

# 黄河流域坡高地系统最小生态需水研究

张 远<sup>1, 2</sup>, 杨志峰<sup>1\*</sup>

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘 要:**以保护和恢复流域坡高地生态系统为目的,对坡高地最小生态需水问题进行研究,提出了坡高地生态需水和生态缺水的计算方法。以黄河流域为实例,在 GIS 和遥感技术支持下对坡高地最小生态需水量和缺水量进行了计算,并从时空两个尺度揭示了黄河流域坡高地生态系统最小生态需水的变化规律,研究成果可为流域生态环境建设和水资源合理配置提供依据。

**关键词:**生态需水,坡高地系统,时空变化,黄河流域

**中图分类号:**P64

**文献标识码:**A

流域不仅是一个相对完整的水资源循环单元,而且是一个经济社会活动的集中载体。近年来,随着人类对水资源的需求越来越大,造成生态环境用水往往被经济用水所挤占,导致流域生态系统的结构和功能失调,引发了一系列生态环境问题,例如河道断流、湿地退化、植被荒漠化。为了恢复和保护流域生态环境,实现流域社会、经济和生态的协调发展,生态环境需水研究受到了广泛关注<sup>[1-4]</sup>,成为水资源的核心问题之一,也成为流域生态环境保护的关键。

流域生态系统由河道生态系统、河岸带生态系统和坡高地生态系统三部分组成,在流域生态环境需水研究中,更多地是围绕流域的河道和河岸带生态系统开展进行,探讨流域内的河流、湖泊和湿地保护对水分的需求,而关于流域的坡高地系统生态环境需水的研究相对较少。对于生态环境脆弱的流域来说,水分是坡高地系统保护和恢复的关键因素,坡高地生态系统对水分需求,包括两种方式,一种是植物需水量,它是维持植物生长发育所需要消耗的水分,植物缺水往往造成植被生长发育不良,生产力水平低,与潜在生产力差距大<sup>[5,6]</sup>;一种是土壤需水

量,是指土壤能为植物生长提供足够水分时所需要保持的水分含量,土壤缺水会造成土壤水分含量较低,出现土壤干层现象<sup>[7]</sup>。植物需水与土壤需水之间相互影响,存在着一定联系,本文只对植物需水进行了研究,并以我国北方黄河流域为实例,计算其坡高地系统的最小生态需水量,分析时空变化特征及其缺水规律,从而为黄河流域的植被建设提供依据。

## 1 坡高地系统生态需水计算方法

坡高地系统生态需水量是维持坡高地系统中的植物生长发育,保障其发挥所期望的生态环境功能所需要消耗的水量,表现为植被蒸散发,其大小与气候因素、植被类型以及植被生长状况等因素相关,可部分或者完全被有效降水所满足的。在水资源配置过程中,人们更为关心的是其不能够被有效降水所满足的那部分水量,也就是生态需水与实际耗水的差,即生态缺水,这部分需要占用径流水资源或者由人类补充配置。因此,本文不仅研究坡高地系统生态需水量,而且分析了缺水状况,具体方法如下。

### 1.1 生态需水计算方法

收稿日期(Received date):2003-11-12;改回日期(Accepted):2004-01-11。

基金项目(Foundation item):国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999043605);国家自然科学基金重点项目(50239020)[Supported by Chinese National Key Basic Science Project(G1999043605);Key Program of National Nature Science Foundation of China(50239020)]

作者简介(Biography):张远(1970-),男(汉),辽宁沈阳人,北京师范大学环境科学专业博士[Zhang Yuan was born in 1970 and come from Liaoning Province. Male (the Han Nationality), he acquired doctor in Beijing Normal University]

\* 通讯联络人(Corresponding author):杨志峰[Yang Zhifeng], zfyang@bnu.edu.cn

坡高地系统生态需水实质是在期望水分条件下的植被耗水能力,可用如下公式计算

$$E = ET_o \times K_c \times K_s \quad (1)$$

式中  $E$  为生态需水量(mm);  $ET_o$  为参考作物蒸散量(mm),  $K_c$  为植物系数,  $K_s$  为土壤期望水分条件对蒸散的限制系数。  $ET_o$  根据 FAO Penman-monteith 公式<sup>[8]</sup> 确定,  $K_c$  是采用 FAO 的非完全覆盖状态的自然植被的植物系数计算方法进行确定<sup>[8]</sup>,  $K_s$  采用如下公式计算<sup>[9]</sup>

$$K_s = \begin{cases} 0 & W < W_p \\ (W - W_p) / (W_k - W_p) & W_k \geq W \geq W_p \\ 1 & W > W_k \end{cases} \quad (2)$$

式中  $W$  为土壤期望水分含量,  $W_k$  和  $W_p$  分别为土壤临界含水量和土壤凋萎湿度, 大约为田间持水量的 70%~80%<sup>[10]</sup>, 这里取 75%。

坡高地系统植物对土壤水分存在一个耐性限度, 如果土壤水分过少或过多, 都会影响植物的正常生长发育。因此, 坡高地系统生态需水存在一个上下极限, 即存在最小生态需水和最大需水量, 研究发现满足植被生长需求的最小土壤期望水分在黄河流域大约为田间持水量的 50%~64% 间<sup>[11]</sup>, 本文取 55%, 并以此计算坡高地系统最小生态需水量。

## 1.2 生态缺水分析方法

生态缺水是生态需水与植物实际耗水之差, 即:

$$D = E - E_a \quad (3)$$

式中  $D$  为生态缺水量(mm);  $E$  为生态需水量(mm);  $E_a$  为植物耗水量(mm), 相当于植被在实际土壤水分条件下的耗水量, 计算公式同于公式(1)和(2), 只是其中的  $K_s$  代表的是土壤实际水分条件下的土壤限制系数, 需要根据土壤实际含水量进行计算。其中, 最小生态缺水量为最小生态需水量与实际耗水之差。

## 2 数据准备

### 2.1 气候数据

采用全国气象站 30 年(1961-1990 年)累积年平均气候资料(中国气象局气象中心提供), 包括台站经纬度、海拔高度、月总降水量、月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月平均水汽压、月平均风速、月平均相对湿度和月平均日照百分率等。在 Arcinfo 平台下, 新建气象站点的经纬度坐标点图, 在 Grid 模块下采用 Kriging 方法对气候数

据进行插值, 空间分辨率为 8 km×8 km。其中, 月均温度、月均最高温度和月均最低温度在校正至海平面高度后, 再进行 Kriging 插值, 根据 DEM 数据对插值图重新进行温度高度纠正。将插值结果从 Grid 格式转换成 GridAscii 格式, 在 TurboC 下编程计算各月的潜在蒸散量。

### 2.2 遥感数据

1. 利用美国 NASA Pathfinder AVHRR 的 8 km 旬 NDVI 数据(1982-1999 年)计算植被覆盖度。为消除云的影响, 取每月 3 旬的 NDVI 最大值作为月 NDVI 数据, 以月 NDVI 的多年平均值作为基本数据计算植被覆盖度。初始影像投影为 Goode Interrupted Homolsine Projection, 这里将其转换为等积圆锥投影, 再截取出黄河流域。其中, 区域植被覆盖度与 NDVI 的关系参照文献<sup>[12]</sup>和<sup>[13]</sup>。

2. 在  $K_c$  计算中, 根据土地覆盖类型设定植被高度, 设定农作物高度 0.40 m, 草生长高度 0.20 m, 灌丛 0.80 m, 阔叶林和针叶林 12 m, 土地覆盖类型图来自于美国 USGS 地球资源观测系统数据中心(EROS-EDC)。此外,  $K_{cmin}$  取 0.15。根据处理好的遥感数据和气候数据, 包括土地覆盖类型、植被覆盖度、月均风速、月均最小相对湿度, 在 TurboC 下编程计算月  $K_c$  值。

### 2.3 土壤实际水分

黄河流域土壤实际水分含量, 根据土壤水平衡方程确定, 如下式所示

$$W_i = W_{i-1} + P_i - E_{a_i} - F_i \quad (4)$$

式中  $W_i$ 、 $W_{i-1}$  分别表示第  $i$  月和第  $i-1$  月的土壤水分含量(mm);  $P_i$  表示第  $i$  月降水量(mm);  $E_{a_i}$  表示第  $i$  月的实际蒸散量(mm);  $F_i$  为第  $i$  月的径流损失量(mm)。

将式(1)和(2)代入式(4), 以月为步长作离散化处理, 将超过田间持水量的土壤水分含量当作径流损失项( $F$ ), 则方程可简化为下式<sup>[14]</sup>

$$W_i = \min \left[ W_{i-1} + P_i - \min \left( \frac{W_i - W_f}{W_k - W_f}, 1 \right) \times ET_o \times K_c, W_{FC} \right] \quad (5)$$

式中  $W_{FC}$  为土壤田间持水量(mm)。

凋萎湿度( $W_f$ )和田间持水量( $W_{FC}$ )是根据 1998 年 258 个农业气象观测站的实测资料确定<sup>[15]</sup>。在模拟过程中, 设定土壤深度为 1 m, 土壤水分初始值为田间持水量的一半, 将 30 年累积年平均气候数据作为输入, 多次循环计算直到土壤水分

含量比较稳定为止,结果即为黄河流域各月的多年平均土壤实际水分含量。

### 3 坡高地系统最小生态需水与缺水计算

首先,分别计算每个网格单元的各月最小生态需水量和生态缺水量。然后,按下列方法对计算结果进行统计分析。各单元的年生生态需水量为植物生长期(4-10月)的月生态需水量之和,年生生态缺水量为植物生长期(4-10月)月生态缺水量之和,具体如下所示:

$$E_{(x,y)} = \sum_{i=4}^{10} E_{(x,y)i} \quad (6)$$

式中  $E_{(x,y)}$  为流域  $(x,y)$  单元的年生生态需水量(mm),  $E_{(x,y)i}$  为流域  $(x,y)$  单元的  $i$  月生态需水量,  $i$  为月份。

$$D_{(x,y)} = \sum_{i=4}^{10} D_{(x,y)i} \quad (7)$$

式中  $D_{(x,y)}$  为流域  $(x,y)$  单元的年生生态缺水量(mm),  $D_{(x,y)i}$  为流域  $(x,y)$  单元的  $i$  月生态缺水量,  $i$  为月份。

### 4 黄河流域坡高地系统最小生态需水和缺水规律分析

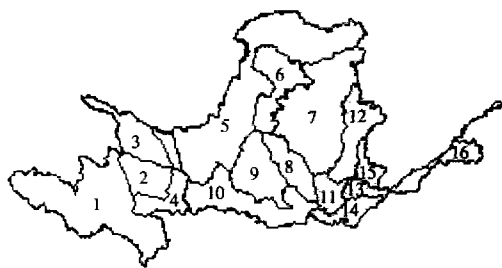
根据多年平均气候数据计算参考作物蒸散量,根据植被覆盖度计算  $K_c$ ,根据最小土壤期望水分计算  $K_s$ ,在此基础上根据公式(1)计算坡高地系统最小生态需水量。坡高地系统实际耗水量根据公式(5)模拟流域土壤实际含水量结果进行计算,最小生态缺水量是根据最小生态需水量和实际耗水量的差进行计算。

为了分析方便,将黄河流域划分为16个区(图1),分别对每个分区的坡高地系统最小生态需水量和缺水量进行统计分析。

#### 4.1 坡高地系统最小生态需水变化规律

黄河流域坡高地系统年最小生态需水空间分布如图2所示。其中,年最小生态需水量小于200 mm的区域占流域总面积的13%,200~300 mm之间占59%,300~400 mm之间占23%,大于400 mm占5%。从空间分布规律看,坡高地系统最小生态需水与植被类型、覆盖度、高程和地貌类型有很大相关性。生态需水高值区(>300 mm)主要集中在农田区和森林区,包括河套平原、银川平原、太行山脉、

黄龙山-子午岭-六盘山山脉、秦岭北麓、汾渭河口平原、湟水流域河谷区、黄河下游地区等,覆盖度均在0.55以上,植被类型分别为落叶阔叶林、落叶针叶林和农作物。



1-龙羊峡以上;2-龙兰区间;3-湟水流域;4-洮河流域;5-兰河区间;6-内流区;7-河龙区间;8-北洛河流域;9-泾河流域;10-渭河流域;11-龙三区间;12-汾河流域;13-三花区间;14-伊洛河流域;15-沁河流域;16-黄河下游

图1 黄河流域水资源分区图

Fig. 1 The water resource division map of the Yellow River Basin

最小生态需水低值区(<200 mm)主要分布在黄河流域中部和西北部,高程在1500 m以上,植被类型主要为草地和灌丛,具体包括:(1)鄂尔多斯高原的库布齐沙漠区,植被类型荒漠灌丛,以耐干旱、耐寒的荒漠性灌木为主,油蒿、柠条、中间锦鸡儿稀疏灌丛为优势种,覆盖度在0.25以下;(2)黄土高原部分区,植被类型干草原,覆盖度在0.4以下;(3)青藏高原区,植被类型为高山草甸和草原,覆盖度平均为0.58。

各分区间的最小生态需水平均值差异较大,变化在223~394 mm之间,如图3所示。总体来看,黄河流域西北部各分区(河龙区间及其以上地区)的生态需水量偏低,一般<300 mm,东南部各分区(龙三区间及其以下)的需水量偏高,一般300 mm以上(除泾河流域),其中最小的是龙羊峡以上区间,最大是三花区间。

总体上,黄河流域坡高地系统年最小生态需水量平均为268 mm,全流域年均最小生态需水在81~629 mm之间变化,表现出较大的空间差异性。从植被类型看,落叶阔叶林年最小需水平均为412 mm,落叶针叶林约373 mm,农作物为324 mm,耕草混合为281 mm,灌丛为269 mm,草地为232 mm,苔原为202 mm。另外,坡高地系统最小生态需水具有明显的季节变化特征,如图4所示。其中,不同植被类型的最小生态需水表现出不同步性,落叶阔叶林是在6月达到最大,苔原是在8月达到最

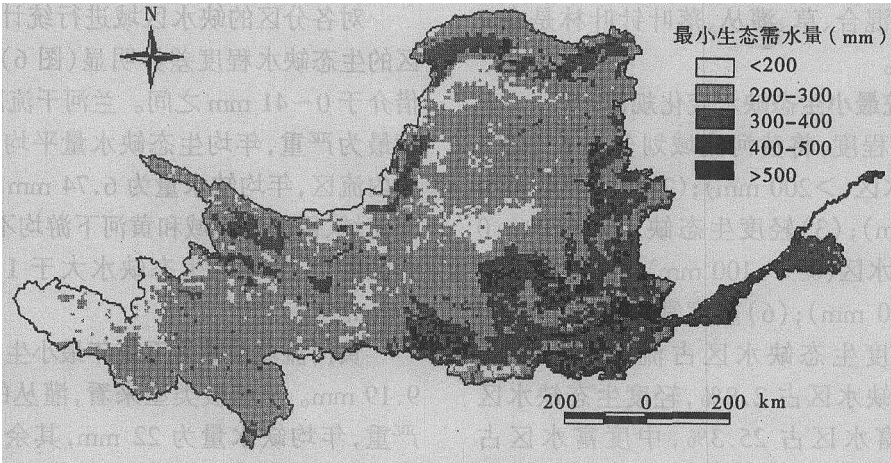


图 2 黄河流域坡高地系统年最小生态需水量空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of annual minimum plant water requirements of highland ecosystem in the Yellow River Basin

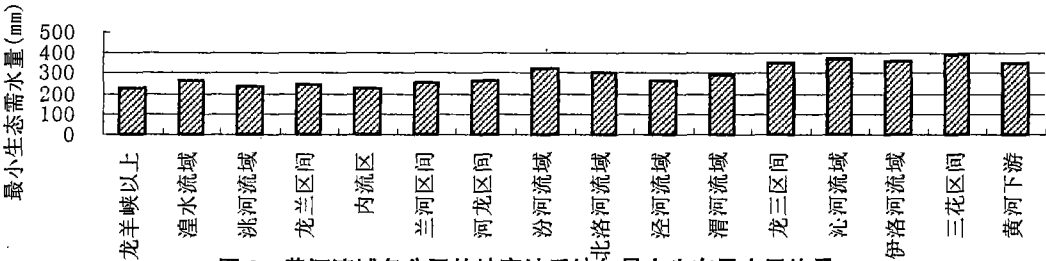


图 3 黄河流域各分区的坡高地系统年最小生态需水平均值

Fig. 3 Average annual minimum plant water requirements for different divisions in the Yellow River Basin

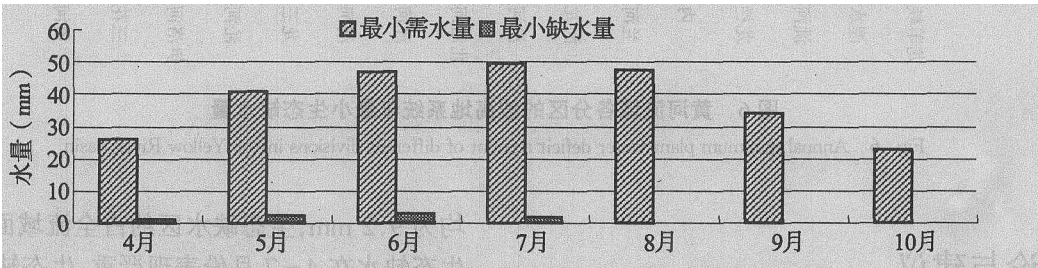


图 4 黄河流域 4-10 月的坡高地系统最小生态需水量和缺水变化

Fig. 4 The monthly minimum plant water requirement and water deficit from April to October in the Yellow River Basin

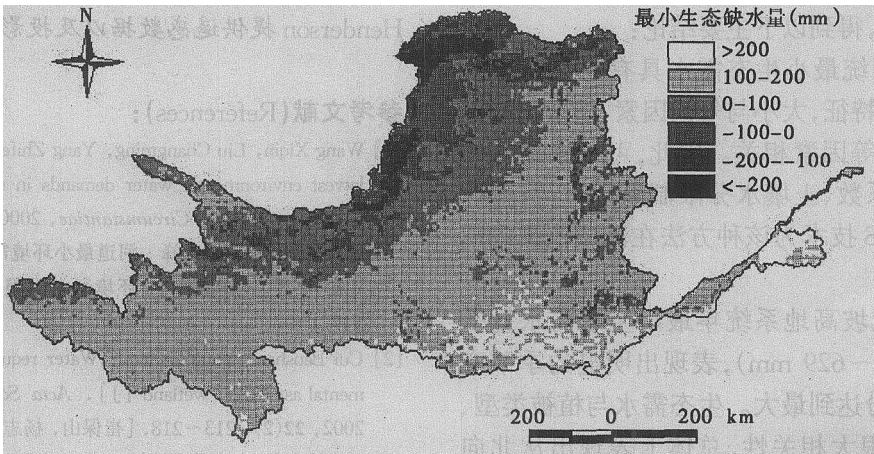


图 5 黄河流域坡高地系统最小生态缺水分区图

Fig. 5 The districts of annual minimum plant water shortage of highland ecosystem in the Yellow River Basin

大,而作物、耕草混合、草、灌丛、落叶针叶林是在7月达到最大需水。

#### 4.2 坡高地系统最小生态缺水变化规律

按生态缺水程度,将黄河流域划分为6个区:(1)重度生态缺水( $>200$  mm);(2)中度生态缺水( $200\sim100$  mm);(3)轻度生态缺水( $100\sim0$  mm);(4)轻度富水区( $0\sim-100$  mm);(5)中度富水区( $-100\sim-200$  mm);(6)重度富水区( $<-200$  mm)。其中,重度生态缺水占流域总面积的0.7%,中度生态缺水占2.8%,轻度生态缺水占9.6%,轻度富水区占25.3%,中度富水区占55.6%,重度富水区占6.1%。具体分布如图5所示。从空间分布上看,生态缺水主要分布在北部(河套灌区),中部及南部为植物富水区,从北向南生态缺水程度减轻,富水程度加重。

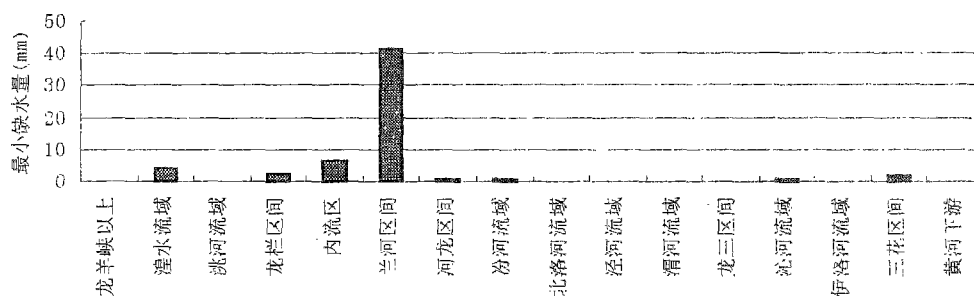


图6 黄河流域各分区的坡高地系统年最小生态缺水量

Fig. 6 Annual minimum plant water deficit amount of different divisions in the Yellow River Basin

## 5 结论与建议

通过对黄河流域坡高地系统最小生态需水时空变化规律的研究,得到以下主要结论:

1. 坡高地系统最小生态需水具有明显的季节变化和空间差异特征,大小与气候因素、植被类型以及植被生长状况等因素相关。因此,可根据参考作物蒸散量、植物系数、土壤水分限制系数进行计算。同时,遥感与GIS技术为该种方法在流域范围应用提供了支持。

2. 黄河流域坡高地系统年最小生态需水量平均为268 mm(81~629 mm),表现出明显的季节变化规律,在7月份达到最大。生态需水与植被类型、覆盖度、高程有很大相关性,总体上表现出从北向南、从西向东的减少趋势。

3. 黄河流域坡高地系统年最小生态缺水量平

对各分区的缺水区域进行统计分析,发现各分区的生态缺水程度差异明显(图6),分区平均缺水介于0~41 mm之间。兰河干流区间生态缺水程度最为严重,年均生态缺水量平均为41 mm,其次为内流区,年均缺水量为6.74 mm,洮河流域、北洛河流域、伊洛河流域和黄河下游均不缺水。在16个分区中,5个年均生态缺水大于1 mm,11个小于1 mm。

黄河流域坡高地系统年最小生态缺水量平均为9.19 mm。从植被类型来看,灌丛的缺水程度最为严重,年均缺水量为22 mm,其余依次为作物(13 mm)、草地(5 mm)、落叶阔叶林和落叶针叶林(4 mm)、耕草混合(1.3 mm)、苔原(0 mm)。黄河流域坡高地系统缺水季节主要集中在4~7月份,在8~10月份缺水程度显著减轻,如图6所示。

均为9.2 mm,生态缺水约占全流域面积的13%。生态缺水在4~7月份表现严重,生态缺水空间差异大。

致谢:感谢U.C. Berkeley的齐晔教授和Mark Henderson提供遥感数据以及投影转换程序。

#### 参考文献(References):

- [1] Wang Xiqin, Liu Changming, Yang Zhifeng. Method of resolving lowest environmental water demands in river course [J]. Theory [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 21(5): 544~547. [王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(I)-理论[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(5): 544~547.]
- [2] Cui Baoshan, Yang Zhifeng. Water requirement for eco-environmental aspect on wetland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(2): 213~218. [崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(2): 213~218.]
- [3] Zhang Yuan, Yang Zhifeng. Minimum ecological water requirement of forestland in Huang-Huai-Hai Area [J]. *Journal of Soil*

- and Water Conservation, 2002, 16(2): 72~75. [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.]
- [4] Zhang Yuan, Yang Zhifeng. Calculation method of ecological water requirement for forestland and its application to Huang-Huai-Hai Region [J]. *Chinese Journal of Application Ecology*, 2002, 13(12): 1566~1570. [张远, 杨志峰. 林地生态需水量计算方法与应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1566~1570.]
- [5] Wang Binrui, Wang Baitian. The runoff forestry of the Loess Plateau [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1996, 29~32. [王斌瑞, 王百田. 黄土高原径流林业[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996, 29~32.]
- [6] He Kangning. Study on precipitation potential productivity of afforestation by water harvesting in semi-arid region on Loess Plateaus [D]. Beijing Forestry University, Doctor paper, 2000, 120. [贺康宁. 黄土半干旱区集水造林水分生产潜力研究[D]. 北京林业大学林业生态工程学院, 博士论文, 2000, 120.]
- [7] Hou Qingchun, Han ruilian, Li Hongping. On the problem of vegetation reconstruction in the Yan's experimental area: conditions of soil water and division of vegetation reconstruction [J]. *Research of soil and water conversation*, 2000, 7(2): 103~110. [侯庆春, 韩蕊莲, 李宏平. 关于黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究—土壤水分状况及植被建设区划[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 103~110.]
- [8] Allen Richard G., Luris S. Pereria, Dirk Raes, *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage [A]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations[C]. 1998, 56.
- [9] Liu Shaomin, Liu Zhihui. Study on calculation model of field evapotranspiration for different crops[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 66~69. [刘绍民, 刘志辉. 作物农田蒸散计算模型的研究[J]. 生态学杂志, 1998, 17(4): 66~69.]
- [10] Milly, P. C. D.. Potential evaporation and soil moisture in general circulation models [J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(3): 209~226.
- [11] Zhang Guangcan, He Kangning, Liu Xia. Study on the suitable soil moisture condition for forest growth in the semiarid region on the Loess Plateaus [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 1~5. [张光灿, 贺康宁, 刘霞. 黄土高原半干旱区林木生长适宜土壤水分环境的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 1~5.]
- [12] Gutman G., Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533~1543.
- [13] Chen Yunhao, Li Xiaobing, Shi Peijun. Regional evapotranspiration estimation over northwest China using remote sensing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3): 261~268. [陈云浩, 李晓兵, 史陪军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 261~268.]
- [14] Sun Rui. Study of net primary productivity (NPP) for terrestrial vegetation in China based on AVHRR-NDVI [D]. Beijing Normal University, 1998, 54~55. [孙睿. 基于 AVHRR-NDVI 资料的中国陆地植被净第一性生产力研究 [D]. 北京师范大学资源与环境科学系, 博士学位论文, 1998, 54~55.]
- [15] Guo Jianping, Gao Suhua, Wang Guanghe *et al.* Chinese Cloud, Water Resources and Soil Moisture Resources[M]. Beijing: Meteorology Press, 2001. [郭建平, 高素华, 王广河, 等. 中国云水资源和土壤水资源[M]. 北京: 气象出版社, 2001.]

## Minimum Plant Water Requirements and Variation of Highland Ecosystem in the Yellow River Basin

ZHANG Yuan<sup>1, 2</sup>, YANG Zhifeng<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Sciences, State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Key Laboratory for water and sediment sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** We calculate the minimum plant water requirements for highland ecosystem in the Yellow River Basin, and analyze their spatio-temporal variation by using the remote sensing data and Meteorological data as input. Moreover, we estimate the plant water shortage in the Yellow River Basin, which is calculated by comparing minimum plant water requirements with the actual plant water consumption. The actual plant water consumption of highland ecosystem was estimated with the soil water balance model. The results indicate that the minimum plant water requirements for highland ecosystem in the Yellow River Basin are about 268 mm and the relative water shortage is about 9.19 mm during the growth season (from April to October). Both the minimum plant water requirements and water shortage change gradually with the growth of vegetation during the growth season. The minimum plant water requirements come to the maximum on July, and water deficit occurs mainly from April to July. The differences of the minimum plant water requirements among regions are also obvious. The plant water requirements increased gradually from the north to the south and the west to the east, except that the plant water requirements is high in Hetao Plain and Huangshui Watershed. The plant water shortage area locates in the northwest of the Yellow River Basin, and is about 13% of the total watershed area. The minimum water requirements for different kinds of vegetations are different. The water requirements of deciduous broad-leaf forest (equal to 412 mm) is the maximum among the minimum water requirements of all kinds of vegetation lived in the Yellow River Basin, and the others is deciduous coniferous forest (374 mm), crop (324 mm), mixed crop-grass (281 mm), shrub (269 mm), grass (232 mm) and alpine tundra (202 mm) in turn. The water shortage of shrub is the maximum among the minimum water shortages of all kinds of vegetation lived in the Yellow River Basin, which is 22 mm, and the others is crop (13 mm), grass (5 mm), deciduous coniferous forest and deciduous broad-leaf forest (4 mm), mixed crop-grass (1.3 mm) and alpine tundra (0 mm) in turn.

**Key Words:** plant water requirements; highland ecosystem; spatio-temporal variation; the Yellow River Basin