

基于农业气象学原理的林地生态需水量估算
——以泾河流域为例

闵庆文¹, 何永涛¹, 李文华¹, 李贵才²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学开放室, 北京 100101)

摘要:从农业气象学原理出发, 森林植被的生态需水可以理解为林地的蒸散耗水量。根据土壤水分有效性的划分, 林木暂时凋萎含水量和生长阻滞含水量分别是能保证林木基本生存和正常生长时土壤含水量的下限, 据此可以作为林地最小生态需水定额和适宜生态需水定额计算的依据, 其数值通过计算林地的潜在蒸散并利用土壤水分修正系数和林木系数进行订正获得。根据遥感图像资料, 在 GIS 支持下, 计算了泾河流域现有林地生长季的最小生态需水量和适宜生态需水量, 分别为 $203960 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $340330 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

关键词:泾河流域; 生态建设; 森林植被; 生态需水; 农业气象

Estimation of forests' ecological water requirement based on agrometeorology:
Taking Jinghe Watershed as an example

MIN Qing-Wen¹, HE Yong-Tao¹, LI Wen-Hua¹, LI Gui-Cai² (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101; 2. Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Application). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2130~2135.

Abstract: Jinghe is the second-branch of the Yellow River with the length of 450km and the watershed is about 45421 km². For the sake of dry climate and human activities, there are only thin vegetation there. The serious soil and water loss caused by degraded vegetation ecosystems is one of the most serious regions of soil and water loss in the Loess Plateau and one of the main silt sources floating in the Yellow River. Therefore, the research on ecological water requirement in the watershed will be important to the regional ecological restoration and construction.

According to the principles of agrometeorology, the ecological water requirement of forests means the water resources used to maintain and improve the natural balance of forest ecosystem which can be expressed by the evapotranspiration of trees in growing period. In general, if the soil moisture was above temporary-wilt or growth-retard, the growth of trees can be basically or normally sustained respectively. Therefore, they can be taken as the minimum ecological water requirement and suitable ecological water requirement of the forest respectively. Also, they can be estimated by introducing the soil factor (K_s) and tree species factor (K_t) to potential evapotranspiration with Penman formula.

In this paper, based on the analysis of structure and distribution of current forestland, water use period and typical tree species and statistics with GIS, the ecological water requirement for forests was estimated. The results revealed (1) the minimum and suitable ecological water requirement of the forests in Jinghe water were approximately $203960 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $340330 \times 10^4 \text{ m}^3$ respectively; (2) the ecological water requirements in June, July and August are more than those in other period; (3) from high to low the ecological water requirements in different forestland are shrub land, forestland, scattered

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111506)

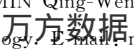
收稿日期:2004-05-11; **修订日期:**2004-06-20

作者简介:闵庆文(1963~), 男, 江苏人, 博士, 研究员, 主要从事生态系统服务功能、区域可持续发展、农业气象学研究。E-mail: minqw@igsnr.ac.cn

Foundation item: Development Plan of the State Key Fundamental Research of China (No. 2002CB111506)

Received date: 2004-05-11; **Accepted date:** 2004-06-20

Biography: MIN Qing-Wen, Ph. D., Professor, mainly engaged in valuation of ecosystems services, regional sustainable development and agrometeorology. E-mail: minqw@igsnr.ac.cn



woodland and other forestlands respectively.

Key words: Jinghe watershed; ecological restoration and construction; forest vegetation; ecological water requirement; agrometeorology

文章编号:1000-0933(2004)10-2130-06 中图分类号:TV213.4,X143,X171 文献标识码:A

生态需水是维持一个生态系统和谐与稳定所必须消耗的水分,生态需水问题是当前生态学和水文学研究的热点问题之一。目前,已经有很多学者就生态需水的基本概念、计算方法、不同流域的生态需水、不同地区的生态需水等问题^[1~10]进行了研究,取得了一些成果。本文从农业气象学角度,讨论了生态需水的概念及其计算方法,并以泾河流域为例,对林地生态需水量进行了具体的计算和分析。

泾河为黄河的二级支流,发源于宁夏回族自治区泾源县二龙河,流经宁夏、甘肃、陕西3省(区)30个县市,于陕西高陵县注入渭河,全长450 km。流域面积45421 km²。流域内植被稀少,加上人为的破坏,水土流失严重,为黄土高原严重水土流失区之一,也是黄河泥沙的主要来源地之一。水资源匮乏是该地区社会经济可持续发展的主要限制因素,同时也是影响该地区植被生态建设的根本因子。因此,对该流域植被生态需水的研究,对于该地区的生态环境建设具有极其重要的意义。

1 林地生态需水的农业气象学描述

1.1 生态需水与生态用水的概念

作为研究农业生产与气象条件的相互关系及其规律的科学,农业气象学的任务之一就是研究农业生产过程中的耗水规律及其影响因素与调控措施^[11]。按照农业气象学的定义,作物需水量是指在供水充足,并且其他因素不成为限制因子的条件下,作物为获得最高产量所需要的水分总量^[12]。它包括3部分:一是同化需水,即植物同化过程所需水量和植物体内含有的水分,这部分水分所占比例很小,仅占0.15%~0.20%;二是蒸腾耗水,这是生物与物理过程的综合;三是蒸发与渗漏耗水。其中前两项为植物生理过程所必需的水分,称为生理需水;最后一项为非植物生理过程所必需,但却是植物生长环境条件形成中所需要,称为生态需水^[11]。但在实际情况下,考虑到第一项所占比例很小以及许多地方渗漏量较小,多以植物的蒸腾耗水与土壤蒸发耗水作为该植被生态系统的需水量。即农田生态需水量为农田植物群体蒸腾量和土壤蒸发量之和,数值上等于农田的实际蒸散量^[12]。

从上述概念出发,可以认为植被生态需水是指在其他因素不受限制的条件下,维持植被正常生长(或维持植被生态系统健康)所需要的水量;生态用水则是在实际条件下,植被生态系统实际消耗的水量。目前关于生态需水问题的讨论,在不同专业领域有着不同的理解。例如,着重于生态系统健康维持或生态恢复与建设所需要的水量^[1,7,8],或着重于流域河流系统环境承载力的生态需水量^[2],或着重于区域水资源分配上维持区域生态安全的水量^[3,5,6]。本文所理解的生态需水则是从植被生态角度,更偏重于第1层意义,其计算则依赖于农业气象学中关于植被蒸散的理论。

1.2 林地最小生态需水和适宜生态需水

气候条件、土壤水分含量以及林木种类,是影响林地蒸散耗水的3个最重要的因子。林地实际蒸散量受大气环境、植被生态特性与生长状况以及土壤水分条件的综合影响,一般可以下式进行计算:

$$E_a = K_s \times K_t \times P_E \tag{1}$$

式中, P_E 为由气候条件决定的潜在蒸散量; K_s 是土壤水分修正系数,与土壤质地及土壤含水量有关; K_t 是林木系数,与林木种类和生长状况有关。

当土壤水分充足时,植被蒸散主要取决于植物的类型和气候因素(例如风速、大气温度和湿度等)。当土壤含水量低于一定的值 S^* (临界土壤含水量,其值与植被和土壤质地有关),植物的气孔开始关闭,水分的蒸散速度开始降低^[13~16]。此时,土壤水分含量就成为林木实际蒸散量的主要限制因素。根据土壤水分常数的概念,林木暂时凋萎含水量(S_t)和生长阻滞含水量(S_r)分别是能保证林木基本生存和正常生长时的土壤含水量下限。因此,可以将这两种情况下的林地耗水量,分别作为最小生态需水定额和适宜生态需水定额。

2 基于农业气象学原理的林地生态需水估算

据(1)式,估算林地生态需水,就是要在求出该地区潜在蒸散量的基础上,进行土壤水分和林木的修正,因此,具体的估算就转化为潜在蒸散量的计算和土壤水分修正系数与林木修正系数的确定。最后在上述计算的基础上,进行区域推算。

2.1 潜在耗水量(PE)的计算

如前所述,林地潜在耗水量是某一气候条件下林地的潜在蒸散量,其值只与当地的气候条件有关,可以通过气象资料,利用Penman公式^[17]进行计算。Penman公式是能量(热量)平衡方程和空气动力学方法相结合的半经验蒸发计算公式,虽不能准确估算1d和1h的潜在蒸散,但能比较准确估算较长时间(月或年)的数值^[18]。

2.2 土壤水分系数(K_s)值的计算

Jensen 公式[19]可以用来确定土壤水分供应不充足时,植被的实际蒸散量随土壤水分含量的变化情况。根据 Jensen 公式,当 $S_w \leq S \leq S^*$ 时,有:

$$K_s = \ln[(S - S_w)/(S^* - S_w) \times 100 + 1]/\ln 101$$

(2)

式中, S 为土壤实际含水量; S_w 为土壤凋萎含水量; S^* 为土壤临界含水量。
根据前述对林地最小生态需水和适宜生态需水概念的讨论,只要确定了林地的临界土壤含水量(S^*)、暂时凋萎土壤含水量(S_t)、土壤凋萎含水量(S_w)和生长阻滞含水量(S_r),将 $S = S_r$ 和 $S = S_s$ 分别代入(2)式,就可以得到相应的 K_s 值。

根据前人的研究结果^[20,21],采用 Saxton 等的方法,可以计算得到黄土高原地区不同土壤质地类型的水分参数,并进一步计算得到相应的 K_s 值(表 1)。

2.3 林木系数(K_l)的计算

K_l 是林地最大需水量与潜在耗水量的比例系数,在求得林地的潜在耗水量后,用林木耗水系数 K_l 作调整即可得到林地的实际最大蒸散量,即林地的最大耗水量。 K_l 值随植物种类、所处生长发育阶段、生长季节而具有不同的数值,一般通过实验取得。我国目前对林木 K_l 值的研究比较少,考虑到刺槐和油松是黄土高原地区造林最常用的树种,本文 K_l 值依据陈丽华等^[4]的结果,以二者的平均值 0.765 代表乔木树种。

3 案例研究——泾河流域林地生态需水量估算

3.1 泾河流域现有林地的状况及其分布

泾河流域现有林地的分布统计数据来源于 1:10 万土地利用数字数据图(2000 年)。根据统计,泾河流域的现有林地面积为 7042.6 km²。但其具体的生长状况并不十分理想,质量差别很大,按覆盖度分类后的分布情况见表 2。该区域的林地以灌木林地为主,占总林地面积的 45.5%,而疏林地也占据了很大的比例,超过林地总面积的 1/4。而郁闭度超过 0.3 的有林地面积仅 1461.0 km²,占该区域林地总面积的 20.7%。

表 2 泾河流域不同林地类型分布表(2000 年)

类型 Types	有林地(km ²) Forestland	灌木林地(km ²) Shrub land	疏林地(km ²) Scattered woodland	其他林地(km ²) Other forestlands	合计 Total	
					(km ²)	(%)
干流区域 Mainstream region	974.6	1500.7	852.9	136.7	3464.8	49.2
支流区域 Branch region	486.4	1706.4	1249.4	135.6	3577.8	50.8
合计 Total(hm ²)	1461.0	3207.1	2102.2	272.3	7042.6	100.0
(%)	20.7	45.5	29.9	3.9	100.0	

* 有林地 指郁闭度 >0.3 的天然林和人工林;包括用材林、经济林、防护林等成片林地;灌木林地 指郁闭度 >0.4、高度在 2m 以下的矮林地和灌丛林地;稀疏林地 指郁闭度为 0.1~0.3 的稀疏林地;其他林地 指未成林造林地、迹地、苗圃及各类园地(果园、桑园、茶园、热作林园等)

由于上述 4 类林地在树种组成和群落结构等方面存在着差别,因此也必然会影响到其生态需水量上的差异。据在晋西黄土区对乔、灌木林地耗水进行的观测,多数年份灌木林地生长季的耗水量与乔木林地生长季耗水量的比值大都在 0.8 左右^[22]。这也就表明,在同一地区林木的生长季期间,灌木林地的耗水量要比乔木林地少 20%左右。因此,在本文的计算中,将灌木林地的耗水量按同一地区乔木林地的 80%计。

另外,从水土保持的角度出发,郁闭度小于 0.3 的稀疏林地很难起到有效的水土保持防护作用,因此这类林地应该是属于待改造的类型,本文统计中将其生态需水量按乔木林地的需水标准统计。而其他林地则受人为控制因子较多,而且面积又较少,所占比例不是很多,所以本研究将其按乔木林地的生态需水定额来统计。

3.2 林木耗水时段与树种的代表性

据研究,在黄土高原地区,林地的耗水时段主要集中在生长季节,即每年的 4 月份到 10 月份^[23]。因此,在计算泾河流域林地的耗水支出时,亦以其生长季(4~10 月份)作为生态需水量的计算时段。

由于在黄土高原地区目前现存的森林中天然林已经很少,大多都是人工建造的防护林和用材林^[24],同时也缺乏泾河流域森林树种组成与分布的具体资料,因此在本文的计算中以黄土高原地区造林常用树种油松和刺槐的生态耗水定额作为代表,来

计算泾河流域现有森林植被的生态需水量。这种方法已经被证明在计算人工林为主的干旱和半干旱地区的植被生态需水量时,是完全可行且易于操作。其主要理由:一是就人工林而言大多为纯林,混交的情况很少,用主要树种为代表是可行的;二是从干旱半干旱地区的区域分布来看,树种选择具有区域上的一致性;三是,就天然林而言,群落具有单优性特点,故用优势树种作为代表,仍可反映系统的基本属性^[3]。

3.3 数据选取与统计分析

计算林地潜在蒸散所需的气象数据包括降雨、温度、风速、湿度、日照百分率等,通过平均得到以上数据 40a 的逐月平均值。在 GIS 支持下,根据各个气象站的经纬度分布,利用 PCI 软件中的 Nature Neighbor Interpolation 空间插值方法,并结合 DEM 数据和有关地学和气象学知识,对以上各气象要素进行空间插值,从而得到相应的面状数据。

根据 Penman 公式,利用以上各气象要素的空间分布数据,在 PCI 中计算并创建了分辨率为 1km×1km 的泾河流域生长季逐月林地潜在蒸散分布图、逐月最小生态需水定额、逐月适宜生态需水定额,最后根据林地分类以及各类林地生态需水定额之间的差异,统计得到各类林地的最小生态需水量和适宜生态需水量。所用数据包括中国 1:400 万政区分布图,1:400 万土壤质地分布图,1:400 万地形图数据,1:10 万土地利用数据(1999/2000),以及泾河流域及周边地区气象站 40 年(1961~2000)逐月的地面气象资料。

3.4 结果分析

3.4.1 泾河流域现有林地最小生态需水量及其季节差异 按现有林地的分布情况,统计各个区域现有林地的最小生态需水量。结果表明,要维持该地区现有林地的基本生存,每年在林地的生长季期间必须消耗的水分总计达到了 $203960\times10^4\text{ m}^3$ 。泾河干流地区和支流地区现有林地的面积相差不大,所以其林地的生态需水量也相差不大(表 3)。

表 3 泾河流域不同地区现有林地最小生态需水量

Table 3 Minimum ecological water requirement of the forestland in Jinghe watershed									
区域 Regions	林地面积(km ²) Forestland area	最小生态需水量 Minimum ecological water(×10 ⁴ m ³)							
		4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	合计 Total
干流区域 Mainstream region	3464.8	10860	13160	18740	18880	18150	11340	8490	99610
支流区域 Branch region	3577.8	11750	14150	19580	19440	18400	12020	9010	104350
合计 Total	7042.6	22600	27310	38320	38310	36550	23360	17500	203960

从整个生长季节的耗水时段上看,则以 6、7、8 三个月份相对最多,而此时也正值泾河流域降雨相对集中的季节,林地水分的消耗也最大。3 个月共计需消耗水分达 $113180\times10^4\text{ m}^3$,占整个生长季节总需水量的 55.5%。其次是春季的 5 月份,因为此时逐渐气温升高,树木的耗水也迅速的增加;最小的则是生长季即将结束的 10 月份,耗水需求量为 $17500\times10^4\text{ m}^3$,占整个生长季的 8.6%(表 3)。

而从林地类型上看,生长季需消耗水量最多的是灌木林地,为 $81500\times10^4\text{ m}^3$,占该地区林地总需水量的 40.0%,其次是疏林地和有林地,整个生长季期间耗水量分别达到了 $67550\times10^4\text{ m}^3$ 和 $45880\times10^4\text{ m}^3$ (表 4)。

表 4 泾河流域现有不同林地类型最小生态需水量

Table 4 Minimum ecological water requirement of the forestland in Jinghe watershed					
类型 Types	最小生态需水量 Minimum ecological water(×10 ⁴ m ³)				合计 Total
	有林地 Forestland	灌木林地 Shrub land	疏林地 Scattered woodland	其他林地 Other forestlands	
面积(km ²)Areas	1461.0	3207.1	2102.2	272.3	7042.6
4 月 Apr.	5000	9000	7590	1010	22600
5 月 May	6090	10910	9110	1210	27310
6 月 Jun.	8670	15330	12640	1680	38320
7 月 Jul.	8680	15320	12610	1700	38310
8 月 Aug.	8330	14630	11990	1610	36550
9 月 Sep.	5200	9330	7770	1060	23360
10 月 Oct.	3910	6980	5830	780	17500
生长季 Growth period	45880	81500	67550	9040	203960

3.4.2 现有林地的适宜生态需水量及其季节差异 以维持林木能正常生长所需要消耗的水量为标准,泾河流域现有林地生长季的适宜生态需水量达到了 $340330\times10^4\text{ m}^3$,这一需水量是林地最小生态需水量的 1.6 倍多。从区域分布上看,泾河干流地区

和支流地区仍相差不大(表 5)。

表 5 泾河流域不同地区现有林地适宜生态需水量

Table 5 Suitable ecological water requirement of the forestland in Jinghe watershed									
区域 Regions	林地面积(km ²) Forestland area	适宜生态需水量 Suitable ecological water(×10 ⁴ m ³)							
		4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	合计 Total
干流区域 Mainstream region	3464. 8	18060	21860	31070	31300	30110	18850	14160	165410
支流区域 Branch region	3577. 8	19720	23700	32800	32570	30780	20180	15160	174920
合计 Total	7042. 6	37780	45560	63870	63870	60890	39030	29320	340330

与最小生态需水量一样,在耗水时段上,主要集中在 6、7、8 三个月份,其次是 5 月份和 9 月份,而 10 月份的需水总量则相对较少(表 5)。

从不同类型林地的适宜生态需水总量来看,生长季节期间的生态需水总量以灌木林地为最多,达到了 136160×10⁴ m³,其次是疏林地和有林地,分别达到了 112480×10⁴ m³ 和 76470×10⁴ m³,而其他林地则相对较少。与最小生态需水量相比,各类林地的适宜生态需水量分别增加了 1.5~1.7 倍(表 6)。

表 6 泾河流域现有不同林地类型适宜生态需水量

Table 6 Suitable ecological water requirement of the forestland in Jinghe watershed					
类型 Types	适宜生态需水量 Suitable ecological water(×10 ⁴ m ³)				
	有林地 Forestland	灌木林地 Shrub land	疏林地 Scattered woodland	其他林地 Other forestlands	合计 Total
面积(km ²)Areas	1461. 0	3207. 1	2102. 2	272. 3	7042. 6
4 月 Apr.	8350	15070	12660	1700	37780
5 月 May	10140	18220	15170	2030	45570
6 月 Jun.	14440	25580	21020	2820	63870
7 月 Jul.	14460	25570	20990	2850	63870
8 月 Aug.	13860	24390	19940	2700	60890
9 月 Sep.	8680	15600	12950	1790	39030
10 月 Oct.	6540	11720	9740	1320	29320
生长季 Growth period	76470	136160	112480	15220	340330

4 讨论

(1)本文从农业气象学理论出发,讨论了林地生态需水的概念及其计算方法,林地最小生态需水量与林地适宜生态需水量。根据植被耗水与土壤含水量关系的分析以及林地土壤水分有效性划分,提出了能维持林木基本生存的最小生态需水量以及能维持林木正常生长的适宜生态需水量的概念及其计算方法。

(2)在 GIS 的支持下,根据泾河流域 40a 的地面气象资料、土壤质地分布图,计算了该地区林地生长季期间的最小生态需水定额和适宜生态需水定额。并在此基础上结合现有林地的分布,计算了该地区现有林地的最小生态需水量和适宜生态需水量。

(3)生态用水是生态学、水文学研究的一个新领域,包括基本概念在内的许多方面尚不很成熟。本文只是从农业气象学角度进行了探索,在具体研究方法也存在着需要改进的地方。

References:

[1] Wang L X. Vegetative eco-environmental construction and water use of eco-environment. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, **7**(3):5~7.

[2] Li L J, Zheng H X. Environmental and ecological water consumption of river system in Haihe-Luanhe basins. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(4):495~499.

[3] Jia B Q, Ci L J. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang. *Acta Ecologia Sinica*, 2000, **20**(2):243~250.

[4] 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.

[5] Wang 万方数据 Yang X L, et al. A study of ecological water requirements in Northwest China I: theoretical analysis. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(1):1~8.

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

[7] Zhang Y, Yang Z F. Minimum ecological water requirement of forestland in Huang-Huai-Hai area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(2):72~75.

[8] Zuo Q T. Study on vegetation ecological use for water resources in arid and semi-arid region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(3):114~117.

[9] Miao H, Wei Y C, Jiang L J, *et al.* Ecological water use and the estimate method. *Acta Ecologia Sinica*, 2003, **23**(6):1156~1164.

[10] Song B Y, Yang J. Discussion on ecological use of water research. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(5):617~622.

[11] Feng X Z, Tao B Y, Min Q W, *et al.* *Principle of Agrometeorology*. Beijing: China Meteorological Press, 1991.

[12] Han X L ed. *Agroclimatology*. Taiyuan: Shanxi Sci-Tech Press, 1999.

[13] Hale M G, Orcutt D M. *The Physiology of Plants Under Stress*. New York: Wiley, 1987.

[14] Larcher W. *Physiological Plant Ecology*. 3rd ed. Berlin: Springer, 1995.

[15] Nilsen E T, Orcutt D M. *Physiology of Plants under Stress: Abiotic Factors*. New York: Wiley, 1998.

[16] Schulze D. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 1986, **37**: 247~274.

[17] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceeding of Royal Society Annually*, 1948, **193**: 454~465.

[18] Zhang J S, Meng P, Yin C J. Review on methods of evapotranpiration of plants. *World Forestry Research*, 2001, **14**(2):23~27.

[19] Jensen M E. *Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements*. New York: American Society of Civil Engineers, 1973.

[20] Wang M B, Li H J. *Research on Hydro-ecology of Artificial Forests in Loess Plateau*. Beijing: China Forestry Press, 2001.

[21] Yang W Z, Shao M A. *Research on Soil Water in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2000.

[22] Yu X X, Chen L H. A study on water balance of protective forest ecosystem in Loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(3):238~245.

[23] Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest ecosystem in Loess area. *Scientetia Silvae Sinicae*, 1996, **32**(4):289~296.

[24] Wu Q X, Yang W Z. *Vegetation Construction and Sustainable Development in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1998.

参考文献:

[1] 王礼先. 植被生态建设与生态用水——以西北地区为例. *水土保持研究*, 2000, **7**(3):5~7.

[2] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量研究. *地理学报*, 2000, **55**(4):495~499.

[3] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算. *生态学报*, 2000, **20**(2):243~250.

[4] 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.

[5] 王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等. 中国西北地区生态需水研究 (1)干旱半干旱地区生态需水理论分析. *自然资源学报*, 2002, **17**(1):1~8.

[6] 王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水研究 (2)基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析. *自然资源学报*, 2002, **17**(2):129~137.

[7] 张远, 杨志峰. 黄淮海地区林地最小生态需水量研究. *水土保持学报*, 2002, **16**(2):72~75.

[8] 左其亭. 干旱半干旱地区植被生态用水计算. *水土保持学报*, 2002, **16**(3):114~117.

[9] 苗鸿, 魏延昌, 姜立军, 等. 生态用水及其核算方法. *生态学报*, 2003, **23**(6):1156~1164.

[10] 宋炳煜, 杨 . 关于生态用水研究的讨论. *自然资源学报*, 2003, **18**(5):617~622.

[11] 冯秀藻, 陶炳炎, 闵庆文, 等. *农业气象学原理*. 北京: 气象出版社, 1991.

[12] 韩湘玲主编. *农业气候学*. 太原: 山西科学技术出版社, 1999.

[18] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 植物蒸散耗水量计算方法综述. *世界林业研究*, 2001, **14**(2):23~27.

[20] 王孟本, 李洪建. *黄土高原人工林水分生态研究*. 北京: 中国林业出版社, 2001.

[21] 杨文治, 邵明安. *黄土高原土壤水分研究*. 北京: 科学出版社, 2000.

[22] 余新晓, 陈丽华. 黄土地区防护林生态系统水量平衡研究. *生态学报*, 1996, **16**(3):238~245.

[23] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. *林业科学*, 1996, **32**(4):289~296.

[24] 吴钦孝, 杨文治. *黄土高原植被建设与持续发展*. 北京: 科学出版社, 1998.