

喀斯特峰丛洼地 4 种典型植物蒸腾作用及其影响因素

谭娟¹, 王敏¹, 郭晋川², 吴卫熊², 何令祖¹, 黄凯¹, 吴建强¹

(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, 广西南宁 530023)

摘要: [目的] 对广西壮族自治区喀斯特峰丛洼地 4 种典型植物(甘蔗、五节芒、灰毛浆果楝和青冈)蒸腾作用及其影响因素进行研究, 为进一步开展区域植被生态需水研究提供科学依据。[方法] 于 2015 年 4 月至 2016 年 1 月对 4 种主要植物群落不同季节蒸腾速率(T_r)、叶面积指数(LAI)和相关环境因子开展现场观测。[结果] 4 种植物 T_r 夏季与春、秋、冬 3 季呈极显著差异($p < 0.01$), 不同植物类型其 T_r 也存在差异, 其中, 甘蔗 T_r 的季节变化为 96.55~197.42 g/(m²·h), 五节芒为 95.26~169.13 g/(m²·h), 灰毛浆果楝为 97.20~239.11 g/(m²·h), 青冈四季 T_r 为 81.65~124.42 g/(m²·h)。4 种植物 T_r 均与空气温度(T_a)呈极显著($p < 0.01$)或显著正相关关系($p < 0.05$), 与土壤含水率(SWC), LAI, 土壤容重(ρ_b), 空气相对湿度(R_H)呈显著或极显著相关关系。SWC 和 T_a 对甘蔗 T_r 起主导作用, 是主要决策变量; T_a 是五节芒 T_r 的主要决策变量; SWC 和 ρ_b 是灰毛浆果楝 T_r 的主要影响因子; LAI, SWC 和 T_a 是青冈 T_r 的主要影响因子。[结论] 研究区域 4 种典型植物蒸腾作用存在差异, 且均呈季节性变化趋势, 不同植物 T_r 影响因素不同, 可通过人工诱导水、光、热等环境因子进而合理调控植被生态需水。

关键词: 喀斯特; 峰丛洼地; 植物; 蒸腾速率; 环境因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0016-06

中图分类号: Q945.17

文献参数: 谭娟, 王敏, 郭晋川, 等. 喀斯特峰丛洼地 4 种典型植物蒸腾作用及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 16-21. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.003; Tan Juan, Wang Min, Guo Jinchuan, et al. Transpiration of 4 typical plants and its affecting factors in karst peak cluster depression area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 16-21. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.003

Transpiration of 4 Typical Plants and Its Affecting Factors in Karst Peak Cluster Depression Area

TAN Juan¹, WANG Min¹, GUO Jinchuan², WU Weixiong², HE Lingzu², HUANG Kai², WU Jianqiang¹

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China;

2. Guangxi Hydraulic Research Institute, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract: [Objective] Studying the transpiration and its influencing factors of four typical plants communities (*Saccharum officinarum*, *Miscanthus floridulus*, *Cipadessa cinerascens* and *Cyclobalanopsis glauca*) in karst peak cluster depression areas of Guangxi Zhuang Autonomous Region to provide scientific basis for the research on regional vegetation ecological water demand. [Methods] Field measurements of transpiration rate (T_r), leaf area index (LAI), and related environmental factors in different seasons were conducted from April 2015 to January 2016. [Results] There was an extremely significant difference ($p < 0.01$) between plants transpiration rates in summer and in other three seasons. The seasonal change of transpiration rates of *Saccharum officinarum*, *Miscanthus floridulus*, *Cipadessa cinerascens* and *Cyclobalanopsis glauca* were 96.55~197.42, 95.26~169.13, 97.20~239.11 and 81.65~124.42 g/(m²·h), respectively. An extremely significant and positive correlation ($p < 0.01$) or a significant positive correlation ($p < 0.05$) was found between transpiration rate and air temperature for the four typical plants, and extremely significant or significant correlation significant correlation with soil water content (SWC), LAI, soil bulk (ρ_b), and air relative

收稿日期: 2017-06-02

修回日期: 2017-06-20

资助项目: 广西水利科技项目“广西岩溶峰丛洼地区水资源综合利用技术研究”(201418; 201517; 201612)

第一作者: 谭娟(1987—), 女(汉族), 湖北省十堰市人, 硕士, 工程师, 主要从事生态环境调查监测评估方面的研究。E-mail: tanj@saes.sh.cn.

通讯作者: 吴建强(1977—), 男(汉族), 江苏省宜兴市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境评估与修复方面的研究。E-mail: wujq@saes.sh.cn.

humidity(R_H). Air temperature(T_a) and soil water content(SWC) were the key variables for transpiration in *Saccharum officinarum*; Air temperature was the key variables for *Miscanthus floridulus*; In the case of *Cipadessa cinerascens*, soil water content and soil capacity were the main influence factors on transpiration; Leaf area index, soil water content and air temperature were the main influence factors on transpiration for *Cyclobalanopsis glauca*. [Conclusion] The differences between transpiration rates of different plant communities existed and all of them showed seasonal variation trends. The effects of environmental factors on transpirations of the 4 typical plants were different, which can be artificially induced to regulate the ecological water demand of vegetation.

Keywords: karst; peak cluster depression; vegetation; transpiration rate; environmental factors

喀斯特地区与黄土、沙漠、寒漠并列为中国 4 大生态环境脆弱区,生态系统稳定性和抗干扰性差,在人为干扰下极易退化^[1]。并且该区域可溶岩造壤能力低,地下水深埋,土层浅薄,土壤持水能力差,易导致地表水流失。峰丛洼地作为喀斯特地区独有的地貌类型,在中国的广西壮族自治区广有分布,该区域虽然降雨充沛,但受喀斯特地貌的影响,水资源短缺仍是区域生态系统健康和稳定的主要限制因素^[2-3]。生态需水近年来在水资源利用领域广受关注,其基本概念是指提供一定质量和数量的水给自然生境,以求最低程度改变自然生态系统的过程,并保证区域的物种多样性和生态完整性^[4]。生态需水同水资源短缺、危机与配置密切相连,因此,对于水资源短缺的喀斯特峰丛洼地而言,研究其区域生态需水对于合理利用、配置区域水资源和保护区域生态环境均尤为重要^[5]。峰丛洼地区域河流稀少,植被相对茂盛,植被生态需水在区域生态需水中占据重要地位,而植物的蒸腾作用则是该区域植被生态需水的主体^[6]。因此,研究植物蒸腾作用是确定峰丛洼地植被生态需水的关键。目前,植被生态需水的研究主要以水文学、微气象学、植物生理学和遥感为基础来开展,尤以植物蒸腾生理生态研究为主。如赵文智等^[7]以植被类型为单元估算蒸散量,进而计算生态需水;冯起等^[8]利用仪器实测单株植被蒸腾耗水来估算其生态需水。张华等^[9]利用高分辨率遥感影像对黑河下游绿洲植被优势种蒸腾耗水进行了估算。可以看出,目前的研究对象大多集中于河流湿地生态系统中的植物^[10],对于峰丛洼地区域植物蒸腾作用及其影响等方面的研究则鲜见报道。因此,本研究选择典型峰丛洼地区,采用实地观测手段,研究区域优势植物类型的蒸腾速率及其影响因素,以掌握植物蒸腾特征,为进一步开展区域植被生态需水研究提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于广西壮族自治区百色市田东县真

良村(106°53'—107°26'E,23°16'—24°01'N),为典型喀斯特峰丛洼地景观,属南亚热带季风气候区。年平均气温 21.9 °C,年降水量 1 172.3 mm,年蒸发量 1 774.7 mm,蒸发量大于降水量,干热是区域主要的气候特点。研究区域土壤为碳酸盐岩发育的石灰土。受人类干扰影响,研究区域内峰丛乔、灌、草不同演替阶段植物群落均有分布,但原生植被稀少,主要保存于村寨附近的风水林,以石灰山常绿青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)阔叶林为主,乔木林内伴生有灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)等灌木及地石榴(*Ficus tikoua*)、荇草(*Arthraxon hispidus*)等草本。其他大多为次生植被,其中草丛优势种主要以五节芒(*Miscanthus floridulus*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)为主,而灌木丛优势种主要为灰毛浆果楝、龙须藤(*Bauhinia championii*)、两面针(*Zanthoxylum nitidum*)等。另外,研究区域洼地内栽培有火龙果(*Hylocereus undulatus*)、甘蔗(*Saccharum officinarum*)等经济植物。

1.2 样地设置

在研究区域选取典型的峰丛洼地单元,根据主要植被群落演替类型,结合海拔垂直梯度及坡度坡向变化选取典型洼地植物群落(甘蔗群落)、草丛群落(五节芒群落)、灌丛群落(灰毛浆果楝群落)、常绿阔叶林群落(青冈群落)作为标准样地,每个样地面积 20 m×20 m。

1.3 观测方法

分别于 2015 年 4 月(春季)、8 月(夏季)、10 月(秋季)和 2016 年 1 月(冬季)选取典型晴天开展现场观测工作,观测指标包括蒸腾速率、叶面积指数及相关环境因子。

(1) 蒸腾速率(T_r)。采用 Li-Cor 6400 便携式光合测量系统进行现场测定。每个样地内选取 3 棵长势良好、冠形匀称、冠幅适中、无病虫害的代表性植物作为样木进行观测,在每棵样木树冠南向的高、中、低段分别选取 3 片健康叶片进行测量,每个叶片每次连续采取 6 个稳定的数据,测定结果取其平均值,每块

样地的观测时间均设在上午 9:00—10:00 间,确保数据可比性。具体测量步骤为:在对仪器进行开机预热日常检查后,打开叶室,夹好测量的植物叶片,选择数据存储位置,确保进气浓度稳定,且不漏气,进行匹配,等参数稳定后,记录数据。

(2) 叶面积指数(leaf area index, LAI)。采用 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,每个样地进行 3 次重复,每次重复记录 10 个数据。具体操作为:将光学传感器置于冠层上方,确保视野内没有遮挡物,并确认 Above 灯为打开状态,按光学传感器或主机上的 Log 键来记录 A 值,A 值记录完后,按 A/B 键使 Above 灯为关闭状态,将光学传感器置于冠层下方,按 Log 键来记录 B 值,每次重复记录 3 个 A 值,10 个 B 值,测量结束后,按 START|STOP 键关闭文件夹,保存数据。

(3) 环境因子。参考前人研究成果^[11-13],主要选取土壤含水率(soil water content, SWC)、土壤容重(ρ_b)、大气温度(T_a)和空气相对湿度(R_H)作为环境因子进行观测。其中,土壤含水率采用烘干法,在测定植物蒸腾作用的同时采集附近 0—20 cm 深度的土样 80~100 g,去除其中的植物组织,测量其湿重,即刻带回实验室在 105 °C 下烘至恒重后再重,通过公式换算获得其含水率,由于研究区域为喀斯特地貌,土壤层厚度较小,所选择观测的青冈根系并未下扎至岩石层,因此研究中选取表层土壤含水率作为影响因素。土壤容重采用环刀法测得,选择有代表性的土壤,去除其表面凋落物,然后用体积为 100 cm³ 的环刀垂直压入土内,然后用剖面刀挖掘周围土壤,取出环刀,将粘附在环刀外面的土去除,用削土刀细致地切去环刀两端多余的土,使土壤恰和环刀平齐,两端盖好盖子,带回实验室,将环刀内土壤置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重,记录其重量,除以环刀体积即为土壤容重;采用手持式 RS 温湿度计对植株周围大气温度和空气湿度进行测定。

1.4 数据处理

所得数据的初步分析与整理通过 Excel 完成,相关性分析等统计由 SPSS 19.0 软件完成^[14]。其中,通径分析是在多元回归的基础上将相关系数分解为直接通径系数(某一自变量对因变量的直接作用)和间接通径系数(该自变量通过其他自变量对因变量的间接作用)。决策系数 R 是通径分析的决策指标,可以把各自变量对因变量的综合作用进行排序,以确定主要决策变量和限制变量,决策系数为正值表明自变量对于因变量起促进作用,而决策系数为负值,则表明自变量对因变量起限制作用,通径系数和决策系数的计算参考相关公式^[12]。

2 结果与分析

2.1 不同植物类型 T_r 的季节变化

由图 1 可见,洼地甘蔗四季 T_r 变化范围在 96.55~197.42 g/(m²·h),平均值为 130.68 g/(m²·h);草本五节芒四季 T_r 变化范围在 95.26~169.13 g/(m²·h),平均值为 132.89 g/(m²·h);灌木灰毛浆果楝四季 T_r 变化范围在 97.20~239.11 g/(m²·h),平均值为 141.26 g/(m²·h);乔木青冈四季 T_r 变化范围在 81.65~124.42 g/(m²·h),平均值为 98.82 g/(m²·h)。另外,图 1 中 4 种植物 T_r 均呈现出夏季高冬季低的明显季节单峰曲线变化规律。方差分析结果显示,不同季节植物 T_r 值存在差异,其中夏季 T_r 与春、秋、冬 3 季的差异达到极显著水平($p < 0.01$),而春、秋、冬 3 季植物 T_r 差异不显著($p > 0.05$)。就不同植物类型 T_r 而言,灰毛浆果楝和青冈 T_r 差异达到极显著水平,其他植物类型间差异不显著($p > 0.05$),其中,以灰毛浆果楝 T_r 最高,五节芒和甘蔗次之,两者差异不大,而青冈最低,分别比灰毛浆果楝、五节芒和甘蔗低 30.04%,25.64%和 24.38%。

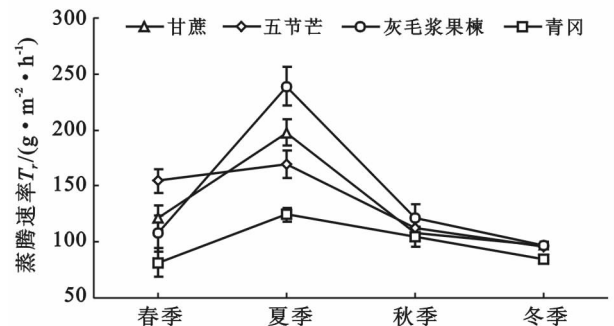


图 1 研究区不同样地内植物 T_r 的季节变化

2.2 不同植物群落 LAI 的季节变化

由图 2 可见,洼地甘蔗群落四季 LAI 变化范围 0.89~2.36,平均值为 1.68;草本五节芒群落四季 LAI 变化范围 2.12~3.67,平均值 2.68;灌木灰毛浆果楝群落四季 LAI 值变化范围 2.63~4.26,平均值为 3.41;乔木青冈群落四季 LAI 值变化范围 2.56~4.16,平均值为 3.42。分析可知,4 种植物群落 LAI 均呈现出夏季高,春冬季相对较低的季节变化规律。而不同植物群落类型其 LAI 存在差异,以青冈和灰毛浆果楝 LAI 较高,分别达到 3.42 和 3.41,五节芒次之,为 2.68;而甘蔗群落 LAI 最低,仅为 1.68,分别比五节芒、灰毛浆果楝和青冈群落低 37.31%,50.73%和 50.84%。

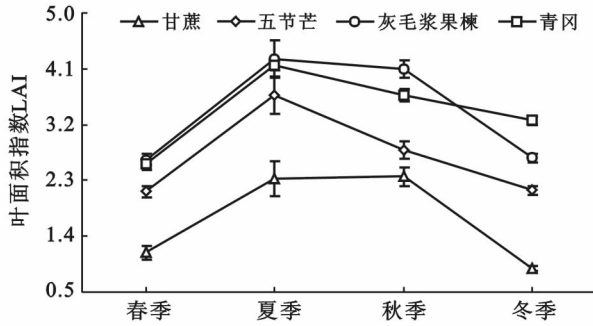


图 2 研究区不同群落类型 LAI 的变化

2.3 不同植物群落环境因子的变化

峰丛洼地不同群落类型下各环境因子季节变化

表 1 研究区不同群落类型下环境因子变化

群落类型	项目	土壤容重 $\rho_b / (g \cdot cm^{-3})$	土壤含水率 SWC/%	空气温度 $T_a / ^\circ C$	空气相对湿度 $R_H / \%$
甘蔗	平均值	1.30	30.19	21.21	66.57
	最大值	1.39	35.93	29.50	73.10
	最小值	1.21	23.16	9.60	55.45
	标准偏差	0.05	3.71	7.92	7.00
五节芒	平均值	1.35	32.67	21.15	74.26
	最大值	1.43	41.26	28.60	82.36
	最小值	1.25	28.54	9.90	69.13
	标准偏差	0.06	3.51	7.23	4.31
灰毛浆果楝	平均值	1.35	33.76	21.43	74.97
	最大值	1.44	45.89	28.90	81.90
	最小值	1.26	29.70	10.10	66.98
	标准偏差	0.05	4.79	7.22	4.45
青冈	平均值	1.36	27.75	20.67	73.14
	最大值	1.47	32.35	28.30	80.32
	最小值	1.28	21.44	8.80	64.80
	标准偏差	0.06	2.98	6.99	4.99

2.4 不同植物群落蒸腾速率影响因子分析

2.4.1 Pearson 相关分析 采用 Pearson 相关性对不同植物群落 T_r 与环境因子间的关系进行分析,结果如表 2 所示,甘蔗群落 T_r 与 SWC 呈极显著正相关 ($p < 0.01$),与 T_a 呈显著正相关 ($p < 0.05$),与 ρ_b 呈显著负相关 ($p < 0.05$);五节芒群落 T_r 与 T_a 呈极显著正相关 ($p < 0.01$),与 SWC 呈显著正相关 ($p < 0.05$),与 ρ_b 呈显著负相关 ($p < 0.05$);灰毛浆果楝群落 T_r 与 SWC 呈极显著正相关 ($p < 0.01$),与 T_a

如表 1 所示。

由表 1 可知, ρ_b 差异不明显,其平均值分布范围为 1.30~1.36 g/cm^3 ,以甘蔗群落最低,青冈群落最高。SWC 存在较大差异,其均值分布范围在 27.75%~33.76%,以灰毛浆果楝群落最高,青冈群落最低; T_a 差异较小,其均值分布范围为 20.83~21.43 $^\circ C$,同样以灰毛浆果楝群落最高,青冈群落最低,规律与 SWC 一致; R_H 均值分布范围在 66.57%~74.97%,以灰毛浆果楝群落最高,而甘蔗群落最低。由此可见,峰丛洼地不同植物群落类型下各环境因子间存在一定差异,这可能是海拔高度、植被类型等因素共同作用的结果。

和 LAI 呈显著正相关 ($p < 0.05$);青冈群落 T_r 与 LAI 呈极显著正相关 ($p < 0.01$),与 T_a 呈显著正相关 ($p < 0.05$),与 R_H 呈显著负相关 ($p < 0.05$)。由此可知, T_a 和 SWC 在每种植物群落类型下均对 T_r 产生极显著或显著影响,说明它们是影响峰丛洼地植物群落 T_r 的重要因素;而 LAI, ρ_b 和 R_H 至少在 1 种植物群落类型下与 T_r 呈极显著或显著相关,说明这些因子在特定条件下会对峰丛洼地植物群落 T_r 产生影响。

表 2 不同植物群落 T_r 与影响因子相关性分析

群落类型	叶面积指数 LAI	土壤容重 ρ_b	土壤含水率 SWC	大气温度 T_a	空气相对湿度 R_H
甘蔗	0.426	-0.589*	0.789**	0.668*	0.020
五节芒	-0.008	-0.581*	0.667*	0.827**	-0.532
灰毛浆果楝	0.684*	-0.261	0.897**	0.618*	-0.012
青冈	0.833**	-0.371	0.276	0.576*	-0.623*

注:*,** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

2.4.2 逐步回归分析 不同植物群落 T_r 与环境因子的逐步回归方程如表 3 所示。F 检验表明,不同生长期回归模型显著性水平均小于 0.001。不同群落类型入选回归方程的因子不同,入选的环境因子均可以解释 80% 以上 T_r 变异。其中,SWC 在甘蔗、灰毛浆果楝和青冈群落中均入选回归方程,而 T_a 在甘蔗、五节芒和青冈群落中入选回归方程,说明 SWC 和 T_a 为影响植物群落 T_r 的主要环境因子,SWC 对 T_r 的回归系数均为正值, T_r 随之增大而增大。 ρ_b 在灰毛浆

果楝群落中入选回归方程,且对 T_r 的回归系数也为正值,说明灰毛浆果楝群落 T_r 随 ρ_b 增大而增大;LAI 在青冈群落中入选回归方程,同样对 T_r 的回归系数为正值,说明青冈群落 T_r 随 LAI 增大而增大。此外,除青冈群落 e 值为 0.178 较小外,其他植物群落 e 值均较大,说明对青冈群落 T_r 有影响的自变量不仅仅是入选了回归方程的因子,还有其他一些影响因子未全部考虑,对 T_r 影响因素的全面分析有待于进一步研究。

表 3 不同植物群落 T_r 与影响因子逐步回归分析

群落类型	逐步回归方程	R^2	F 值	sig	e 值
甘蔗	$T_r = -212.99 + 906.16\text{SWC} + 3.33T_a$	0.886	43.59	0.000 0	0.464
五节芒	$T_r = 44.54 + 4.18T_a$	0.827	21.59	0.001 0	0.562
灰毛浆果楝	$T_r = -887.92 + 13.93\text{SWC} + 412.82\rho_b$	0.942	35.39	0.000 0	0.336
青冈	$T_r = -188.52 + 39.85\text{LAI} + 6.47\text{SWC} - 1.38T_a$	0.984	80.12	0.000 0	0.178

注: $e = \sqrt{1-R^2}$ 。

2.4.3 通径分析 为了进一步了解影响峰丛洼地植物群落 T_r 的主要决策变量,对 T_r 及其影响因素进行通径分析,结果如表 3 所示。

就甘蔗群落而言,对 T_r 直接影响最大的因子是 SWC,其次是 T_a ,二者对 T_r 的影响均体现为直接促进作用,SWC 是主要决策变量。五节芒群落中,只有 T_a 入选逐步回归方程,说明其他因子对 T_r 的作用不显著, T_a 对 T_r 的直接通径系数为 0.827,决策系数为 0.684,对 T_r 起促进作用。灰毛浆果楝群落中,对 T_r

直接影响最大的同样是 SWC,其次是 ρ_b ,其中 SWC 对 T_r 的影响主要体现为直接促进作用,而 ρ_b 则主要通过 SWC 的间接作用抑制 T_r ,SWC 是主要决策变量。青冈群落中,对 T_r 直接影响最大的是 LAI,其次是 SWC 和 T_a ,其中 LAI 和 SWC 对 T_r 的影响主要体现为直接作用,而 T_a 则主要通过 LAI 和 SWC 的间接作用对 T_r 产生影响,LAI 是主要决策变量,对 T_r 起促进作用,而 SWC 和 T_a 决策系数为负,对 T_r 起限制性作用。

表 4 不同植物群落 T_r 与环境因子的通径系数和决策系数

群落类型	变量	直接通径系数	间接通径系数					决策系数	
			Σ	LAI	ρ_b	SWC	T_a		R_H
甘蔗	SWC	0.690	0.099	—	—	—	0.099	—	0.612
	T_a	0.542	0.126	—	—	0.126	—	—	0.430
五节芒	T_a	0.827	—	—	—	—	—	—	0.684
灰毛浆果楝	SWC	1.089	-0.192	—	-0.192	—	—	—	0.768
	ρ_b	0.345	-0.606	—	—	-0.606	—	—	-0.299
青冈	LAI	1.176	-0.342	—	—	-0.220	-0.122	—	0.579
	SWC	0.921	-0.644	-0.281	—	—	-0.363	—	-0.338
	T_a	-0.461	1.037	0.312	—	0.725	—	—	-0.744

3 讨论与结论

蒸腾作用在植物生命活动中意义重大,而叶片气孔蒸腾是植物蒸腾作用的最主要形式。影响气孔蒸腾作用的外界条件主要包括光照强度、空气温湿度、土壤水分以及风速等^[15-16],内部因素主要包括气孔频率、气孔下腔容积和叶片内部面积大小^[15]。本研究

结果表明,无论何种植物群落,SWC 和 T_a 均对 T_r 产生普遍影响,这与前人的研究结果较为一致。水是连系土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 的中枢纽带,蒸腾作用强弱主要取决于土壤中可利用的水分^[17]。已有研究表明,植物蒸腾作用在一定范围内随 SWC 的增加而增强,而当 SWC 长时间接近或超过持水量时,植物蒸腾作用则会随之减弱^[18]。 T_a 是影响植物蒸腾

作用的重要外界条件,在一定范围内, T_a 的升高会增强水分蒸发速率,叶片温度高于 T_a ,使叶内外的蒸汽压差增大,从而加快蒸腾速率,但温度过高可能会对某些植物构成热胁迫或者超出一些有关酶的活性范围,导致气孔开度受到抑制,造成 T_r 减小^[13]。此外,本研究表明 LAI 和 ρ_b 对 T_r 也产生一定影响,已有研究指出当没有出现水分限制时,LAI 和植物 T_r 之间呈正比关系,但当 LAI 很大时,则会抑制 T_r ,主要是由于冠层内外枝叶相互遮阴效果强,内部枝叶所接受的辐射将变得很小,造成 T_r 降低^[19]。而 ρ_b 对植物蒸腾作用的影响主要表现在对根系生长的影响, ρ_b 越大,土壤越紧实,根系生长缓慢,进而影响其对水分和营养物质的吸收^[20]。本研究重点关注喀斯特峰丛洼地不同植物群落蒸腾作用的差异及其影响因素,青冈群落 T_r 最低,其 SWC 和 T_a 也最低,而 LAI 最高,通径分析结果表明 LAI 对其群落 T_r 起显著的促进作用,而 SWC 和 T_a 则对其起抑制作用,从决策系数来看,SWC 和 T_a 的抑制作用明显大于 LAI 的促进作用,因此,较低的 SWC 和 T_a 是造成青冈群落 T_r 低的主要原因。而灰毛浆果楝群落 T_r 最高,一方面其 SWC 和 T_a 最高,其次,通径分析表明 SWC 对其 T_r 有显著的促进作用,而 ρ_b 对其 T_r 则有一定的抑制作用,虽然灰毛浆果楝群落 ρ_b 处于相对较高的水平,但从决策系数来看,这种抑制作用相对于 SWC 的促进作用要小的多,所以其 T_r 高;甘蔗群落和五节芒群落 T_r 差异不大,通径分析结果表明,SWC 和 T_a 对甘蔗群落 T_r 均直接产生促进作用,而 SWC 是主要决策变量, T_a 对五节芒群落 T_r 直接产生促进作用,甘蔗群落和五节芒群落的 SWC 和 T_a 均处于中等水平,因此,其 T_r 也处于中等水平。

环境条件对峰丛洼地恢复树种蒸腾作用产生直接影响,由相关、回归及通径分析可知,SWC 和 T_a 是影响峰丛洼地植物群落 T_r 的主要环境因子,而影响峰丛洼地植物群落 SWC 和 T_a 的因子众多,包括人为干扰、地形地貌、气候、母质、植被区系等;彭晚霞等^[21] 研究指出地形因子如海拔、坡位和坡度等通过对雨热进行再分配在影响土壤水分含量的诸多因子中占据主导地位,而耕作对喀斯特脆弱生态系统的土壤水分同样具有重要影响,可造成水土流失、土壤退化。胡阳等^[22] 对广西平果果化典型岩溶峰丛洼地的研究指出,该区域的土壤持水能力呈现出随植被的正向演替而不断降低的趋势。反之,植物蒸腾作用和土壤蒸发同样对喀斯特峰丛洼地地区土壤含水率产生影响。本研究选取的峰丛洼地虽然经过了近 10 a 的自然恢复,但在之前受人为活动干扰强烈,破坏严重,

大部分植被仍处于草灌丛阶段。坡中灰毛浆果楝群落虽然破坏也严重,但因立地条件相对较好,坡度较小,因此其土壤持水能力相对较好,土壤含水率高。而坡顶的青冈群落尽管干扰相对较少,但由于坡度较大,且土壤深度较小,石砾含量增多,蒸发加快,水分含量降低。而五节芒和甘蔗群落位于坡下,虽然立地条件相对较好,但至今仍受人们耕作活动干扰,水土流失严重,部分区域完全石漠化,因此,土壤含水率不高。总之,各环境因子的空间分布不同导致了蒸腾作用的不同,而蒸腾作用又反作用于某些环境因子,对生态需水问题较为突出的喀斯特峰丛洼地而言,研究植物群落蒸腾作用即是对植被需水生理生态机制的深入认识,是科学准确计算植被生态需水的关键,并且通过人工诱导水、光、热等某些环境因子而进一步合理调控植被生态需水,为区域退化生态系统植被生态恢复与生态建设提供科学指导。

[参 考 文 献]

- [1] 彭晚霞,王克林,宋同清,等.喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J].生态学报,2008,28(2):811-820.
- [2] 陈洪松,王克林.西南喀斯特山区土壤水分研究[J].农业现代化研究,2008,29(6):734-738.
- [3] 张川,陈洪松,聂云鹏,等.喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J].2013,21(10):1255-1232.
- [4] Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use[J]. Ecological Applications, 1988,8(3):571-579.
- [5] 崔瑛,张强,陈晓宏,等.生态需水理论与方法研究进展[J].湖泊科学,2010,22(4):465-480.
- [6] 张华,张兰,赵传燕,等.黑河下游绿洲植被优势种生物量空间分布及蒸腾耗水估算[J].地理科学,2014,34(7):876-881.
- [7] 赵文智,常学礼,何志斌,等.额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究[J].中国科学(D辑):地球科学,2006,36(6):559-566.
- [8] 冯起,司建华,席海洋,等.极端干旱区天然植被耗水规律试验研究[J].中国沙漠,2008,28(6):1095-1103.
- [9] 张华.基于生物量的黑河下游绿洲植被优势种生态需水估算[D].甘肃兰州:西北师范大学,2011.
- [10] Fu Xinfeng, He Hongmou, Jiang Xiaohui. Natural ecological water demand in the lower Heihe River [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2008,2(1):63-68.
- [11] 潘瑞炽,王小菁,李娘辉.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [12] 高瑞忠,李凤玲,于婵,等.浑善达克沙地人工牧草蒸腾光合作用与环境因子的关系分析[J].节水灌溉,2012,14(3):14-18.

- 土壤碳氮的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 200-206.
- [13] 徐俊俊. 冻融交替对高寒草甸土壤氮素的影响[D]. 四川 成都: 四川农业大学, 2010.
- [14] Freppaz M, Williams BL, Edwards A C, et al. Simulating soil freezing and thawing cycles typical of winter alpine conditions; Implications for N and P availability [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 35(1): 247-255.
- [15] Herrmann A, Witter E. Source of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soil[J]. Soil Biology Biochemistry, 2002, 34(10): 1495-1505.
- [16] 罗林涛, 程杰, 王欢元, 等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土壤氮素淋失特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 59-66.
- [17] 贾国晶, 周永斌, 代力民, 等. 冻融对长白山森林土壤碳氮矿化的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 624-628.
- [18] Amador JA, Gorres JH, Savin MC. Role of soil water content in the carbon and nitrogen dynamics of *Lumbricus terrestris* L. burrow soil [J]. Applied Soil Ecology, 2005, 28(1): 15-22.
- [19] Koponen H T, Flojt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: A laboratory microcosm study [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(5): 757-766.
- [20] Elberling B, Brandt K K. Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(2): 263-272.
- [21] Fan Jihui, Cao Yingzi, Yan Yan, et al. Freezing-thawing cycles effect on the water soluble organic carbon, nitrogen and microbial biomass of alpine grassland soil in Northern Tibet [J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(3): 562-567.
- [22] Neilsen C B, Groffman P M, Hamburg S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6): 1723-1730.
- [23] 张海欧, 韩霁昌, 张扬, 等. 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤团粒结构的影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 186-191.
- [24] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1032-1042.
- [25] 魏丽红. 冻融交替对黑土土壤有机质及氮钾养分的影响[D]. 吉林 长春: 吉林农业大学, 2004.
- ~~~~~
- (上接第 21 页)
- [13] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 胡杨光合蒸腾与影响因素间关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 155-159.
- [14] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.
- [15] Filippo S, Anna M D T, Mario F, et al. Economic assessment of *Eucalyptus* (spp.) for biomass production as alternative crop in Southern Italy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 614-619.
- [16] Laurel K D, Aiko U, Wu X Q, et al. Effect of transpiration on plant accumulation and translocation of PPCP/EDCs [J]. Environmental Pollution, 2015, 198: 144-153.
- [17] Remko A D, Craig V M B, YAN S L, et al. The peaked response of transpiration rate to vapour pressure deficit in field conditions can be explained by the temperature optimum of photosynthesis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190(6): 2-10.
- [18] Timothy M B, Ian J C, Mark A A. Hydraulic traits and water use of *Eucalyptus* on restored versus natural sites in a seasonally dry forest in Southwestern Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 274(24): 58-66.
- [19] 谭娟, 郭晋川, 吴建强, 等. 广西典型水库集水区巨尾桉和马尾松蒸腾作用 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 576-583.
- [20] 孙艳, 王益权, 徐伟君, 等. 紧实胁迫对土壤呼吸强度及黄瓜生长和品质的影响 [J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1128-1134.
- [21] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子 [J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6787-6797.
- [22] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 广西岩溶区不同植被类型土壤水分特征及影响因素 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 22-27.