期河流的输沙用水量^[4],在干旱内陆流域这方面的问题不突出,并常以分水协议方式确定上中下游河道输送水量,因此本文仅针对河道外生态需水量进行评价。

1.1 基本思路

干旱内陆流域在人类活动的长期影响下形成了丰富多样的生态系统,不同生态系统具有不同的水分消耗行为,干旱区植物具有适应干旱环境与水分条件的特殊生态功能与生理机制。植被生态系统的水分消耗主要是满足其生长期内的蒸散发,因此与生态类型、生态系统的结构及其特征(如覆盖度、郁闭度等)关系密切,同时还与所处气候、水文及土壤条件有关。对于特定的干旱区生态系统类型和结构,不同时期的气候和土壤水分条件决定了该时期的蒸散发量,这就为利用气候要素的动态变化过程分析生态系统的需水过程提供了可能途径。

基于上述考虑,提出如下生态需水量评价思路:划分并归纳研究区域内具有生态需水量评价意义的生态系统类型,确定不同类型生态系统的蒸散发潜力 ET_0 ;选择不同水文典型代表年型,区分不同气候与地理区间,计算不同生态系统在不同水文年型的月尺度蒸散发量 ET 值;分析不同水文年型对应的不同生态系统在不同生长期间的有效降水量 Pe 值;最后根据 ET 与 Pe 的差值,建立生态需水量评价模型,评价不同生态类型的需水过程和合理的水量需求区间。

1.2 研究方法

1.2.1 不同生态系统蒸散发潜力 ET_0 的计算 陆地植被生态系统水分消耗主要是满足其生长期内的蒸散发,目前估算植被蒸散发的手段主要采用计算植被参考作物蒸散发潜力(ET_0)的方法^[10,11],对于不同植被和覆盖状况,现阶段应用较为广泛且效果被众多研究证实有效的主要计算方法有:(1)Penman-Monteith 方程,是假设在被高度一致的低矮植被(草原)完全覆盖并充分供水的条件下,从下垫面运移到空气中的水分总量,该方法对于覆盖度较高,水分条件相对充足的草地蒸散发潜力估算,具有稳定性好,精度高等特点,是 FAO 推荐的计算参考作物蒸散发潜力的首选方法^[11];(2)Priestly-Taylor 方程,是现行方法中相对最为简化的一种估算手段,Flint 和 Fisher 等先后利用该方法估算郁闭度较高的森林区域的蒸散发潜力^[12,13],发现效果要优于 Penman-Monteith 方程;(3)Shuttleworth-Wallace 方程,由 Shuttleworth 和 Wallace 于 1985 年提出,是专门针对较低覆盖度植被蒸散发潜力估算的方法,Federer 等人对比研究以后认为该方程对于全球尺度的陆面蒸散发估算效果最好^[14]。该方程由两部分组成,模拟土壤蒸发和模拟植被蒸腾,分别可以由 Penman-Monteith 方程获得。该方法对于分析覆盖度较低的荒漠生态系统

较为适合,但所需参数很多,一些参数在目前黑河流域尚难获得,为此,利用其构成中利用土壤蒸散修正 Penman-Monteith 方程的原理,直接引入土壤蒸散系数对 Penman-Monteith 方程修正后代替,土壤蒸散系数由当地试验结果确定。

不同植被类型及其分布的不同气候条件下应具有不同的蒸散发潜力,因此需要对不同的生态类型选择相应的比较适宜的蒸散发计算方法。鉴于上述 3 种方法各自的特点和国内外对不同公式应用的效果和经验,本次研究确定不同类型生态系统的 ET_0 值计算方法如下:

(i)森林生态系统,包括中游人工林地和下游具较好林分条件的河岸林带。选择以植被冠层为主要对象,适宜于郁闭度较高的森林植被蒸散发计算的 Priestly-Taylor 方程;

(ii)草地生态系统,包括下游的灌草地、盐化草甸以及中游的沼泽草甸、高覆盖山地草原和人工草地等。选择计算精度高并十分稳定的适宜于计算高覆盖草地蒸散发的 Penman-Monteith 方程;

(iii)荒漠生态系统:包括大部分荒漠草原、退化的灌草地以及郁闭度较低的疏林地和林分条件很差的退化荒漠林地等。采用较多考虑土壤蒸散发作用的适于计算覆盖度较低的荒漠生态系统蒸散发的简化 Shuttleworth-Wallace 方程。

1.2.2 修正蒸散发量 ET 值计算 利用上述方法计算不同生态系统地在不同时段潜在蒸散发量,由于各个方程所建立的具体或假设条件跟研究区有所不同甚至差异较大,需根据植物类型、植物特性和当地土壤水分条件进行修正。干旱区的植物具有适应水分胁迫的特殊生理机制,对干旱环境具有极强的耐受性,从干旱区水资源极度匮乏的现状出发,在计算生态需水量的过程中必须要考虑到植被的耐旱特性。干旱区土壤水分条件差,对其进行修正尤为重要;土壤水分含量将直接控制植被的蒸腾量,因此这里仅针对土壤水分进行修正。关于 Penman-Monteith 方程的土壤水分修正,Fisher 建议直接在方程中引入系数(取值在 0.7~0.9),但在干旱区,用经验公式进行确定更为合理,土壤水分修正系数 K_a 的经验公式为^[18]:

$$K_a = 0, \theta \leq \theta_z; \quad K_a = \frac{\theta - \theta_z}{\theta_c - \theta_z}, \quad \theta_z < \theta < \theta_c; \quad K_a = 1, \theta \geq \theta_c$$

(1)

式中, θ 为根土层土壤平均含水量(cm^3/cm^3); θ_c 为临界含水量,一般取为田间持水量的 70%; θ_z 为萎蔫点含水量,即凋萎系数。经土壤水分修正后,并换算为月时间尺度的蒸散发量 ET :

$$ET = K_a ET_0$$

(2)

1.2.3 生态系统需水量评价 提出区域生态系统需水量评价计算公式如下:

$$Q_{et} = \sum_{i=1}^m (ET_{it} - Pe_{it}) \times A_i \times 10^3$$

(3)

式中, Q_{et} 就是任意时段 t 区域的生态需水量(m^3); ET_{it}, Pe_{it} 分别代表第 i 类生态系统在 t 时段的潜在蒸散发量(mm)和对应有效降水量(mm); A_i 为第 i 类生态系统的区域分布面积(km^2); m 是研究区域生态系统类型数。

2 研究区域生态系统划分与数据来源

2.1 研究区域范围与生态系统类型划分

本文研究选区黑河流域中游和下游为典型区域,气候分带上属中温带甘-蒙气候区,根据干燥度,可进一步分为中游河西走廊温带干旱亚区及下游阿拉善荒漠干旱亚区和额济纳荒漠极端干旱亚区,气候干燥,降水稀少而集中。其中中游地区涉及面积 5.56 万 km^2 ,平均多年降水量不足 200mm;下游地区主要属于内蒙古额济纳旗行政区域,研究涉及范围面积 6.15 km^2 ,多年平均降水量仅 41 mm。

黑河流域中下游地区的河道外生态系统分为天然生态系统和人工生态系统两大类^[10,11]。其中天然生态系统类型主要有:天然林地生态系统,包括天然有林地、灌丛、疏林以及荒漠河岸与河泛地林灌系统;天然草地生态系统,可进一步分为浅山区干草原、河泛地及湖滩灌丛低湿草甸、盐化灌丛、杂类草草地等;河湖生态系统,包括河道、湖泊生态等;荒漠生态系统,包括荒漠草原、戈壁、沙漠以及覆盖度不足 3%的裸岩和裸土地;其中中游地区天然林地生态系统基本全部分布在山区,不在本次计算的范围内。从生态需水评价角度,排除中游山地森林生态和山地草地生态以及河湖生态系统,天然生态系统就有天然绿洲生态系统和荒漠生态系统两部分组成,其构成与分类如表 1^[11]。

人工绿洲生态系统是中游地区的核心。从生态需水量计算角度,人工生态系统需水包括人工绿洲系统用水、供水系统和城镇园林绿地耗水。人工绿洲系统由农田和农田防护林体系组成,其中农田属于国民经济需水领域,不在生态需水分析的范畴;农田防护林体系包括 3 部分:一是分布于农田内部的护田林网,二是绿洲外围防风固沙乔灌木林带,三是绿洲边缘和内部封滩固沙乔灌木林片,也称为“网-带-片”组合体系;城镇园林绿地是城镇环境中重要的生态系统,现阶段该系统用水作为城镇工业与生活用水的一部分,一般不纳入生态需水量的范畴。此外,人工绿洲的供水系统作为绿洲生命的支撑体系,是绿洲不可或缺的组成部分,同时渠系防护林带又是农田防护林体系的重要组成成分,因此该系统需水必然包括在人工绿洲生态需水范畴。综上所述,给出区域生态需水量的分类系统如表 1 所示。

表 1 黑河流域生态需水分类

Table 1 The classification of ecological water requirement in the Heihe River basin		
生态需水类型 Type of ecological water demand	主要组成成分 Main composition	生态需水计算归类 Calculation classification of ecological water demand
人工生态系统 Artificial ecosystem	人工绿洲生态需水系统 System of ecological water demand in man-made oases	护田林网 Farmland protective forest network
		防风固沙灌草带 Sand-binding shrub-grass belt
		封滩固沙乔灌林片 Fenced sand-binding tree-shrub patch
		果园、其他林地 Fruit garden and other forest land
	绿洲供水系统 Water supply system of oases	渠系、水库、渠系防护林 Canal, reservoir, canal protective forest
自然生态系统 Natural ecosystem	城镇园林绿地 Garden and green land in cities	公共绿地、园林、风景区 Public Greenland, garden, scenic spots
	天然绿洲生态需水系统 System of ecology water demand in natural oases	荒漠河岸林 Desert riparian forest
		河泛地及湖滩灌丛低湿草甸 Flooded land, lake beach shrub low-lying wet meadow
		盐化灌丛、杂类草 Salinized shrub and weeds
		河湖生态 River and lake ecosystem
	荒漠生态需水系统 System of ecological water demand in desert	荒漠草原、草原化荒漠等 Desert grassland, steppified desert

2.2 研究时段与数据和参数确定

2.2.1 研究典型时段选取及其代表性分析 利用中下游张掖和额济纳两个典型气象站建站以来近 50a 的降水资料,分析获得不同典型代表年,分别为保证率 50%的平水年、95%的干旱枯水年和 20%的丰水年。本次研究限于气象资料,中游地区计算的典型年选取保证率 50%的平水年、35%的偏丰年以及 90%的枯水年 3 种年型,对应年降水量分别为:114.9mm、126.2mm 和 87.7mm;3a 平均值代表区域多年平均状况。下游额济纳区域则不同,选择保证率为 25%的丰水年、70%的中等干旱年和 90%的干旱枯水年 3 种年型,对应降水量分别为:65.6mm、26.9mm 和 18.7mm,取 3a 均值代表该区域多年平均状况。

2.2.2 有效降水量 Pe_n 和土壤水分修正参数 K_α 的确定

(1)有效降水量 Pe_n 的确定 自 20 世纪 30 年代提出作物有效降水量的概念以来,至今还没有形成统一的计算有效降水量的确定方法,由于影响因素众多,多采用试验确定或经验的手段,其中由美国农业部土壤保护服务组织(USDA,SCS)依据代表不同气候与土壤条件的 22 个试验站 50a 的数据综合分析提出的一种确定有效降水量的方法^[16],在现阶段应用最为广泛,被 FAO 采纳应用到其开发的作物灌溉管理系统软件 CROPWAT 中^[17]。本文针对具体地区的气候和土壤条件,利用国内有关干旱区植物水分利用特征的研究成果^[19,20],并参考 USDA 计算有效降水量的方法,来确定黑河流域乃至干旱区不同生态系统有效降水量的界限指标。如表 2 所示,满足对应指标的不同时段的降水总量就是时段相应生态系统获得的有效降水量。

(2) K_α 的确定 测定不同生态系统的土壤水分参数,参考已有的相关实验研究成果,合理确定 θ_s 、 θ_c 及 θ_z 值,利用公式(8)计算不同生态类型及不同时段的水分修正系数。但是基于农业灌溉实验结果,只能适宜于低湿与灌丛草甸草地,对于干旱区典型荒漠植被,生态耗水过程与土壤水分含量关系密切,对干旱具有高耐受性且对土壤水分的利用效率较高^[21],荒漠植被土壤水分修正,综合利用有关文献的研究结果取值^[20,21,23]。全年土壤水分修正系数的取值范围列于表 2。

表 2 干旱区不同生态系统的有效降水量界限指标及 K_α 值范围

Table 2 Effective precipitation and K_α values of different ecosystems in arid region					
生态系统类型 Ecosystem type	荒漠生态系统 Desert ecosystem	天然绿洲生态系统 Natural oasis ecosystem	人工绿洲生态系统 Man-made oasis ecosystem	山地生态系统 Mountain ecosystem	平原河湖生态系统 Plain river and lake ecosystem
有效降水:次降水量(mm/次) ^①	≥0.5	≥1.5	≥3.0	≥3.0	≥0.1
K_α 值 K_α Values	0.17~0.58	0.24~0.66	0.55~0.84	0.73~0.97	

① Effective precipitation(mm/time)

2.2.3 有关气象和生态系统分布面积的确定 中游地区选择张掖气象站,下游地区选择额济纳气象站,并结合中游地区和下游地区开展的陆气相互关系观测试验如 HEIFEI 试验的研究结果^[22~24],获取计算所需要的有关降水、风速、辐射的日资料及其他相关参数。采用陆地卫星 2000 年 Landsat TM/ETM 遥感数据通过 ARC/INFO、ARCVIEW 软件系统,获得各类植被覆盖面积,根据表 1,将各类需计算生态需水的植被进行归类合并,得到不同区域草地、林地、荒漠 3 种生态系统分布面积。

3 分析结果与讨论

3.1 中游地区的生态需水量

3.1.1 中游地区不同典型年主要生态系统的蒸散发量和有效降水量 中游地区人工绿洲生态系统中的防沙灌草地、沼泽与草甸草地和浅山区高覆盖山地草原草地等均并入草地生态系统中。林地生态系统则包括护田林网、乔灌防风固沙林地、园林及其他林地。中游地区的荒漠草原和荒漠主要分布在南北山前冲洪积扇中上部地带,地下水埋深超过 30m,荒漠植被大部分是适应当地降水条件的雨养植物类型,如干旱胁迫 1 年生植物、干旱胁迫雨季生植物等,生态系统维持依靠降水和散流洪水,计算其生态需水量无意义,但荒漠生态系统中分布在绿洲内部及周边覆盖度在 30%~50% 之间的盐化荒漠草地与固定半固定沙地,这部分荒漠化草地或与地下水有关或需要人工灌溉以维护沙地的治理与稳定,需要计算其生态需水量。这样,中游地区生态需水量计算的生态系统包括草地、以人工林地为主体的林地以及少部分绿洲内部或周边区域的荒漠生态系统,据上述方法计算的不同典型年和多年平均的蒸散发量和相应的有效降水量,列出草地和林地两类分别见图 1。

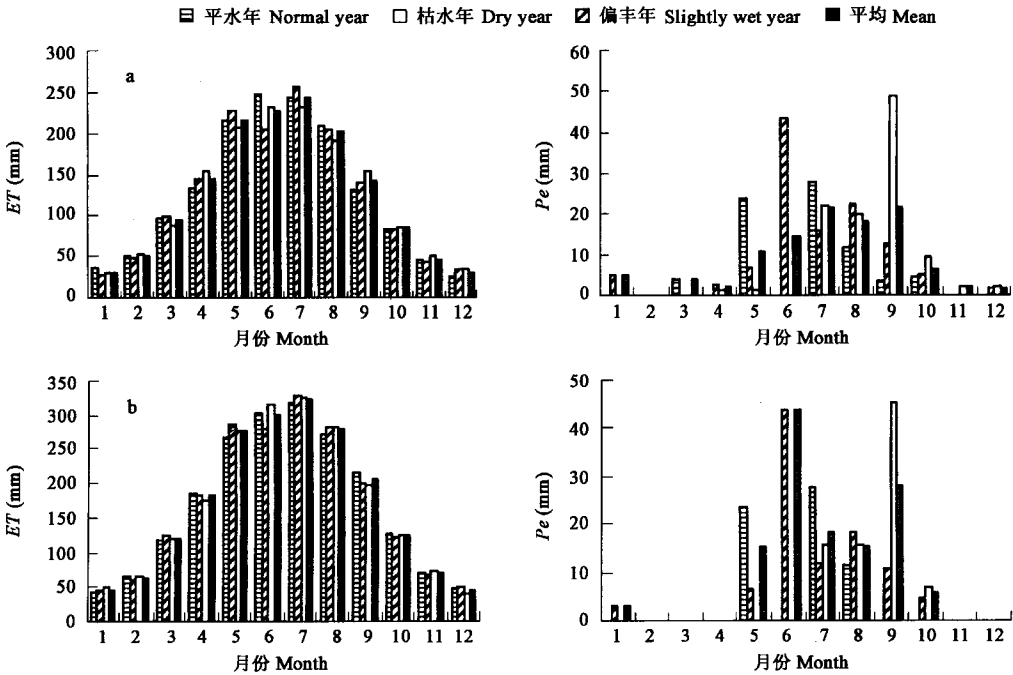


图 1 中游地区草地、森林生态系统的蒸散发量(ET)和有效降水量(Pe)(mm)

Fig. 1 Evapotranspiration (ET) and effective precipitation (Pe) of grassland ecosystem in the midstream region(mm)

不同典型年,由于气候条件不同,各生态系统具有明显不同的蒸散发量,且年内分布以 5~8 月份最高,11~翌年 1 月份最低,各月间蒸散发量差异较大。对于草地生态系统,平水年 5~8 月份蒸散发量在 207.5~246.6mm,以 6 月份最大;中等丰水年则介于 203.3~255.4mm 之间,以 7 月份最大;枯水年份,蒸散发量介于 191.1~231.4mm 之间,要小于其他年份。冬季 4 个月(11~翌年 2 月份)的蒸散发量分别为 24.4~50.5mm、27.0~47.2mm 和 30.9~49.8mm,以 12 月份和 1 月份为全年最低值。中等丰水年、平水年和枯水年的有效降水量分别为 115.8mm、106.6mm 和 75.2mm(图 1a)。

中游的森林生态系统,包括了少量天然有林地与灌木林地,主要成分是人工林地,包括防风固沙林灌地。5~8 月份蒸散发量变化在 276.5~322.9mm(图 1b),年内最大值出现在 7 月份,对应枯水年、平水年和中等丰水年的年有效降水量分别是 63mm、83.6mm 和 99.5mm。以荒漠草原为主体的荒漠生态系统 5~8 月份蒸散发量平均介于 141.6~171.8mm,年内最大值不同典型年不同,与草地相似。对应枯水年、平水年和中等丰水年,荒漠生态系统可以获得的有效降水量分别是 80.1mm、113.1mm 和 123.2mm。

3.1.2 中游各生态系统需水量 依据 2000 年遥感影像 TM 数据解译获取的结果,中游山前平原区草地生态类型分布面积

706.46 km², 森林生态系统分布面积 180.5 km², 计算生态需水量的荒漠生态系统分布面积 741.6km²。不同典型年各生态系统的需水量计算结果分别列于表 3、表 4 和表 5。典型枯水年份, 中游地区生态需水总量为 14.87 亿 m³, 其中草地生态系统所需水量占 58.4%, 占据中游生态需水量的主体, 荒漠草地生态占 21.0%, 林地需水量占 20.6%。各生态系统需水量的年内分布具有明显差异, 荒漠生态系统 5~8 月份的需水量集中了全年的 56%, 草地则占全年的 55.7%, 林地占 57.5%, 荒漠生态系统的需水量相对集中于其植物生长的夏季高峰期, 草地和林地相对在春秋季节的需水量较大。

表 3 干旱枯水年份中游地区不同生态系统需水量 (10⁴ m³)

生态系统 Ecosystem	分布面积 Area(km ²)	月份 Month								全年(亿 m ³)
		4	5	6	7	8	9	10	11	Total year(10 ⁸ m ³)
草地 Grassland	706.46	10897.8	12851.5	16349.7	14357.8	12674.4	10585.5	5753.9	3500.4	8.69
林地 Forest	180.5	2689.0	3942.5	4899.0	4697.0	4224.3	3481.6	1813.2	1039.4	3.07
荒漠 Desert	741.6	2745.6	3091.0	5362.8	5139.9	4986.5	3616.9	1933.3	881.9	3.11

中等丰水年, 生态系统获得的有效降水量要高于干旱枯水年, 中游地区生态需水量总量为 13.2 亿 m³, 比枯水年减少 4.2% (表 4)。其中草地生态系统需水量 8.4 亿 m³, 占总量的 63.6%, 林地需水量占 21.1%, 荒漠草地点 15.3%, 生态需水量的这种不同类型间需水比例结构没有变化; 从年内分布来看, 4~8 月份, 草地需水量占全年的 57.5%, 相应荒漠生态系统占 58.1%, 林地占 56.8%。

表 4 中等丰水年份中游地区不同生态系统需水量 (10⁴ m³)

生态系统 Ecosystem	分布面积 Area(km ²)	月份 Month								全年(亿 m ³)
		4	5	6	7	8	9	10	11	Total year(10 ⁸ m ³)
草地 Grassland	706.46	9914.6	15508.8	11246.9	16945.5	12782.7	8982.3	5551.4	3101.5	8.4
林地 Forest	180.5	2650.2	4037.2	3405.0	4571.3	3816.4	2756.1	1682.0	972.7	2.78
荒漠 Desert	741.6	2280.7	3044.2	1410.5	4861.0	3032.4	2362.6	1057.5	722.1	2.02

在平水年, 中游生态需水量 13.77 亿 m³(表 5), 比干旱枯水年少 2.54%, 各生态系统需水比例没有变化, 草地生态系统占 61.7%, 荒漠草地和林地分别为 17.8%和 20.5%; 年内分布情况是草地在 4~8 月份需水量占全年的 61.8%, 荒漠生态系统需水量占全年的 64.05%, 林地占 59.4%。因此, 不同典型年, 生态系统需水量的年内分布变化较大。中游地区平均生态需水量为 13.95 亿 m³, 其中草地需水量 8.53 亿 m³, 荒漠生态系统需水量 2.52 亿 m³, 林地需水量 2.89 亿 m³。如果仅考虑绿洲生态系统, 则中游地区生态需水量为 11.42 亿 m³。

表 5 平水年份中游地区不同生态系统需水量 (10⁴ m³)

生态系统 Ecosystem	分布面积 Area(km ²)	月份 Month								全年(亿 m ³)
		4	5	6	7	8	9	10	11	Total year(10 ⁸ m ³)
草地 Grassland	706.46	15001.8	24307.5	27965.0	25163.9	21318.7	9388.4	8236.0	5078.3	8.5
林地 Forest	180.5	2541.7	3997.9	4535.0	4444.7	3831.3	2206.6	1694.2	1053.1	2.83
荒漠 Desert	741.6	2225.3	3278.3	5764.2	4064.4	3436.3	350.7	685.0	678.6	2.44

3.2 下游地区的生态需水量

3.2.1 下游地区不同典型年主要生态系统的蒸散发量和有效降水量 下游地区的高覆盖盐化草甸草地、河泛地及湖滩灌丛低湿草甸以及中旱生灌草地等覆盖度大于 40%的草地组成草地(高覆盖度)系统, 荒漠河岸胡杨和沙枣林及林灌混杂地等组成下游林地生态系统, 包括疏林地, 其他覆盖度小于 40%的荒漠草原、退化灌草地、固定与半固定沙地等组成荒漠生态系统, 但其中覆盖度在 20%~40%之间的大部分荒漠生态系统中, 包含大量依靠地下水补充生长所需水份的植物类型, 该部分属于计算生态需水量的范畴, 其他覆盖度小于 20%的绝大部分荒漠则与地下水和河水无任何水分关系, 没有计算生态需水量的意义, 因此, 下游地区生态需水量计算的生态类型就包括草地(高覆盖度)生态系统, 荒漠森林生态系统和荒漠生态系统 3 类。根据上述方法计算 1999~2000 年不同代表年的各类生态系统蒸散发量, 同样这里仅列出草地和林地两类如图 2。下游降水量很小, 年平

均降水量只有约 40mm,对应不同代表年的有效降水量一并如图 2。

下游地区草地生态系统的蒸散发量(图 2a)在丰水年与枯水年变化在 1335.88~1385.27mm,差异不是十分显著主要原因就是该区域降水量很小,但年内季节分布差异巨大,平均 61.45%的年蒸散发量集中在 5~8 月份,在丰水年略低为 60.2%,且 7 月份明显高于其它时间,7 月份蒸散发量一般要比 5~8 月份间其他月份的蒸散发量高出 56~80 mm,而 11~翌年 2 月份的冬季蒸散发量很小,仅占全年的 7.8%。草地在丰水年可获得有效降水量 59.6mm,但在枯水年分只有 16.1mm(图 2a)。

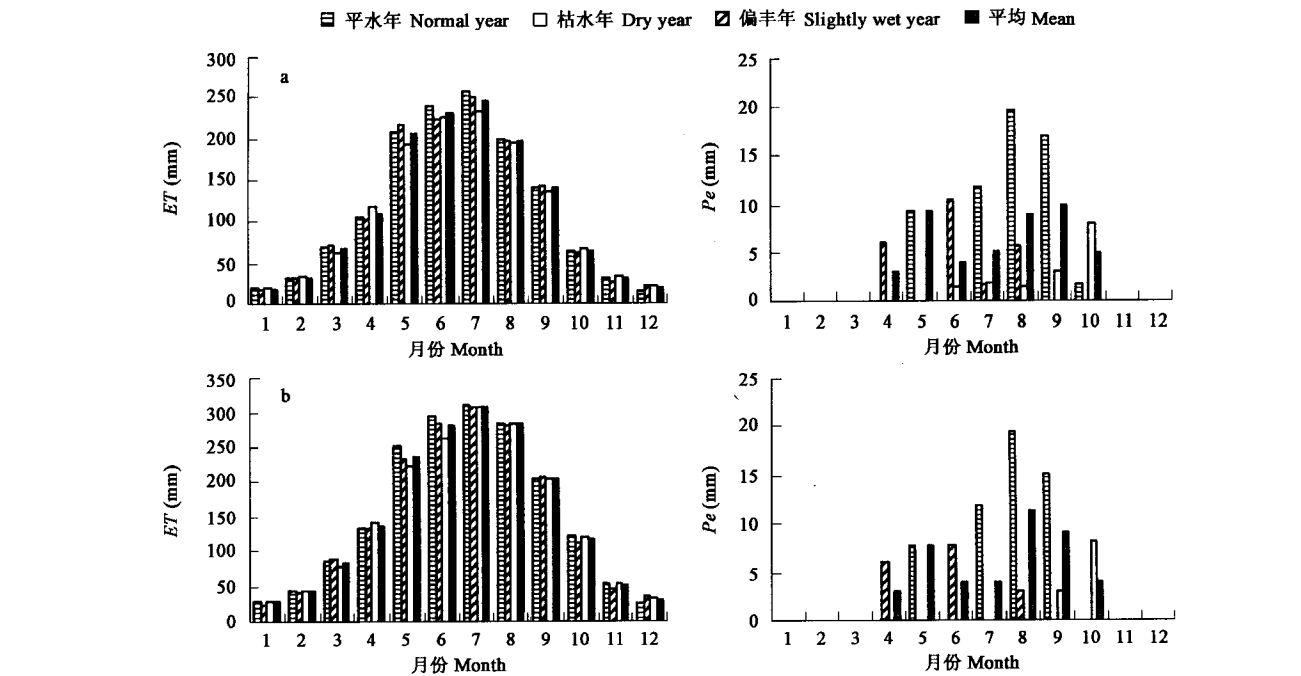


图 2 下游地区草地森林生态系统蒸散发量和有效降水量

Fig. 2 Evapotranspiration and effective precipitation of grassland and forest ecosystem in the downstream region

下游荒漠生态系统年蒸散发量平均 899.8mm,其中 63.14%集中在 5~8 月份,集中程度要高于草地,最大值仍然出现在 7 月份,但荒漠生态系统 7 月份于 5~8 月份其他月份之间差异较小,与草地类似,11~翌年 2 月份冬季的蒸散发量仅占全年的 7.9%。在丰水年,荒漠生态系统可获得的有效降水量为 64.6mm,枯水年份也只有 18.3mm。林地平均蒸散发量 1812.56mm,同样 60.4%集中在 5~8 月份(图 2b),但所不同的是林地 5~8 月份间差异更小,尤其是 6~8 月份均蒸散发量几乎相等,而且在研究的 1999~2001 年年际间差异也很小。林地在丰水年可以获得 54.4mm 有效降水量,在枯水年份只有 11.2mm(图 2b)。

3.2.2 下游各生态系统需水量计算结果 依据 2000 年遥感影像 TM 数据解译获取得的结果,下游地区草地(高覆盖)生态类型分布面积 765.79 km²,森林生态系统分布面积 397.04 km²,荒漠生态系统中属于计算生态需水量的部分(覆盖度在 20%以上)分布面积 1635.7km²,相对中游地区而言,草地和林地分布面积和所占比例更小。依据上述方法计算的不同典型年下游地区各生态系统的需水量结果分别列于表 6、表 7 和表 8。

表 6 干旱枯水年份下游地区不同生态系统需水量(10 ⁴ m ³)										
Table 6 Water demands of different ecosystems in the downstream region in dry year(10 ⁴ m ³)										
生态系统 Ecosystem	分布面积 Area(km ²)	月份 Month								全年(亿 m ³) Total year(10 ⁸ m ³)
		3	4	5	6	7	8	9	10	
草地 Grassland	765.79	3194.0	4860.5	10990.0	12558.1	13482.2	10439.1	7296.6	2375.6	6.98
林地 Forest	397.04	3469.2	5279.8	9982.5	11748.8	12345.9	11285.6	8036.4	4583.5	7.29
荒漠 Desert	1635.7	3183.8	4844.8	10954.6	12386.8	13273.0	10274.6	6642.9	1661.4	6.74

在干旱枯水年,下游生态需水量 21.01 亿 m³(表 6),其中荒漠生态系统需水量 6.74 亿 m³,占 32.08%;草地生态系统需水量 6.98 亿 m³,占 33.22%;而以胡杨为主体的荒漠森林生态系统需水量 7.29 亿 m³,仅占 34.7%。在生态需水量的年内分布上,荒漠生态系统年需水量的 64.36%集中在 5~8 月份,11~翌年 2 月份 4 个月需水量仅占全年的 7.8%;草地生态系统年需水量

的 62.46%集中在 5~8 月份,11~翌年 2 月份冬季需水量占全年的 7.7%;林地的 5~8 月份需水量是全年的 61.34%,在冬季 11~翌年 2 月份间占 8.42%。

表 7 中等枯水年份下游地区不同生态系统需水量(10⁴m³)

Table 7 Water demands of different ecosystems in the downstream region in moderately dry year(10⁴m³)

生态系统 Ecosystem	分布面积 Area(km ²)	月份 Month								全年(亿 m ³) Total year(10 ⁸ m ³)
		3	4	5	6	7	8	9	10	
草地 Grassland	765.79	3287.7	4310.0	11514.2	11027.5	13211.7	10053.8	7654.9	2874.0	6.84
林地 Forest	397.04	3515.7	5107.5	9310.1	10927.2	12271.4	11080.1	8233.4	4469.1	7.09
荒漠 Desert	1635.7	3277.1	3764.0	11477.2	10076.1	12930.4	9351.9	7630.3	2864.8	6.57

表 8 丰水年份下游地区不同生态系统需水量(10⁴m³)

Table 8 Water demands of different ecosystems in the downstream region in wet year(10⁴m³)

生态系统 Ecosystem	分布面积 Area(km ²)	月份 Month								全年(亿 m ³) Total year(10 ⁸ m ³)
		3	4	5	6	7	8	9	10	
草地 Grassland	765.79	2835.8	5464.3	9469.6	12006.3	11410.6	8799.9	5946.2	2906.6	6.44
林地 Forest	397.04	3167.5	5628.8	8552.7	10436.7	11723.3	10466.1	7555.3	4773.6	6.88
荒漠 Desert	1635.7	2826.6	5283.1	8259.2	11869.5	10335.8	6980.0	4452.8	2625.7	5.75

在中等干旱年和丰水年,下游生态需水量分别为 20.5 亿 m³ 和 19.07 亿 m³,荒漠草地生态系统需水量分别为 6.57 亿 m³ 和 5.75 亿 m³,林地和草地生态系统的需水量合计分别为 13.9 亿 m³ 和 13.32 亿 m³。在年内不同季节的分布上,中等干旱年的 5~8 月份,荒漠生态需水量占全年的 63.46%,草地和林地分别为 61.7%和 60.7%,军掠地与枯水年;丰水年的 5~8 月份,荒漠生态需水量占全年的 61.56%,而草地和林地分别为 59.8%和 59.06%,均显著低于枯水年和中等干旱年,其原因就在于该区域 5~8 月份集中了大部分有效降水量。

下游地区年平均生态需水量(1999~2001 年)20.2 亿 m³,其中荒漠生态系统平均年需水量 6.35 亿 m³,草地为 6.75 亿 m³,林地 7.08 亿 m³。荒漠生态系统年需水量的 63.1%、草地的 61.4%和林地的 60.4%都集中在 5~8 月份。如果仅考虑绿洲生态系统需水量,则下游平均生态需水量为 13.83 亿 m³。

3.3 讨论和说明

(1)如前所述,上述中下游地区不同生态需水量的计算结果是基于潜在蒸散发能力的估算,反映的是有足够水分供给条件下各类生态系统在所处良好水热条件环境下,最大可能的生态耗水量,在这种水分条件下,各生态系统将处于最佳状态,生产力达到最大。如中游和下游草地生态系统的需水量,平均达到 12074.2m³/hm² 和 8814.34m³/hm²,与中游张掖地区充分灌溉条件下的大田农作物耗水量相当,因此,上述需水量结果代表了一种理想状态下的各类生态系统与热量条件相匹配的水量需求,并不能反映实际生态系统维持其生态功能与结构所需要的现实需水量。

(2)在干旱区,干旱植物对水分胁迫的广域适应尺度,决定了干旱区生态需水量应该是一种区间,而非定值。植物对水分的胁迫有一个区间,从植物水分亏损到抑制其正常生长的临界值到水热条件匹配最佳值之间的水分供给,都能满足干旱植物正常生长与繁衍的水分需求。在农作物灌溉水分管理上,就存在最大的田间持水量、土壤水分临界值和凋萎值等不同水分含量界限,土壤水分临界值一般确定为田间持水量的 70%,根据实验研究提出的北方玉米种植的土壤水分适宜值界限为田间持水量的 55%~80%;而对于积极推广的非充分灌溉管理的理论,关键是降低控制土壤水分管理的下限。参照农作物水分管理的这种理论,如果把上述方法确定的生态需水量看作是接近土壤田间持水量时的参考耗散水量,那么,上述水量的 60%~100%范围内的水量都应该是生态系统的适宜需水量,据此提出黑河中游和下游生态需水量及其在不同典型年的合理值如表 9 所示。

(3)表 9 给出了不同典型年黑河流域中下游生态需水量的区间,从均值角度,可以认为:中游地区如果满足(9.13±2.29)亿 m³ 的生态用水,则可促使现有人工绿洲范围内生态系统的稳定与发展,当生态用水供给量达到(11.16±2.67)亿 m³ 时,绿洲外围一定范围内的生态系统得以充分发展,对于保护人工绿洲安全和生态功能稳定具有重要作用。下游地区维护现有绿洲健康与稳定需要水量(11.06±2.77)亿 m³,也就是说现阶段实施的下游分水 9.7 亿 m³/a 的方案,可以促使现有绿洲生态系统有一个良好的结构与功能,当实现(16.16±4.04)亿 m³ 的水量供给,下游天然绿洲生态体系将得以较大规模发展,可望恢复其 20 世纪 60~70 年代的水平。

表 9 黑河流域中下游区域生态需水量评价结果(10⁸m³)

Table 9 Evaluation results of ecological water demands in the mid and downstream regions of the Heihe River (10 ⁸ m ³)					
地区和类型 Region and type		平水(偏枯)年 Normal (slightly dry) year	典型枯水年 Typical dry year	丰水(偏丰)年 Wet (slightly wet) year	平均年需水量 Mean annual water demand
中游地区 Midstream region	绿洲生态 Oasis ecosystem	11.3~6.78	11.76~7.05	11.18~6.71	11.42~6.85
	整体生态 Whole ecosystem	13.77~8.26	14.87~8.92	13.2~7.92	13.95~8.37
下游地区 Downstream region	绿洲生态 Oasis ecosystem	13.9~8.34	14.3~8.58	13.3~7.98	13.83~8.3
	整体生态 Whole ecosystem	20.5~12.3	21.0~12.6	19.07~11.44	20.2~12.12

4 结论

应用针对 不同植被蒸散发潜力估算模型,提出了可模拟和评价不同时期生态系统需水量的方法,明确区分不同生态系统以及同一生态系统在不同气候与地理区域的不同生态需水规律,密切结合当地不同生态系统的生态有效降水条件,选择水文典型年型,结果不仅能够体现生态系统需水量的年际间的变化,也能反映年内不同时间段(月、季节或日)的需水量变化过程。该方法所计算的需水量近似于植被的最佳需水量,干旱植物对水分胁迫的广域适应性,因此,干旱区生态系统在不同时期的生态适宜需水量是一个区间,从植物水分亏损到抑制其正常生长的临界值到水热条件匹配最佳值之间的水分供给,可以通过土壤水分条件确定变化范围。

以黑河流域中下游地区为例,生态需水量评价结果表明:在保证率 90%的干旱枯水年分,中游地区生态需水量为 14.87~8.92 亿 m³,下游地区生态需水量 21.0~12.6 亿 m³;在正常平水年份,中游地区生态需水量 13.77~8.26 亿 m³,下游地区将近 20.5~12.3 亿 m³(偏枯年),在丰水年份,中游地区约为 13.2~7.92 亿 m³(中等丰水年),下游地区生态系统则需要水量 19.07~11.44 亿 m³。全流域在保障生态用水量 15.15 亿 m³ 时,可维护现有绿洲生态系统得以稳定和功能的正常发挥,当生态用水量可供给到 27.32 亿 m³ 时,流域中下游生态系统将可以较大幅度发展,现有绿洲外围的一些荒漠生态体系逐渐转变为绿洲生态系统,下游荒漠绿洲生态系统将得以恢复。

References:

[1] Liu C M. The analysis of water supply and demand in the 21st century of China: Ecological water conservancy research. *China Water*, 1999, (10): 18~20.

[2] Gleick P H. The Changing Water Paradigm: A Look at Twenty-first Century Water Resource Development, *Water International*, 2000, **25**(1): 127~138.

[3] 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.

[4] Wang S C. The theory intension of resource water conservancy and practice foundation. *China Water*, 2000,(5): 13~17.

[5] Shen G F. Ecological environment construction and protection and utilization of water resources. *Soil and Water Conservation in China*, 2001, (1): 4~8.

[6] Xia J, Sun X T, Tan G. The progress and prospect of water cycle study in western China. *Advance in Earth Sciences*, 2003, **18**(18): 58~67.

[7] Xia J, Zheng D Y, Liu Q E. Study on evaluation of eco-water demand in Northwest China. *Hydrology*, 2002, **5**(22): 12~17.

[8] Jia B Q, Zhang Z Q, Zhang H Q, *et al.* On the current research status, problems and future framework of ecological and environmental water use. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(10): 1734~1740.

[9] Jia B Q, Xu Y Q. The conception of the eco-environmental water demand and its classification in arid land. *Arid Land Geography*, 1998, **21**(2): 8~12.

[10] Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Dynamic tendency of arid oasis under the influence of water resources decrease——A case study of Ejina oasis in Heihe River basin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(5): 564~568.

[11] Wang G X, Cheng G D. Water demand of eco-system and estimate method in arid inland river basins. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(2): 129~134.

[12] Feng H L, Wang C, Li Y. Research of the ecological water demand in basins. *Environmental Science Trends*, 2001, **7**(1): 27~37.

[13] Wang F, Wang H, Chen M J, *et al.* A study of ecological water requirements in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(2): 129~137.

[14] DFID. *Handbook for the assessment of catchment water demand and use*. HR Wallingford, UK, 2003. 248.

[15] Vorosmarty C J, Federer C A and Schloss A L. Potential evaporation functions compared on US watersheds; possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology*, 1998, **207**: 147~169.

[16] Flint A L and Childs S W. Use of the Priestly-Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1991, **56**: 247~260.

[17] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Qurat J R, Met. Soc.*, 1985, **111**:839~855.

[18] Rural water conservancy department of Ministry of Water Resources. *Irrigation and Management Handbook*. Beijing: Waterpower Press, 1994.

[19] Chen Y M, *et al.* *Water demand and irrigation of the Chinese main crop*. Beijing: Waterpower Press,1995.

[20] Zhao J B, Xu Z L, Zhong Z Z, *et al.* *The water balance of nonirrigated farmland in North China*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[21] Feng Jinchao, Liu Xinmin. *The relationship between arid environments and vegetation water consumed*. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1998.

[22] Yan Y P, Wang J M, Menenti M, *et al.* Numerical simulation of surface energy fluxes over heterogeneous land surfaces in HEIFE area. *Plateau Meteorology*, 2001, **20**(2): 132~139.

[23] Hu Y Q, Gao Y X, Wang J M, *et al.* Some study results in the test(HEIFE)of Heihe River basin. *Plateau Meteorology*, 1994, **13**(3): 225~236.

[24] Tao Z H, Zuo H T, Hu Y Q. The test database in Heihe River basin. *Plateau Meteorology*, 1994, **13**(3): 369~376.

参考文献:

[1] 中国 21 世纪水供需平衡分析: 生态水利研究. 中国水利, 1999, (10): 18~20.

[3] 李丽娟, 郑红星. 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.

[4] 汪恕成. 资源水利的理论内涵和实践基础. 中国水利, 2000,(5): 13~17.

[5] 沈国防. 生态环境建设与水资源的保护利用. 中国水土保持, 2001, (1): 4~8.

[6] 夏军, 孙雪涛, 谈戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望. 地球科学进展, 2003, **18**(18): 58~67.

[7] 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研讨. 水文, 2002, **5**(22): 12~17.

[8] 贾宝全, 张志强, 张红旗, 等. 生态环境用水研究现状、问题分析与基本构架探索. 生态学报, 2002, **22**(10): 1734~1740.

[9] 贾宝全, 许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类. 干旱区地理, 1998, **21**(2): 8~12.

[10] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 干旱区受水资源胁迫的下游绿洲动态变化趋势分析——以黑河流域额济纳绿洲为例. 应用生态学报, 2002, **13**(5): 564~568.

[11] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆地区生态需水量估算的方法——以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, **22**(2): 129~134.

[12] 丰华丽, 王超, 李勇. 流域生态需水量的研究. 环境科学动态, 2001, **7**(1): 27~37.

[13] 王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水量研究. 自然资源学报, 2002, **17**(2): 129~137.

[18] 水利部农村水利司, 灌溉管理手册. 北京: 水利电力出版社, 1994.

[19] 陈玉民, 等. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[20] 赵聚宝, 徐祝龄, 钟兆站, 等. 中国北方旱地农田水分平衡. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[21] 冯金朝, 刘新民. 干旱环境与植物的水分关系. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.

[22] 阎宇平, 王介民, Menenti M, 等. 黑河试验区非均匀地表能量通量的数值模拟. 高原气象, 2001, **20**(2): 132~139.

[23] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河试验(HEIFEI)的一些研究成果. 高原气象, 1994, **13**(3): 225~236.

[24] 陶泽宏, 左宏超, 胡隐樵. 黑河试验数据库. 高原气象, 1994, **13**(3): 369~376.