

DOI: 10.5846/stxb201707031197

吴建强, 李林, 谭娟, 郭晋川, 王敏, 吴卫熊, 白杨, 黄凯, 何令祖. 峰丛洼地植被生态需水定额及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(19): - .

Wu J Q, Li L, Tan J, Guo J C, Wang M, Wu W X, Bai Y, Huang K, He L Z. Ecological-water requirement of vegetation and its driving factors in karst peak-cluster area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

## 峰丛洼地植被生态需水定额及其影响因素

吴建强<sup>1</sup>, 李 林<sup>2</sup>, 谭 娟<sup>1</sup>, 郭晋川<sup>2</sup>, 王 敏<sup>1</sup>, 吴卫熊<sup>3,\*</sup>, 白 杨<sup>4</sup>, 黄 凯<sup>2</sup>,  
何令祖<sup>2</sup>

1 上海市环境科学研究院, 上海 200233

2 广西壮族自治区水利科学研究院, 南宁 530023

3 河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056038

4 中国科学院西双版纳热带植物园, 勐仑 666303

**摘要:**以广西田东县峰丛洼地区域为研究对象, 基于野外实地观测, 构建了适宜的植被生态需水计算模型, 估算了区域典型植物群落不同季节的植被生态需水及生态缺水定额, 并分析了其主要影响因素。研究表明, 4 种优势植物群落的生态需水定额均是 8 月最大、1 月最小; 五节芒群落的生态需水定额最大, 月均最大、适宜和最小需水定额分别为 36.85、25.80 mm 和 23.95 mm, 灰毛浆果楝最小, 分别为 23.99、16.80 mm 和 15.60 mm; 生态缺水定额呈现出与生态需水一致的特征。植被生态需水定额与植被覆盖度、叶面积指数、空气温度和土壤容重呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 而与田间持水量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 植被覆盖度、土壤容重、土壤含水率和潜在蒸散 4 个指标是影响植被生态需水定额的主要因素。

**关键词:**峰丛洼地; 植被; 生态需水; 生态缺水; 影响因素

## Ecological-water requirement of vegetation and its driving factors in karst peak-cluster area

WU Jianqiang<sup>1</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, TAN Juan<sup>1</sup>, GUO Jinchuan<sup>2</sup>, WANG Min<sup>1</sup>, WU Weixiong<sup>2,\*</sup>, BAI Yang<sup>3</sup>, HUANG Kai<sup>2</sup>,  
HE Lingzu<sup>2</sup>

1 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China

2 Guangxi Institute of Hydraulic Research, Nanning 530023, China

3 School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

4 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China

**Abstract:** A suitable ecological-water requirement of vegetation model was developed based on field observations in the karst peak-cluster depression area in Tiandong County of Guangxi Province. The ecological-water requirement and ecological water deficiency of vegetation in different seasons were estimated, and the main driving factors were analyzed. The results showed that the greatest ecological-water requirement of 4 dominant vegetation was in August, and the least was in January. The ecological-water requirement of *Miscanthus floridulus* is the greatest; the monthly average maximum, optimal, and minimum water requirements for this species were 36.85mm, 25.80mm, and 23.95mm, respectively. The ecological-water requirement of *Cipadessa cinerascens* is the least; the average maximum, optimal, and minimum water requirements for this species were 23.99mm, 16.80mm, and 15.60mm, respectively. The pattern of ecological-water deficiency is the same with the ecological-water requirement. The ecological-water requirement of vegetation has a significant positive correlation with

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679141); 广西水利科技项目 (201418, 201517, 201612)

收稿日期: 2017-07-03; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 99677226@qq.com

vegetation coverage, leaf area index, air temperature, and soil bulk density; however, there is a significant negative correlation between ecological-water requirement and field water holding capacity. Vegetation coverage, soil bulk density, soil moisture content, and potential evapotranspiration are the main driving factors affecting the ecological-water requirement of vegetation.

**Key Words:** karst peak-cluster area; vegetation; ecological-water requirement; ecological-water deficiency; driving factors

生态需水是在区域自然资源特别是水土资源开发利用条件下,为维护以河流为核心的流域生态系统动态平衡、避免生态系统发生不可逆的退化所需要的临界水分条件<sup>[1]</sup>。植被生态需水是指为保障植被能正常生长、发育或植被生态系统维持健康并发挥正常生态系统服务功能而需要消耗的最低水量<sup>[2]</sup>,被认为是退化生态系统恢复与重建的关键<sup>[3]</sup>。不同的植物类型和物种组成与当地的水资源供给状况相结合具有不同的需水特征。因此,确定合理的植被生态需水区间,对实现水资源的优化配置和生态环境的可持续发展具有重要意义。目前,植被生态需水的研究在国际上已受到广泛关注,并已成为生态学、水文学和地理学等研究的热点<sup>[3]</sup>。国外对于生态需水的研究主要集中于水生生物生长和河流流量的关系以及河流流量与维持生态系统完整性的关系等方面。而国内现有研究主要集中于西北、华北的干旱、半干旱以及半湿润地区<sup>[4]</sup>。如刘新华等<sup>[5]</sup>以干旱区的塔里木河流域为研究对象,对林地的生态需水特征进行了分析;何永涛等<sup>[6]</sup>针对黄土高原不同林地类型,计算了不同林地的生态需水定额和适宜生态需水量;周丹等<sup>[7]</sup>利用荒漠植被面积并参考作物蒸散量( $ET_0$ )计算西北干旱区近 30 a 间植被生态需水量,发现该地区植被生态需水量以  $0.11 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$  的速率逐年减少,并主要受气候因素影响;吕明权等<sup>[8]</sup>通过对东北沟流域植被生态需水量的研究表明,该地区植被生态需水量的直接影响因素是土地利用和景观格局;汤洁等<sup>[9]</sup>研究发现不同时空尺度土地利用的改变会破坏区域的水资源供需平衡,从而直接影响区域生态需水量。但是对南部喀斯特峰丛洼地地区的植被生态需水研究却较少,区域植被生态需水及其主要影响因素有待进一步揭示。

广西岩溶峰丛洼地区,气候湿润、降水充沛,降水变化率大且季节分配不均。但是在大多数区域,山多坡陡、河谷深切,且喀斯特溶裂、漏斗发育,导致地表径流要么快速流入深切河谷,要么快速进入地下水,难以被地表植被利用,植被对水分的调节作用也较小。加之土层浅薄、储水能力低、入渗系数大,常常出现蒸发量大于降雨量的情况。因此,这一地区水分亏缺严重,生态需水不足问题显得尤为突出。

本研究以广西田东县作为岩溶峰丛洼地区的典型代表,基于水文、气象及地理条件等资料,结合野外实地观测和植被生态需水定量计算模型构建,研究峰丛洼地不同植物类型在不同时间段的生态需水和生态缺水定额,以期为该区域水资源的高效利用、优化配置与生态环境可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于广西百色市田东县( $23^{\circ}16'—24^{\circ}01' \text{ N}$ ,  $106^{\circ}53'—107^{\circ}26' \text{ E}$ ),县域内峰丛洼地地貌区面积为  $510.79 \text{ km}^2$ ,占县域总面积的 18.19%,是广西岩溶峰丛洼地的典型代表<sup>[10]</sup>。属南亚热带季风气候区,年均气温  $21.9^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $1172.3 \text{ mm}$ ,年均蒸发量  $1774.7 \text{ mm}$ ,蒸发量大于降水量,干热是区域主要的气候特点。区域内峰丛洼地地形主要表现为四周挺拔的山峰,封闭其间的是较为平直的洼地,相对高差通常为  $200—300 \text{ m}$ ,最高可达  $600 \text{ m}$ 。该区域人地矛盾突出,人为干扰强烈,水土流失严重,生态环境恶化,植被覆盖率较低,加之土层浅薄,土壤入渗系数大,降水经地表快速进入地下,难以被地表植被吸收,生态缺水现象严重。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 植被生态需水定额计算方法

植被生态需水定额受植被类型、气候及土壤水分等因素综合影响<sup>[11]</sup>。本研究采用国际通用的 Penman-

Monteith 公式<sup>[12]</sup>来计算植被生态需水定额。

$$ET_q = K_s \times K_l \times ET_0 \quad (1)$$

式中,  $ET_q$  为植被生态需水定额(mm);  $K_l$  为植被生态耗水系数,即植被最大需水量与潜在耗水量的比例系数;  $K_s$  为土壤水分调节系数;  $ET_0$  为植被潜在蒸散量(mm)。

### 1.2.2 植被生态缺水定额计算方法

植被生态缺水定额( $Q$ )根据植被生态需水定额与水分供给特征计算<sup>[13]</sup>,如下式所示:

$$Q = ET_q - \alpha \cdot P \quad (2)$$

式中,  $P$  为研究区实际的降水量,mm;  $\alpha$  为降雨入渗系数。

### 1.2.3 植被潜在蒸散量计算方法

根据联合国农粮组织(FAO)的定义,植被潜在蒸散量是指从表面开阔、高度一致、生长旺盛、供水充足、完全遮盖地面 8—15 cm 高的绿色草地上所蒸发、腾发的速率<sup>[14]</sup>,它主要与当地的气候条件有关。根据研究区域多年气象资料,采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式进行计算,公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

式中,  $ET_0$  为植被潜在蒸散量(mm);  $\Delta$  为饱和水汽压对温度曲线的斜率(kPa/°C);  $R_n$  为参考作物表面净辐射(MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  $G$  为土壤热通量(MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  $\gamma$  为干湿表常数(kPa/°C);  $e_s$  为饱和水汽压(kPa);  $e_a$  为实际水汽压(kPa);  $U_2$  为地表 2 m 的平均风速(m/s)。

### 1.2.4 植被生态耗水系数计算方法

植被生态耗水系数计算公式<sup>[15-16]</sup>:

$$K_l = MDVI \times k \quad (4)$$

式中,MDVI 是植被覆盖度,%;  $k$  是植被生态耗水校正系数。

### 1.2.5 土壤水分调节系数计算方法

土壤水分调节系数与土壤含水量及土壤质地有关,反映了土壤水分条件对植物蒸散量的影响,采用 Jensen 公式计算土壤水分调节系数<sup>[7]</sup>:

$$K_s = \ln \left[ \frac{S - S_w}{S^* - S_w} \times 100 + 1 \right] / \ln 101 \quad (5)$$

式中,  $S$  为土壤的实际含水量(g/kg);  $S^*$  为土壤临界含水量(g/kg),一般为田间持水量的 70%—80%;  $S_w$  为土壤凋萎含水量(g/kg)。

$$S_w = f \times (1.34 - 1.5) \quad (6)$$

式中,  $f$  为土壤吸湿系数,%。土壤吸湿系数及田间持水量均需现场采集原状土样后进行测定。

当土壤水分充足时,植物蒸散速率与土壤水分含量无关,植物蒸散速率取决于气象因素和植物类型,取值 1.0,在此情况下,实际蒸散量即为潜在蒸散量,也就是植被最大需水定额。研究表明,田间持水量的 70% 是比较适耕、适播的土壤含水量。根据土壤水分数量指标的划分,毛管断裂含水量是植被灌溉的下限,大致相当于田间持水量的 65% 左右。因此可将田间持水量的 70% 和毛管断裂含水量时的植被耗水量分别作为植被的适宜和最小生态需水量,由此确定植被生态需水定额等级<sup>[11]</sup>,如表 1 所示。

### 1.2.6 植物群落调查

2015 年 1 月,在田东县峰丛洼地研究区域开展植被样方调查,结合海拔垂直梯度及坡度坡向变化,随着海拔由低到高,样区植物群落呈现明显的农作物-草本-灌木-乔木的演替规律,其主要优势植物群落分别为:甘蔗(*Saccharum officinarum*)群落、五节芒(*Miscanthus floridulus*)群落、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)群落和青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)群落。

表 1 植被生态需水定额等级  
Table 1 The fixed level of vegetation ecological water requirements quota

| 田间持水比例/%<br>Field water holding ratio | 等级<br>Level | 生态意义<br>Ecological significance |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 65                                    | 最小生态需水定额    | 维持植被基本生存                        |
| 70                                    | 适宜生态需水定额    | 保证植被正常生长                        |
| 100                                   | 最大生态需水定额    | 植被生长状况最佳,生产力最高                  |

1.2.7 野外观测方法

(1) 观测时间及样地设置

分别于 2015 年冬(1 月)、春(4 月)、夏(8 月)和秋(11 月)4 个季节,开展田东县峰丛洼地样区优势植物群落实地观测。每个群落在相同海拔高度各选择 3 个样地,大小分别为青冈 20 m×20 m,灰毛浆果楝 10 m×10 m,五节芒和甘蔗 2 m×2 m,现场记录各样地海拔、坡向、坡度及植物群落高度、盖度、物种组成等指标。

(2) 蒸腾速率测定

采用美国 LI-COR 公司的 LI-6400 便携式光合呼吸测量系统测定植物蒸腾速率,测定时间均为晴朗天气的 9:00—10:00 间。每个样地选取 3 株长势良好、无病虫害的植物作为样木,每株样木再分别选取高、中、低 3 片健康叶片进行蒸腾速率测定,每个叶片连续采集 6 个稳定的数据,测定结果取其平均值。

(3) 叶面积指数测定

采用美国 LI-COR 公司的 LAI-2200 植物冠层分析仪对每个样地的叶面积指数 LAI 进行观测。每个样地沿对角线测定 3 次,每次记录 10 个数据,单次测定结果取其平均值。

(4) 环境因子测定

环境因子主要测定土壤容重、土壤含水率、土壤吸湿系数、田间持水量和空气温湿度等指标,每个样地均重复测定 3 次。其中,土壤容重采用环刀法,在样地样木周边去除表面凋落物后,采用 100 cm<sup>3</sup> 环刀采集好土壤后带回实验室测定;土壤含水率采用烘干法,在各样地样木附近采集 0—20 cm 深度的土样 80—100 g,现场去除根系和杂物并测定湿重后,即刻带回实验室在 105℃ 下烘干至恒重,通过计算获取;土壤吸湿系数则是同样在各样地样木附近采集 0—20 cm 深度土样 100 g,带回实验室烘干至恒重后置于敞开空间,自由吸收空气水分至饱和后称重,通过计算获取;田间持水量按 NY/T1121.1 规定的方法,在各样地样木附近用 100 cm<sup>3</sup> 环刀采集原状土样后,带回实验室测定并通过计算获得;空气温湿度采用手持式 RS 温湿度计在测定植物蒸腾速率的同时进行测定。

1.2.8 数据分析方法

利用 SPSS 软件,采用单因子分析法,揭示植被生态需水定额与环境因子之间及各环境因子相互之间的关系。采用多元线性逐步回归方法分析现场观测数据,确定植被生态需水定额的主要影响因子及其影响程度。

2 结果与分析

2.1 植被生态需水定额

基于 4 种优势植物群落样地植被生理生态、环境因子的测定结果,计算不同植被的最佳生态需水、适宜生态需水和最小生态需水定额,结果如图 1 所示。可知,4 种植物群落最大、适宜、最小生态需水定额在不同季节呈现同样的规律,均是 8 月份最大,1 月份最小;甘蔗群落年度月均最大、适宜和最小生态需水定额分别为 26.23、18.36 mm 和 17.05 mm,五节芒群落分别是 36.85、25.80 mm 和 23.95 mm,灰毛浆果楝群落分别是 23.99、16.80 mm 和 15.60 mm,青冈群落分别是 34.71、24.30 mm 和 22.56 mm;4 种植物群落最大生态需水定额明显高于适宜生态需水定额,两者相差均达 7.00 mm 以上,而适宜与最小生态需水定额相差较小,均小于 2.00 mm。整体而言,灰毛浆果楝群落在整个生长周期的生态需水定额均小于其他 3 种植物群落,说明灰毛浆果楝在整个生长过程中满足自身生长所需的水分为 4 种植物中最低;而五节芒群落则是最高,说明与其他 3 种植物相

比,五节芒需要更多的水分才能维持其正常生长。

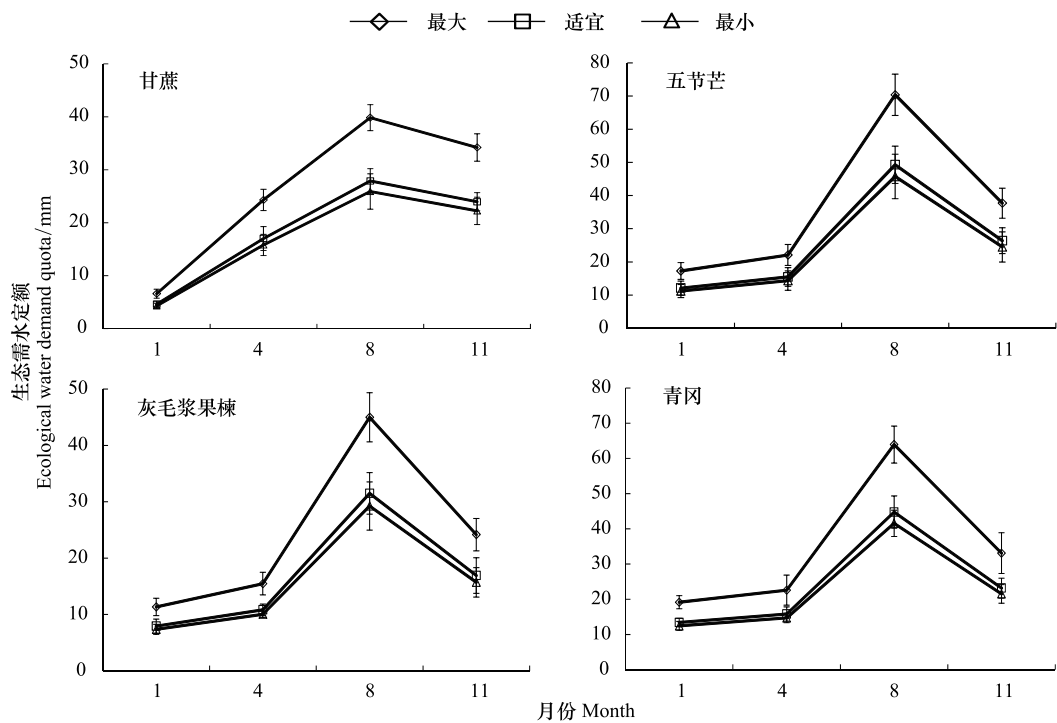


图 1 不同植物生态需水定额对比

Fig.1 The comparison of vegetation ecological water requirements quota

根据式(2)计算获得 4 种植物群落生态缺水定额如表 1 所示。结果显示,4 种植物群落的生态缺水定额也均是 8 月份最高,11 月份次之,1 月份最低;甘蔗群落年度月均最大、适宜和最少生态缺水定额分别为 19.64、11.77 mm 和 10.46 mm,五节芒群落分别是 30.26、19.21 mm 和 17.37 mm,灰毛浆果楝群落分别是 17.40、10.20 mm 和 9.00 mm,青冈群落分别是 28.12、17.71 mm 和 15.97 mm。同样,五节芒的生态缺水定额最高,灰毛浆果楝最低,说明 4 种植物整个生长过程中,五节芒缺水状况比较严重,而灰毛浆果楝缺水量则相对较低。

表 2 田东样点不同植被类型生态缺水定额特征

Table 2 Vegetation ecological water deficiency quota in Tiandong County

| 月份<br>Month   | 物种<br>Species | 生态缺水定额 Ecological water shortage quota/mm |             |            |
|---------------|---------------|---|-------------|------------|
|               |               | 最大 MAX                                    | 适宜 Suitable | 最少 MIN     |
| 1 月 January   | 甘蔗            | 4.84±0.51                                 | 2.86±0.32   | 2.53±0.20  |
|               | 五节芒           | 15.49±0.83                                | 10.32±1.24  | 9.46±0.58  |
|               | 灰毛浆果楝         | 9.60±1.48                                 | 6.19±0.28   | 5.63±0.52  |
|               | 青冈            | 17.42±1.22                                | 11.67±1.25  | 10.71±0.86 |
| 4 月 April.    | 甘蔗            | 17.21±2.20                                | 9.92±0.66   | 8.71±0.84  |
|               | 五节芒           | 14.98±1.45                                | 8.36±0.48   | 7.26±0.56  |
|               | 灰毛浆果楝         | 8.39±0.87                                 | 3.74±0.21   | 2.97±0.16  |
|               | 青冈            | 15.52±1.27                                | 8.74±0.41   | 7.61±0.38  |
| 8 月 August    | 甘蔗            | 27.17±2.93                                | 15.22±1.02  | 13.23±1.13 |
|               | 五节芒           | 57.74±3.43                                | 36.62±2.72  | 33.10±1.09 |
|               | 灰毛浆果楝         | 32.32±2.33                                | 18.83±1.25  | 16.58±1.37 |
|               | 青冈            | 51.29±4.52                                | 32.11±2.71  | 28.91±1.80 |
| 11 月 November | 甘蔗            | 29.34±2.66                                | 19.08±0.82  | 17.37±1.29 |
|               | 五节芒           | 32.83±2.44                                | 21.52±2.13  | 19.64±1.77 |
|               | 灰毛浆果楝         | 19.30±1.54                                | 12.05±0.73  | 10.84±1.08 |
|               | 青冈            | 28.25±2.36                                | 18.31±2.08  | 16.66±1.62 |

## 2.3 植被生态需水影响因子分析

### 2.3.1 单因子分析

借助 SPSS 软件,采用单因子分析方法,揭示植被生态需水定额与植物生理生态、环境因子之间,以及各因子之间的关系,结果如表 2 所示。植被生态需水定额与叶面积指数、植被覆盖度、空气温度和土壤容重等均呈现出极显著的正相关关系 ( $P<0.01$ ),相关系数分别为 0.68、0.70、0.51 和 0.63;与土壤田间持水量则呈现出显著负相关,相关系数为-0.417 ( $P<0.05$ )。各影响因子间也呈现出了不同的相关关系,如植被覆盖度和叶面积指数之间呈现极显著的相关性 ( $P<0.01, R^2 = 0.55$ ),而海拔与大气压之间呈极显著负相关 ( $P<0.01, R^2 = -0.88$ ),表明这些因子之间并不是相互独立的,而是相互影响的。进而说明植被叶面积指数、覆盖度以及土壤容重、含水率等因子并不是独立作用于植被生态需水定额,而是通过相互作用产生的综合影响。

表 3 植被生态需水单因子分析

Table 3 Single factor analysis of vegetation water requirements

| 因子<br>Factor   | 叶面积指数<br>Leaf area index | 植被覆盖度<br>Vegetation coverage | 大气压<br>Atmospheric pressure | 空气温度<br>Air temperature | 空气湿度<br>Air humidity | 海拔<br>Altitude | 土壤容重<br>Soil bulk density | 土壤含水率<br>Soil water content | 土壤吸湿系数<br>Soil water absorption coefficient | 土壤田间持水量<br>Field capacity | 潜在蒸散<br>Potential evapotranspiration |
|--|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|
| 植被覆盖度<br>Leaf area index   | 0.55 **                  |                              |                             |                         |                      |                |                           |                             |   |                           |                                      |
| 大气压<br>Atmospheric pressure                                      | 0.237                    | 0.193                        |                             |                         |                      |                |                           |                             |   |                           |                                      |
| 空气温度<br>Air temperature  | 0.264                    | 0.396 *                      | -0.224                      |                         |                      |                |                           |                             |   |                           |                                      |
| 空气湿度<br>Air humidity   | 0.338                    | 0.082                        | -0.211                      | 0.025                   |                      |                |                           |                             |   |                           |                                      |
| 海拔<br>Altitude   | -0.267                   | -0.204                       | -0.877 **                   | -0.087                  | 0.064                |                |                           |                             |   |                           |                                      |
| 土壤容重<br>Soil bulk density  | -0.211                   | 0.103                        | -0.293                      | 0.091                   | -0.177               | 0.415 *        |                           |                             |   |                           |                                      |
| 土壤含水率<br>Soil water content                                      | 0.553 **                 | 0.215                        | 0.467 **                    | -0.194                  | 0.336                | -0.549 **      | -0.621 **                 |                             |   |                           |                                      |
| 土壤吸湿系数<br>Soil water absorption coefficient                      | 0.443 *                  | 0.271                        | 0.159                       | 0.367 *                 | 0.219                | -0.401 *       | -0.538 **                 | 0.478 **                    |   |                           |                                      |
| 土壤田间持水量<br>Field capacity  | 0.03                     | -0.249                       | 0.231                       | -0.277                  | 0.137                | -0.333         | -0.772 **                 | 0.543 **                    | 0.591 **                                    |                           |                                      |
| 潜在蒸散<br>Potential evapotranspiration                             | 0.561 **                 | 0.53 **                      | -0.141                      | 0.804 **                | 0.292                | -0.121         | 0.184                     | 0.079                       | 0.478 **                                    | -0.418 *                  |                                      |
| 植被生态需水定额<br>Ecological water requirements<br>quota of vegetation | 0.678 **                 | 0.704 **                     | 0.124                       | 0.505 **                | 0.348                | -0.326         | 0.626 **                  | 0.471 **                    | 0.204                                       | -0.417 *                  | 0.821 **                             |

\*\* 表示极显著水平,  $P<0.01$ ; \* 表示显著水平,  $P<0.05$

### 2.3.2 多元回归分析

影响植被生态需水定额的各因子间具有较高的相关性,说明它们之间可能存在严重的自相关,为进一步研究影响植被生态需水定额的关键因子及其影响程度,采用多元线性逐步回归,对数据进行分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,仅有植被覆盖度、土壤容重、土壤含水率和潜在蒸散 4 个指标被选入预测模型,相关水平均达到了极显著 ( $P<0.01$ ),说明这 4 个指标是影响植被生态需水定额的主要指标。从相关系数来看,植被覆盖度的回归系数最大,达到 25.39,说明其对植被生态需水定额的影响最大;其次是土壤容重,回归系数为 15.45。

结合多元线性逐步回归分析的结果,得出植被生态需水定额的预测模型,模型的  $R^2 = 0.913$ ,说明入选模

型的因子对植被生态需水定额能进行很好的预测。

$$ET_q = -62.98 + 25.39VC + 15.45SBD + 0.755SWC + 0.379 ET_0 \quad (R^2 = 0.913)$$

(7)

式中,  $ET_q$  为植被生态需水定额;  $VC$  为植被覆盖度;  $SBD$  为土壤容重;  $SWC$  为土壤含水率;  $ET_0$  为植被潜在蒸散量。

表 4 植被生态需水多因子回归分析 ( $R^2 = 0.913$ )

Table 4 Multiple factors regression analysis of vegetation ecological water requirements

| 因子<br>Factor                      | 系数<br>Coefficient | T 统计量<br>T-statistic (T) | 显著性系数<br>Significance (Sig.) | 方差膨胀因子<br>Variance Inflation Factor (VIF) |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|---|
| 常数 Constant                       | -62.98            | -5.883                   | 0.00                         | 0.00                                      |
| 潜在蒸散 Potential evapotranspiration | 0.379             | 8.974                    | 0.00                         | 1.441                                     |
| 土壤含水率 Soil water content          | 0.755             | 6.108                    | 0.00                         | 1.882                                     |
| 植被覆盖度 Leaf area index             | 25.39             | 3.733                    | 0.001                        | 1.499                                     |
| 土壤容重 Soil bulk density            | 15.45             | 2.272                    | 0.031                        | 1.862                                     |

3 讨论

作为生态需水研究的重要组成部分,植被生态需水可为区域植被生态恢复和重建提供重要科学依据<sup>[17]</sup>。本研究选取的岩溶峰丛洼地区域石漠化及水土流失严重,生态环境恶劣,植被退化较为明显<sup>[18]</sup>,因此,开展该区域植被生态需水研究显得尤为必要。自然植被具有较强的水源涵养功能<sup>[19-21]</sup>,它可能通过冠层截留、枯枝落叶层截持和土壤保持等方式对降水进行截留<sup>[22-23]</sup>,从而消减降水进入地下水或形成地表径流的量,这对于生态缺水严重的广西岩溶峰丛洼地区域的植被来说是非常重要的。因此,为实现生态系统和水资源的可持续和高效管理,应充分发挥自然植被的水源涵养功能。而优化配置植被种类与构成,是充分发挥植被水源涵养功能的重要举措。例如,郭军庭等<sup>[24]</sup>对晋西黄土区小流域现有林分进行调整,从而使其水源涵养功能提高了 35.99%。陈祥伟等<sup>[25]</sup>运用层次分析法对嫩江上游二道桥小流域水源涵养林植被的空间配置结构进行优化,使其土壤层有效贮水量提高了 33.05%,水源涵养能力显著增加。

然而,峰丛洼地区域独特的水文特征,主要表现为石灰性淋溶系数大,水土流失严重。该区域的植被常受温湿、降水时空分布不均的限制,导致地带性植被退化、种属减少、结构单一的格局。尽管本研究中选用的优势植物,在其他区域也有分布,但独特的区域特征,形成了这些植被独特的需水习性<sup>[26]</sup>。本研究结果表明,草本植物五节芒,在整个生长周期内,生态需水定额最大,其次是乔木青冈,灌木灰毛浆果楝的生态需水定额最小。因此,该区域植被生态恢复应选择以灌木为主乔木为辅的植物群落结构,如灰毛浆果楝、青冈等。本研究结果部分得出了 4 种优势植物在不同季节的最小生态需水定额,说明了不同的植物对水分需要的最低状态及其敏感性。而从不同植被生态缺水的情况来看,8 月的生态缺水定额最多,尤其是五节芒。当水分供给低于最小生态需水定额时,植物的生长就会受到抑制,并导致该区域的植被与生态退化。说明在炎热的夏季,虽然降雨量有所增加,但是在高温状态下,植物和地表蒸散量也显著提高,在地层不保水的岩溶峰丛洼地区,就会使得植物缺水现象更加凸显,水分的保持和水资源的合理配置,在高温季节对于维持植被生态需水就显得尤为重要。

优化群落中植物配置可从较大尺度上缓解区域水资源短缺状况,然而不同植物对环境因子有着不同的适应性,通过分析不同环境因子对峰丛洼地区植被生态需水定额的影响研究,则可为该区域的植被生态需水调控提供理论指导。本研究表明,该区域植被生态需水定额与植被覆盖度、叶面积指数、土壤容重、空气温度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与土壤含水率呈显著正相关( $P<0.05$ ),而与田间持水量呈显著负相关( $P<0.05$ )。逐步回归分析结果表明,植被覆盖度、土壤容重、土壤含水率和潜在蒸散 4 个因子入选回归方程,且能解释 91.3%的植被生态需水定额的变化。这说明,在消除各环境因子之间的自相关关系后,最终确定对植被生态

需水定额产生影响的环境因子为植被覆盖度、土壤容重和土壤含水率,其中植被生态需水则与植被覆盖度呈正比。相关研究也表明,地表径流量随植被覆盖度的增加而减少<sup>[8,27-28]</sup>。因此,在植被恢复过程中,可通过人为调控植被覆盖度以确定地表径流和植被生态需水之间的平衡点,从而缓解区域生态缺水问题。而植被生态需水定额之所以与土壤容重和土壤含水率呈正比,可能是因为土壤容重越大,土壤越紧实且储水能力也越低,土壤含水率也随之降低<sup>[29-31]</sup>,而植被生长所需的其他水分反而增大;而植被生态需水定额与田间持水量成负相关,则是因为它与土壤水分调节系数成反比,而土壤水分调节系数与土壤临界水量(田间持水量的 70%—80%计)成反比所致,究其原因,田间持水量越高,植物可利用水分越多,调节系数也就越小,从而需水定额就会降低。由此可见,峰丛洼地区土壤结构的改良对缓解区域生态缺水也尤为关键。

#### 4 结论

(1)从不同生长周期来看,峰丛洼地区 4 种典型植物群落生态需水定额均呈现出夏季最高、冬季最低的变化趋势;就不同植物类型而言,灰毛浆果楝群落月均最大、适宜和最小生态需水定额最低,分别为 23.99、16.80 mm 和 15.60 mm,五节芒群落则最大,分别为 36.85、25.80 mm 和 23.95 mm。而植被生态缺水定额呈现出与需水定额一致的变化规律。

(2)相关性分析表明,植被生态需水定额与植被覆盖度、叶面积指数、空气温度和土壤容重呈极显著正相关,而与土壤田间持水量呈显著负相关;且各影响因子之间也存在一定的相关关系,表明植物生理生态和环境因子对植被生态需水定额的影响是综合而非独立的。

3)逐步回归分析表明,峰丛洼地区植被生态需水定额的预测模型为  $ET_q = -62.98 + 25.39VC + 15.45SBD + 0.755SWC + 0.379ET_0$ ,  $R^2 = 0.913$ ,回归系数从大到小的因子依次是植被覆盖度、土壤容重、土壤含水率以及潜在蒸散,该模型能较好地对植被生态需水定额进行预测。

#### 参考文献(References):

- [1] Si J H, Feng Q, Yu T F, Zhao C Y. Inland river terminal lake preservation: Determining basin scale and the ecological water requirement. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(7): 3327-3334.
- [2] Wilson T B, Witkowski E T F. Water requirements for germination and early seedling establishment in four African savanna woody plant species. *Journal of Arid Environments*, 1998, 38(4): 541-550.
- [3] Thevs N, Peng H Y, Rozi A, Zerbe S, Abdusalih N. Water allocation and water consumption of irrigated agriculture and natural vegetation in the Aksu-Tarim river basin, Xinjiang, China. *Journal of Arid Environments*, 2015, 112: 87-97.
- [4] 王浩,陈敏建,秦大庸.西北地区水资源合理配置和承载能力研究.郑州:黄河水利出版社,2003.
- [5] 刘新华,徐海量,凌红波,白元,傅萼仪,赵新风.塔里木河下游生态需水估算.中国沙漠,2013,33(4): 1198-1205.
- [6] 何永涛,李文华,李贵才,闵庆文,赵海珍.黄土高原地区森林植被生态需水研究.环境科学,2004,25(3): 35-39.
- [7] 周丹,沈彦俊,陈亚宁,郭英,张勃.西北干旱区荒漠植被生态需水量估算.生态学报,2015,34(3): 670-680.
- [8] 吕明权,王继军.不同土地利用/覆盖情景下东北流域植被生态需水量及其对产流影响.自然资源学报,2012,27(2): 243-253.
- [9] 汤洁,吴佳曦,徐海红,王博,林晓晨,刘畅.二龙山水库水源保护区土地利用变化对生态需水量影响分析.环境工程,2014,32(1): 46-49, 59-59.
- [10] 欧阳资文,宋同清,彭晚霞,曾馥平.广西岩溶峰丛洼地内涝现状分析与综合治理对策研究.农业现代化研究,2011,32(1): 107-110.
- [11] 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(12): 1566-1570.
- [12] 杨志峰,陈贺.一种动态生态环境需水计算方法及其应用.生态学报,2006,26(9): 2989-2995.
- [13] 何永涛,闵庆文,李文华.植被生态需水研究进展及展望.资源科学,2005,27(4): 8-13.
- [14] 郝博,栗晓玲,马孝义.甘肃省民勤县天然植被生态需水研究.西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(2): 158-164.
- [15] 邱振存,管健.园林绿化植物灌溉需水量估算.节水灌溉,2011,(4): 48-50, 54-54.
- [16] Escalona J M, Fuentes S, Tomás M, et al. Responses of leaf night transpiration to drought stress in *Vitis vinifera* L. *Agricultural Water Management*, 2013, 118: 50-58.
- [17] 胡广录,赵文智,谢国勋.干旱区植被生态需水理论研究进展.地球科学进展,2008,23(2): 193-200.
- [18] 罗为群,张辉旭,蒋忠诚,金克漠,李衍青,王志广.岩溶峰丛洼地不同环境水土流失差异及防治研究——以广西果化岩溶生态研究基

地为例. 地球学报, 2014, 35(4): 473-480.

- [19] Fallah M, Kavian A, Omidvar E. Watershed prioritization in order to implement soil and water conservation practices. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1248.
- [20] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.
- [21] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [22] 胡健, 吕一河, 张琨, 陶蕴之, 李婷, 任艳娇. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异. *生态学报*, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [23] 吴庆贵, 邹利娟, 吴福忠, 杨万勤, 张素兰. 涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 254-258.
- [24] 郭军庭, 张志强, 唐丽霞. 晋西黄土区小流域典型植被水文功能优化研究. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 36-40.
- [25] 陈祥伟, 王文波, 夏祥友. 小流域水源涵养林优化配置. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 267-271.
- [26] 常宝. 降雨强度、坡度和植被覆盖度对紫色土坡面水文过程的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [27] Deng X H, Wu K Y, Jiang Z C, Gao L P. Eco-environmental effects and deterioration of karst peak-cluster depression in Southwest China. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2009, 40(7): 857-863.
- [28] 李元寿, 王根绪, 王一博, 王军德, 贾晓红. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究. *水科学进展*, 2006, 17(5): 616-623.
- [29] 马玉莹, 雷廷武, 张心平, 陈逸欣. 体积置换法直接测量土壤质量含水率及土壤容重. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 86-93.
- [30] 范鹏飞, 孙西欢. 不同容重土壤对单坑入渗土壤含水率的影响. *山西水利科技*, 2012(4): 1-2, 6-6.
- [31] 崔建平, 田立文, 郭仁松, 林涛, 徐海江, 李发. 深翻耕作对连作滴灌棉田土壤含水率及含盐量影响的研究. *中国农学通报*, 2014, 30(12): 134-139.