

黄土高原地区森林植被生态需水研究

何永涛¹, 李文华¹, 李贵才², 闵庆文¹, 赵海珍

(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:水土流失是黄土高原面临的主要生态问题,而退耕还林还草、恢复植被是治理水土流失、改善生态环境的必然选择。但黄土高原位于干旱半干旱地区,水资源匮乏是影响该地区植被生态建设的根本因子。因此,植被生态需水研究对于该地区的生态环境建设具有极其重要的意义。本文根据最新遥感图像资料,在 GIS 支持下,计算了黄土高原地区现有林地生长季的最小生态需水量和适宜生态需水量,其结果分别为 $262.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $421.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。除去降雨对林地耗水的补给外,以最小生态需水量为标准,则黄土高原地区在生长季发生水分亏缺的林地面积为 $7\,639.09 \text{ km}^2$,占现有林地总面积的 9.1% ,亏缺水量为 $4.77 \times 10^8 \text{ m}^3$;以适宜生态需水量为标准,则有 57.7% 的现有林地在生长季中发生水分亏缺,亏缺水量为 $58.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

关键词:黄土高原;生态建设;森林植被;生态需水

中图分类号:X171 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)03-0035-05

Ecological Water Requirement of Forests in Loess Plateau

HE Yong-tao¹, LI Wen-hua¹, LI Gui-cai², MIN Qing-wen¹, ZHAO Hai-zhen¹

(1. Institute of Geographical Science and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Converting degraded farmlands to forest or grass lands is the best approach to reduce the soil erosion, the Loess Plateau is faced with most serious ecological disaster. Loess Plateau located in the arid and semi-arid regions is a fragile region with the characteristics of little precipitation and intensive evapotranspiration. Therefore, water is the most important factor limiting the ecological restoration and construction of the vegetation in the region. According to the latest digital land use map and with GIS, the ecological water requirement for forests in Loess Plateau was estimated, and by the water balance of the forest ecosystem in their growing season, the ecological water shortage was calculated. The results revealed that the minimum and suitable ecological water requirement of the forests in Loess Plateau were approximately $262.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $421.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively. Accordingly, if it is taken the minimum ecological water requirement as the quota, the area of forests suffered water shortage was about $7\,639.09 \text{ km}^2$, 9.1% of all, and the ecological water shortage was amounted to $4.77 \times 10^8 \text{ m}^3$; if it is taken the suitable ecological water requirement as the quota, the forest land area suffered water shortage was about 57.7% of all, and the ecological water shortage was roughly $58.55 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Key words: Loess Plateau; ecological restoration and construction; forest vegetation; ecological water requirement

植被生态需水是指为了保证植被生态系统能够正常生长、发育,并确保其生态服务功能得到正常发挥所必须消耗的一部分水量。近年来随着我国水资源供需之间的矛盾日益突出,植被作为环境治理的一项重要措施,其生态需水的研究也越来越受到人们的关注,目前这些研究主要集中在水资源缺乏的干旱和半干旱地区^[1~5]。黄土高原地区是指太行山以西、日月山-贺兰山以东、秦岭以北、阴山以南的广大国土,大致位于北纬 $33^\circ 43' \sim 41^\circ 16'$ 和东经 $100^\circ 54' \sim 114^\circ 33'$ 之间,包括山西省、宁夏回族自治区全部、陕西省的中部和北部、甘肃省的陇中和陇东地区、青海省的东北部、内蒙古自治区的河套平原和鄂尔多斯高原以及河南省的西部丘陵地带,共 287 个县(市、旗)。总面积 $62.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全国国土总面积的 6.5% 。该地区位于干旱半干旱区域,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,因此植被生态需水研究对于该地区的生态环境建设具有极其重要的意义。通过对其生态需水量的研究,将有助于人们对水资源的利用以及区域的水文过程进行新的认识,从而更好地对黄土高原地区水资源综合利用以及改善生态环境进行综合决策,使该地区的生态环境建设达到可持续发展的目标。

1 森林植被生态需水量的内涵与计算方法

在森林生态系统中,蒸散是森林水分最主要的输出项,因此可以将森林蒸散定义为维持森林植被正常生长所必须的水分,即森林的生态需水量。具体

收稿日期:2003-07-30;修订日期:2003-11-30

基金项目:国家科技攻关计划专题项目(2002BA517A12-2);中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程所所长基金项目(SJ10G-C001-01)

作者简介:何永涛(1976-),男,博士,主要从事植被生态学研究。

地讲就是林木生长过程中正常生理活动耗水和林木体表面及林地土壤蒸散耗水量。

气候因子、土壤水分含量以及林木本身种类上的差别是影响林地蒸散耗水最重要的 3 类因子,当某地的气候条件和林木种类一定时,其林地耗水便主要取决于土壤水分的含量,而从植被蒸散与土壤水分的关系来看,当土壤水分充足时,植被蒸散速率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),此时蒸散的速率与土壤水分含量无关,而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^[6,7],此时,土壤水分含量就成为植物实际蒸散的主要制约因素,而根据土壤水分有效性的划分,林木暂时凋萎含水量 (S_s) 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土壤含水量的下限^[8~10],因此,可以将相应的林地耗水量作为林地的最小生态需水量和适宜生态需水量。

在计算森林植被的生态需水量时,首先要确定林地的生态需水定额,即林地生态系统单位面积、单位时间内所需消耗的水量;其次是林地的面积及其分布,其中需水定额的计算公式如(1):

$$E_a = K_s \times K_t \times PE$$

(1)

式中: PE 是由气候条件决定的可能蒸散量,根据 Penman 公式^[11]计算; K_t 是林木耗水系数,与林木种类和生长状况有关,通过实验获得; K_s 是土壤水分修正系数,与土壤质地及土壤含水量有关,通过 JENSEN 公式^[12]确定:

当 $S_w \leq S \leq S^*$ 时,有:

$$K_s = \ln[(S - S_w)/(S^* - S_w) \times 100 + 1] / \ln 01$$

(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。

2 黄土高原地区森林植被生态需水量的计算

2.1 黄土高原地区现有林地的状况

根据 1:100000 土地利用数据数字图(2000 年)的统计结果,黄土高原地区的林地面积为 87 779.98 km²,约占该地区土地总面积的 13.96%,但其具体的生长状况并不十分理想,按覆盖度具体分类后的分布情况见表 1。黄土高原地区的林地以灌木林地为主,占总林地面积的 44.84%,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 23 872.09 km²,占黄土高原林地总面积的 27.20%。

2.2 不同类型林地之间生态需水的差别

土地利用分布图中将林地分为 4 类,即有林地、灌木林地、疏林地和其他林业用地。由于这 4 类林地在外貌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。余新晓、陈丽华等(1996)在晋西黄土区对乔、灌木林地耗水进行了为期 5 年对比观测,结果表明二者的比值大约在 0.8 左右^[13]。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。

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作用^[14~16],因此这类林地应该是属于待改造的类型,在本文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因子影响较多,而且面积又较少,所占比例不是很多,所以在本文中将其按乔木林地的生态需水定额来统计。

2.3 林木的主要耗水时段

根据研究,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 月到 10 月份^[8]。因

表 1 黄土高原地区不同林地类型分布(2000)¹⁾/km²

Table 1 Distribution of forestland in Loess Plateau (2000)/km²

地区	有林地	灌木林地	疏林地	其他林地	合计	面积比例/ %
河南	2 392.73	927.19	1 360.91	57.49	4 738.31	5.40
内蒙古	1 837.74	1 670.73	637.75	124.22	4 270.44	4.86
山西	8 625.43	16 630.93	11 089.75	712.42	37 058.54	42.22
陕西	6 121.64	10 056.53	3 654.68	513.89	20 346.74	23.18
宁夏	332.62	1 184.67	682.57	247.62	2 447.48	2.79
青海	1 250.39	4 594.40	912.61	3.77	6 761.18	7.70
甘肃	3 311.54	4 297.60	4 325.21	222.94	12 157.29	13.85
合计	23 872.09	39 362.05	22 663.49	1 882.35	87 779.98	100.00
面积比例/ %	27.20	44.84	25.82	2.14	100.00	

1) 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2 m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)。

此笔者在计算黄土高原地区林地的耗水支出时,以其生长季(4 ~10 月)为生态需水量的计算时段.

2.4 潜在蒸散(PE)的计算

根据 Penman 公式,利用黄土高原及周边地区 68 个气象站 40 年(1961 ~2000)逐月的地面气象资料,在 PCI 中计算并创建了分辨率为 1 km × 1 km 的黄土高原地区生长季逐月的林地潜在蒸散分布图(限于篇幅,图未列出,下同).

2.5 K_t 和 K_s 的确定

林木耗水系数(K_t) 以黄土高原地区常用造林树种刺槐和油松为代表,根据陈丽华和王礼先的研究结果^[1],取二者的平均值 0.765.

结合黄土高原地区不同土壤类型的水分参数,以及林地最小生态需水定额和适宜生态需水定额的定义,将 $S = S_r$ 和 $S = S_s$ 代入 JENSEN 公式,得到相应的 K_s 值(表 2).其中土壤质地类型根据中国 1: 400 万土壤质地分布图确定.

表 2 不同土壤类型的水分修正参数

土壤质地	最小生态需水定额	适宜生态需水定额
	$K_s, S = S_r$	$K_s, S = S_s$
粗砂土	0.5484	0.9007
砂壤土	0.5564	0.9038
砂粘土	0.5221	0.8903
粉粘土	0.5387	0.8970
粉土	0.5365	0.8962

2.6 生态需水定额的计算

当林地土壤处于林木暂时凋萎含水量时,根据 E_a 的计算公式和黄土高原地区林地各月潜在蒸散分布图,同时结合中国 1: 400 万土壤质地分布图,在 PCI 支持下,计算得到了相应分辨率为 1 km × 1 km 的黄土高原地区林地生长季逐月的最小生态需水定额分布图.以同样的方法计算得到了黄土高原地区林地生长季逐月的适宜生态需水定额分布图.

2.7 生态需水量的计算

在 GIS 支持下,首先从黄土高原地区 2000 年土地利用现状分布图中提取出林地的分布图,并将其转换成 1 km × 1 km 的栅格图,结合黄土高原地区林地月最小生态需水定额分布图和适宜生态需水定额分布图,根据林地的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.

3 结果与分析

3.1 黄土高原地区现有林地最小生态需水量

最小生态需水量计算结果表明:要维持黄土高原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 $262.49 \times 10^8 \text{ m}^3$.其中需消耗水量最多的是灌木林地,为 $104.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,占黄土高原地区林地总需水量的 39.9%,其次是有林地和疏林地,整个生长季期间耗水量分别达到了 $77.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $74.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 3).

从林地整个生长季节的耗水时段上看,以 6、7、8 这 3 个月相对最多,共计需消耗水分达 $141.86 \times 10^8 \text{ m}^3$,占整个生长季节总需水量的 54.0%.其次是春季的 4、5 月份,因为此时气温逐渐升高,树木的耗水也迅速增加,最小的则是生长季即将结束的 10 月份,为 $23.37 \times 10^8 \text{ m}^3$,占整个生长季的 8.9%.

表 3 黄土高原地区现有不同林地类型最小生态需水量 $\times 10^8 / \text{m}^3$

Table 3 Minimum ecological water requirement of the forestland in Loess Plateau $\times 10^8 / \text{m}^3$					
林地类型	有林地	灌木林地	疏林地	其他林地	合计
面积/ km^2	23 872.14	39 362.10	22 663.50	1 882.35	87 780.09
4 月	8.72	12.16	8.49	0.70	30.07
5 月	10.39	14.38	10.08	0.83	35.69
6 月	14.27	19.13	13.66	1.13	48.19
7 月	14.18	18.95	13.50	1.12	47.75
8 月	13.69	18.22	12.95	1.06	45.92
9 月	9.25	12.59	8.93	0.73	31.50
10 月	6.85	9.35	6.64	0.54	23.37
生长季	77.35	104.78	74.25	6.11	262.49

3.2 现有林地的适宜生态需水量

以维持林木能正常生长所需要消耗水量为标准计算的结果表明:黄土高原地区现有林地的适宜生态需水量达 $421.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,这一需水量是林地最小生态需水量的 1.6 倍.从不同类型林地的适宜生态需水总量来看,仍以灌木林地为最多,生长季期间的生态需水总量为 $169.77 \times 10^8 \text{ m}^3$,其次是有林地和疏林地,分别达到了 $128.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $113.59 \times 10^8 \text{ m}^3$,而其他林地则相对较少(表 4).

表 4 黄土高原地区现有不同林地类型适宜生态需水量 $\times 10^8 / \text{m}^3$

Table 4 Suitable ecological water requirement of the forestland in Loess Plateau $\times 10^8 / \text{m}^3$					
林地类型	有林地	灌木林地	疏林地	其他林地	合计
面积/ km^2	23 872.14	39 362.10	22 663.50	1 882.35	87 780.09
4 月	14.46	19.71	13.00	1.12	48.29
5 月	17.22	23.30	15.42	1.33	57.28
6 月	23.62	30.96	20.86	1.81	77.25
7 月	23.48	30.69	20.67	1.80	76.63
8 月	22.66	29.52	19.82	1.71	73.70
9 月	15.35	20.41	13.65	1.18	50.58
10 月	11.38	15.18	10.18	0.86	37.61
生长季	128.16	169.77	113.59	9.81	421.34

与最小生态需水量一样,林地适宜生态需水也主要集中在 6、7、8 这 3 个月,其次是 5 月和 9 月,而 4 月和 10 月的需水总量则相对较少。

3.3 黄土高原地区现有林地的生态亏缺水量

根据林地水量平衡理论,林地生态系统的耗水可以通过降水得到补给,但由于降水的时空变异,必然会有一部分林地的生态需水量得不到满足,使林木的生长受到限制,因此可以将林地生态需水中得不到满足的那部分水量称之为生态亏缺水量。以能维持林木基本生存的最小生态需水量和保障林地正常生长的适宜生态需水量分别为林地耗水的需求标准,相应的由于供给不足而产生的水量亏缺部分可分别称之为最小生态亏缺水量和适宜生态亏缺水量。具体计算公式如(3)。

$$W_i = S_i \times (E_i - R_i) \tag{3}$$

式中, S_i 为 i 处林地的面积; E_i 为 i 处林地生长季的最小(适宜)生态需水定额; R_i 为 i 处林地生长季的降雨量。

3.3.1 现有林地的最小生态亏缺水量

以最小生态需水量为标准,在黄土高原地区除河南和山西外其他地区的现有林地都出现了不同程

度的水分亏缺现象。从发生水分亏缺的林地面积来看(表 5),以内蒙和青海最多,分别达到了 2 059.40 km² 和 2 053.46 km²。其次是宁夏和甘肃,分别为 1 612.62 km²和 1 607.15 km²,陕西省仅有 306.46 km² 的林地发生水分亏缺。

从发生水分亏缺的林地面积所占各省现有林地面积的比例来看,以宁夏最高,在生长季中发生水分亏缺的林地面积所占比例达到了 65.9%;其次是内蒙古和青海省,所占比例分别达到了 48.1%和 30.5%;陕西省最少,仅有 1.5%的林地 在生长季中水分供应得不到满足。与发生水分亏缺的林地面积相对应,水分亏缺量最大的是宁夏,整个生长季节中水分亏缺量达到了 2.04×10^8 m³,占整个黄土高原地区水分亏缺总量的 42.8%。其次是内蒙,生长季期间水分亏缺量达到了 1.26×10^8 m³,而陕西省的水分亏缺量则最少,仅有 0.10×10^8 m³。

而从整个黄土高原地区来看,则有 7 639.09 km² 的林地在整个生长季中存在着水分亏缺现象,约占黄土高原现有林地总面积的 9.1%。这部分林地在整个生长季节中的水分亏缺量达到了 4.77×10^8 m³。

表 5 黄土高原不同地区现有林地最小生态亏缺水量

Table 5 Shortage of minimum ecological water requirement of the forestland in Loess Plateau

区域	甘肃	内蒙	宁夏	青海	陕西	合计
水分亏缺林地面积/km ²	1 607.15	2 053.46	1 612.62	2 059.40	306.46	7 639.09
占相应总面积比/%	13.2	48.1	65.9	30.5	1.5	9.1
生长季亏缺水量×10 ⁸ /m ³	- 0.61	- 1.26	- 2.04	- 0.76	- 0.10	- 4.77

从发生水分亏缺的林地类型来看(表 6),主要以有林地、灌木林地和疏林地为主,三者的面积大致相等,分别为 2 564.42 km²、2 172.89 km² 和 2 505.86 km²,是相应林地总面积的 10.8%、5.7% 和 12.1%,灌木林地所占比例较低。相应地,这 3 类林地在生长季节亏缺的水量也最多,分别达到了 1.85×10^8 m³、 1.10×10^8 m³ 和 1.50×10^8 m³。

表 6 黄土高原地区现有不同林地类型最小生态亏缺需水量×10⁸/m³

Table 6 Shortage of minimum ecological water requirement of the forestland in Loess Plateau×10⁸/m³

林地类型	有林地	灌木林地	疏林地	其他林地	合计
缺水面积/km ²	2 564.42	2 172.89	2 505.86	395.93	7 639.09
占总面积比/%	10.8	5.7	12.1	22.0	9.1
生长季亏缺水量	- 1.85	- 1.10	- 1.50	- 0.32	- 4.77

3.3.2 现有林地适宜生态亏缺水量

以适宜生态需水量为标准,黄土高原地区有 48 646.40 km² 的现有林地存在着水分亏缺,占有

林地总面积的 57.7%,总亏缺水量也达到了 58.55×10^8 m³(表 7)。其中,发生水分亏缺的林地面积和亏缺水量分别是最小生态亏缺水量等级下相应数值的 6.4 倍和 12.3 倍。

从区域分布上看,以山西省最多,发生水分亏缺的林地面积达到了 22 252.25 km²,占黄土高原水分亏缺林地总面积的近 1/2。其次是青海、甘肃、陕西和内蒙,其面积都在 4000 ~ 7000 km²。发生水分亏缺面积最少的是河南,仅有 123.49 km²。

从发生水分亏缺林地所占现有林地的面积比例来看,则以内蒙、青海和宁夏居多,这 3 个地区发生水分亏缺的林地面积几乎占到了该省现有林地面积的 100%。其次是山西省和甘肃省,所占比例分别达到了 66.2%和 57.4%。比例最小的则是地处黄土高原东南的河南省,由于该区域水分条件相对较好,故该区域发生林地水分亏缺的林地仅占 2.6%。

从生长季节亏缺水分的总量来看,仍以山西省

表 7 黄土高原不同地区现有林地适宜亏缺生态需水量

Table 7 Shortage of suitable ecological water requirement of the forestland in Loess Plateau

区域	甘肃	河南	内蒙	宁夏	青海	山西	陕西	合计
水分亏缺林地面积/ km ²	6 975.85	123.49	4 270.55	2 409.99	6 738.99	22 252.25	5 875.28	48 646.40
占相应总面积比/ %	57.4	2.6	100.0	98.5	99.7	66.2	28.9	57.7
生长季亏缺水量 × 10 ⁸ / m ³	- 9.34	- 0.01	- 9.87	- 6.66	- 11.62	- 17.26	- 3.79	- 58.55

为最多,整个生长季节亏缺水量达到了 $17.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,占黄土高原地区水分亏缺总量的 29.5 %。其次则是青海、内蒙和甘肃省,亏缺水量分别达到了 $11.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $9.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $9.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而亏缺水量最少的则是河南省,仅约为 $0.01 \times 10^4 \text{ m}^3$,

占黄土高原林地水分亏缺总量的 0.02 %。

从林地类型来看(表 8),则是以有林地和疏林地的亏缺水量最多,分别达到了 $20.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $20.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占黄土高原地区林地亏缺水量的 34.6 %和 35.8 %。

表 8 黄土高原地区现有不同林地类型适宜亏缺生态需水量

Table 8 Shortage of suitable ecological water requirement of the forestland in Loess Plateau

林地类型	有林地	灌木林地	疏林地	其他林地	合计
水分亏缺林地面积/ km ²	15 325.78	15 354.34	16 600.01	1 366.27	48 646.40
占相应总面积比/ %	64.8	40.2	80.1	76.0	57.7
生长季亏缺水量 × 10 ⁸ / m ³	- 20.27	- 14.92	- 20.93	- 2.43	- 58.55

4 结论与讨论

综上所述,维持黄土高原地区现有林地基本生存的最小生态需水量为 $262.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,而维持其正常生长所需的水量最小为 $421.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,除去降雨补给外,尚分别亏缺水量 $4.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $58.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据统计,黄土高原地区现有水资源总量为 $554.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[17],这也就是说,黄土高原地区现有林地亏缺水量分别占到了该地区水资源总量的 0.9 %和 10.6 %。

生态需水是水资源研究中的一个新领域,本文从林地耗水与土壤水分实际含量之间的关系出发,分别定义了林地最小生态需水和适宜需水的概念,并给出了其计算方法。以黄土高原地区为例,具体分析了不同区域、不同林地类型生态需水的差异,这对于指导该地区植被生态恢复与建设具有宏观的指导意义。但由于黄土高原地区范围广大,许多地方受小地形的影响明显,更加详细的分析还有待于进一步深化。

参考文献:

[1] 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[J].水土保持研究,2001,8(4):161~164.
[2] 王芳,梁瑞驹,杨小柳,陈敏建.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[J].自然资源学报,2002,17(1):1~8.
[3] 王芳,王浩,陈敏建,王研,唐克旺.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[J].自然资源学报,2002,17(2):129~137.
[4] 王礼先.植被生态建设与生态用水——以西北地区为例[J].水土保持研究,2000,7(3):5~7.
[5] 张远,杨志峰.黄淮海地区林地最小生态需水量研究[J].水土保持学报,2002,16(2):72~75.
[6] Larcher W. Physiological Plant Ecology. 3rded[M]. Berlin: Springer,1995.170~236.
[7] Nilsen E T,Orcutt D M. Physiology of Plants under Stress: Abiotic Factors[M]. New York: Wiley,1998.110~136.
[8] 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[J].林业科学,1996,32(4):289~296.
[9] 王孟本,李洪建.晋西北黄土区人工林地土壤水分动态的定量研究[J].生态学报,1995,15(2):178~184.
[10] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000,67~85.
[11] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceeding of Royal Society Annually, 1948, 193: 454~465.
[12] Jensen E (著), 马文(译).耗水量与灌溉需水量[M].北京:农业出版社,1982.36~45.
[13] 余新晓,陈丽华.黄土地区防护林生态系统水量平衡研究[J].生态学报,1996,16(3):238~245.
[14] 郭忠升.水土保持林有效覆盖度及其确定方法研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):67~72.
[15] 吴钦孝,赵鸿雁.黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标[J].水土保持通报,2000,20(5):32~34.
[16] 张光辉.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104~110.
[17] 苏人琼(主编).黄土高原地区水资源问题及其对策[M].北京:科学出版社,1990.14~15.