

矮嵩草草甸植物蒸腾强度与环境因子 相互关系的初步分析*

沈振西 杨福圃 钟海民

(中国科学院西北高原生物研究所)

摘 要

矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸 12 种植物的平均蒸腾强度为 $9.5503 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 其中以矮嵩草最高 [$11.4463 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$], 麻花苣 (*Gentiana straminea*) 最低 [$6.3160 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$], 这主要与植物的解剖特征和新陈代谢有关。植物的蒸腾强度有明显的季节性变化, 一般从 5, 6 月起逐渐增高, 8 月达到最大值, 尔后又逐渐降低, 至 9 月中下旬停止。植物蒸腾强度日变化随环境因子的变化而异, 属“单峰型”曲线, 这与植物气孔开闭和植物生长发育节律有一定关系, 而影响其蒸腾强度的主要环境因子依次是, 温度 (叶温、地表温、气温、土温) > 光照强度 > 土壤水分。

关键词: 矮嵩草草甸; 蒸腾强度; 环境因子。

蒸腾是植物一个重要的生理过程, 它对液流的上升, 矿质元素和水分的吸收与运转以及对降低叶温都是极其重要的。国内外曾有不少学者 (许令妊等, 1983; 宋炳煜等, 1985; 常杰和祝廷成, 1989; 赖世登等, 1988; Gates, 1968) 对此作过研究。

矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸是青藏高原最主要的草场类型之一, 其蒸腾强度的研究已有报道 (杨福圃等, 1989), 本文重点研究矮嵩草草甸 12 种植物蒸腾强度的季节变化和日变化, 探讨在高寒气候条件下植物蒸腾规律与环境因子的相互关系, 不仅为矮嵩草草甸水分动态的研究提供数据, 而且对提高植物生产力有一定的实践意义。

材料与方 法

1988 年 5—9 月, 在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站矮嵩草草甸样地进行植物蒸腾强度的研究, 实验地的自然概况已有专文报道 (杨福圃, 1982), 在此不予赘述。

* 国家自然科学基金资助项目。

实验材料为羊茅 (*Festuca ovina*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、矮嵩草、二柱头藨草 (*Scirpus distigmaticus*)、黑褐苔草 (*Carex atrofusca*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、雪白委陵菜 (*P. nivea*)、美丽凤毛菊 (*Saussurea superba*)、矮火绒草 (*Leontopodium nanum*)、甘肃棘豆 (*Oxytropis kansuensis*)、麻花艸 (*Gentiana straminea*) 和柔软紫菀 (*Aster flaccidus*) 12种植物。采用随机取样,二柱头藨草取其茎(叶片退化,极小),其余植物均取基生叶或茎生叶。用钴纸法(沈振西等,1988)测定叶片的蒸腾强度;用7151型半导体温度计测定叶温;Gossen型照度计测定光照强度;土壤负压计测定土壤(5—10cm)水分;其它资料由定位站的气象站提供,其中土壤温度为地下5cm处的测定值。在测定植物蒸腾强度的同时记录有关环境因子,采用相关与回归分析的方法,探讨它们之间的相互关系和规律。所有实验数据的处理和分析均在IBMPC计算机上完成。

结果与分析

(一) 植物蒸腾强度的季节动态

分别在5月底和6—9月的每月月初,选择晴天,从日出到日落,每隔2h测定1次。12种植物蒸腾强度平均值见表1。

表1 矮嵩草甸12种植物不同时期的蒸腾强度[$10^{-3}\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$]

Table 1 The transpiration intensity of 12 plant species in *Kobresia humilis* meadow in different periods [$10^{-3}\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$].

植 物 种 类 Plant species	月 份 Month				平 均 Average
	5—6	7	8	9	
矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	8.3626	13.1081	12.6480	11.1929	11.4463
黑褐苔草 <i>Carex atrofusca</i>	9.8719	12.5488	11.0208	9.8335	10.8188
二柱头藨草 <i>Scirpus distigmaticus</i>	8.2021	12.1687	13.3097	6.4112	10.2290
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	8.1613	10.9329	12.4263	6.1123	9.4087
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	10.3719	7.7216	9.4998	4.9726	8.1415
雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>	7.5463	14.1880	11.4055	—	11.0466
矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	7.6943	9.4916	12.9069	10.5246	10.1542
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	7.0368	12.2026	13.4283	7.5303	10.0495
柔软紫菀 <i>Aster flaccidus</i>	8.7953	10.2311	11.3513	9.2306	9.9021
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	7.5373	11.3260	10.2499	8.1163	9.3073
美丽凤毛菊 <i>Saussurea superba</i>	5.9380	8.3997	10.2120	10.7931	8.8367
麻花艸 <i>Gentiana straminea</i>	4.9399	6.0782	9.4726	4.7733	6.3160
总平均 Total average	7.8715	10.6998	11.4943	8.1355	9.5503

从表 1 看出, 植物在不同时期由于生长发育节律的不同, 加之环境因子的影响, 植物蒸腾强度存在着季节性变动, 总的趋势是, 从 5 月 (返青期) 起蒸腾强度逐渐增高, 8 月 (生长盛期) 达到最大值, 以后又逐渐下降, 9 月 (枯黄期) 最低乃至停止。不同植物蒸腾强度出现最大值的时期迟早不一。这与植物本身的生态-生物学特性有密切的相关。

从表 1 还可看出, 12 种植物蒸腾强度平均值为 $9.5503 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 它们依次为, 矮蒿草 > 雪白委陵菜 > 黑褐苔草 > 二柱头藜草 > 矮火绒草 > 鹅绒委陵菜 > 柔软紫菀 > 羊茅 > 甘肃棘豆 > 美丽风毛菊 > 垂穗披碱草 > 麻花苣。蒸腾强度的种间差异, 主要与植物叶片的解剖特征 (气孔大小、结构、排列与密度等) 有密切关系 (拉夏埃尔, 1985)。

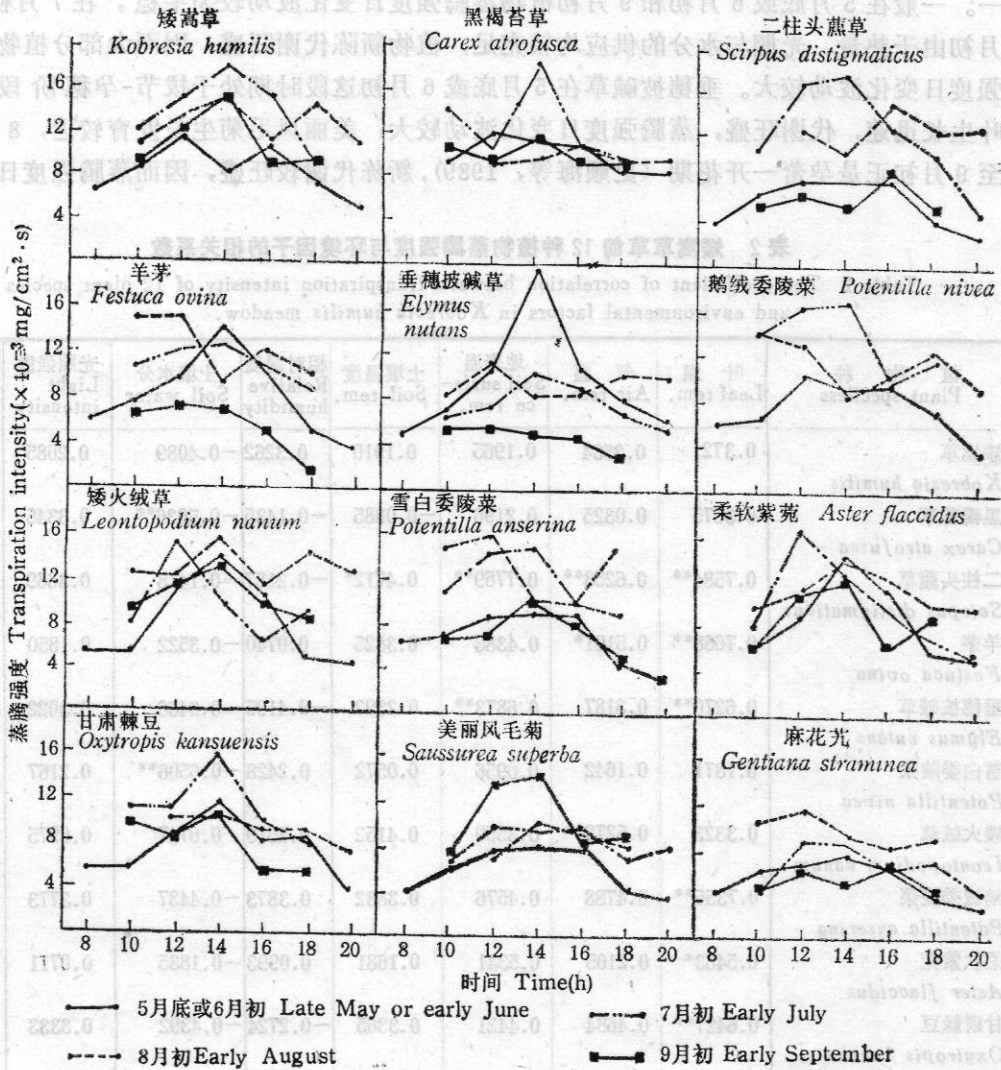


图 1 矮蒿草草甸 12 种植物蒸腾强度日进程

Fig.1 Diurnal courses of transpiration intensity for 12 plant species in *Kobresia humilis* meadow.

(二) 植物蒸腾强度日变化

日出后,随着气温的上升,光照的增强及其它环境因子的变化,植物蒸腾强度随之增大,在14:00时左右达到最大值,之后又随气温、光照强度的变化而变化,逐渐降低,日落后至最低,12种植物蒸腾强度日进程见图1。

由于午后环境因子的瞬间变化较大,图中曲线在这段时间出现一些波动,但总的来看仍属“单峰型”曲线。这不仅与环境因子的变化有密切关系,而且与植物气孔的开闭有一定关系(杨福囿等,1989)。

虽然植物蒸腾强度日变化均呈“单峰”曲线,但日变化的波动程度在不同时期表现不一。一般在5月底或6月初和9月初植物蒸腾强度日变化波动较为平稳,在7月初或8月初由于热量、光照与水分的供应均较充足,植物新陈代谢旺盛,因而大部分植物蒸腾强度日变化波动较大。垂穗披碱草在5月底或6月初这段时期处于拔节-孕穗阶段,茎叶生长迅速,代谢旺盛,蒸腾强度日变化波动较大;美丽风毛菊生长发育较迟,8月初至9月初正是孕蕾-开花期(史顺海等,1989),新陈代谢较旺盛,因而蒸腾强度日变化

表2 矮嵩草草甸12种植物蒸腾强度与环境因子的相关系数

Table 2 The coefficient of correlation between transpiration intensity of 12 plant species and environmental factors in *Kobresia humilis* meadow.

植物种 Plant species	叶温 Leaf tem.	气温 Air tem.	地表温 Soil surface tem.	土壤温度 Soil tem.	相对湿度 Relative humidity	土壤水分 Soil water	光照强度 Light intensity	样本数 Sample size
矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	0.3721	0.2534	0.1965	0.1910	0.3262	-0.4089	0.2085	18
黑褐苔草 <i>Carex atrofusca</i>	0.3675	0.0325	0.2196	-0.0885	-0.1435	-0.5936**	0.3346	16
二柱头薹草 <i>Scirpus distigmaticus</i>	0.7584**	0.6253**	0.7769**	0.4712*	-0.2187	-0.1418	0.3669	18
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	0.7668**	0.5101*	0.4383	0.3825	0.0740	-0.3522	0.1850	16
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	0.6270**	0.3187	0.6873**	0.2393	-0.4195	-0.2466	0.3022	19
雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>	0.1871	0.1642	0.0956	0.0572	0.2428	-0.6506**	0.2167	18
矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	0.3323	0.5278**	0.3559	0.4152	0.2519	0.0747	0.0975	18
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	0.7355**	0.4788	0.4576	0.3832	0.3873	-0.4437	0.3773	17
柔软紫菀 <i>Aster flaccidus</i>	0.5463*	0.2105	0.5341	0.1681	0.0993	-0.1835	0.0711	18
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	0.6427**	0.4684	0.4421	0.3365	-0.2724	-0.4392	0.3333	16
美丽风毛菊 <i>Saussurea superba</i>	0.8050**	0.6689**	0.7058**	0.5320*	-0.1173	-0.3184	0.6852**	17
麻花苣 <i>Gentiana straminea</i>	0.5824*	0.3541	0.4024	0.3062	0.2387	-0.2162	0.3125	18

** P<0.01, * P<0.05.

的波动也较大。所以蒸腾强度日变化与植物本身的发育节律也有一定关系。

(三) 植物蒸腾强度与环境因子的相互关系

将 12 种植物蒸腾强度分别与叶温、气温、地表温、土壤温度、相对湿度、光照强度和土壤水分进行相关分析 (表2)。不同植物的蒸腾强度与环境因子间的相关系数不同, 同一种植物与各环境因子间的相关系数也不相同。二柱头蔗草、羊茅、垂穗披碱草、矮火绒草、鹅绒委陵菜、柔软紫菀、甘肃棘豆和麻花苻等 8 种植物的蒸腾强度仅与温度(叶温、气温、地表温或土壤温度)有显著的相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 黑褐苔草和雪白委陵菜则仅与土壤水分密切相关 ($P < 0.01$); 美丽风毛菊不仅与温度呈显著的相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 且与光照强度呈极显著的相关 ($P < 0.01$), 矮嵩草的蒸腾强度与土壤水分之间的相关系数最大。

为进一步探讨高寒草甸植物蒸腾变化与环境因子间的关系, 将测得的所有植物蒸腾强度及环境因子的数据进行相关分析, 7 个环境因子加上蒸腾强度共 8 个因素, 依次用 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_7$ 和 Y 来表示, 建立一个 209×8 阶的原始矩阵, 求其相关矩阵 (表3)。矮嵩草草甸植物蒸腾强度与环境因子间密切相关, 依次为: 叶温 ($P < 0.01$) > 地表温 ($P < 0.01$) > 气温 ($P < 0.01$) > 土壤温度 ($P < 0.01$) > 光照强度 ($P < 0.01$) > 土壤水分 ($P < 0.05$) > 相对湿度。其中土壤水分与蒸腾强度呈显著的负相关。说明影响矮嵩草草甸植物蒸腾强度的主要环境因子是, 温度 (叶温、地表温、气温、土壤温度) > 光照强度 > 土壤水分, 而空气相对湿度对植物蒸腾的影响不显著, 为次要因子。

表3 矮嵩草草甸植物蒸腾强度与环境因子的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of transpiration intensity of plants to environmental factors in *Kobresia humilis* meadow.

因素 Factors	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	Y
叶温 Leaf temperature	X_1							
气温 Air temperature	X_2	0.6035**						
地表温 Soil surface temperature	X_3	0.7745**	0.8040**					
土壤温度 Soil temperature	X_4	0.5077**	0.9323**	0.6667**				
相对湿度 Relative humidity	X_5	-0.4950**	-0.4468**	-0.5823**	-0.3552**			
土壤水分 Soil water	X_6	-0.0493	0.3055**	0.2152**	0.3525**	-0.3007**		
光照强度 Light intensity	X_7	0.5453**	0.1843**	0.3889**	0.0350	-0.3571**	-0.2460	
蒸腾强度 Transpiration intensity	Y	0.4670**	0.3592**	0.3940**	0.2632**	0.0371	-0.1506*	0.2005**

** $P < 0.01$. * $P < 0.05$.

从表 3 看出, 除土壤温度与光照强度、叶温与土壤水分间相关不显著, 以及光照强

度与土壤水分、相对湿度分别与其它各环境因子间呈极显著的负相关外, 其余各环境因子之间均呈极显著的正相关, 说明这些环境因子之间存在着相互依赖和相互制约的关系。

(四) 植物蒸腾强度与环境因子的回归分析

矮嵩草蒸腾强度与环境因子间线性相关不显著(表2), 故对自变量(环境因子)逐一进行非线性(双曲线函数、指数函数、对数函数和幂函数)回归, 选择其中回归效果最好的。对其它11种植物则采用多元线性逐步回归的方法, 将主要的自变量因子引入回归方程, 把次要的自变量因子从回归方程中剔除, 最终得到一个具有较高精度和较简单的回归方程(刘福, 1985)。12种植物蒸腾强度与环境因子的回归方程列于表4。各回归

表4 矮嵩草草甸12种植物蒸腾强度与环境因子的回归方程

Table 4 Regressive equation of transpiration intensity to environmental factors in *Kobresia humilis* meadow.

植物种 Plant species	回归方程 Regressive equation	相关指数 R
矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	$Y=23.8652e^{(-0.8224/X_1)}$	0.9015**
苔草 <i>Carex atrofusca</i>	$Y=17.1098-4.9599e^{-2}X_6$	0.5936*
二柱头蔗草 <i>Scirpus distigmaticus</i>	$Y=6.0388+0.4183X_3-4.0300e^{-2}X_6$	0.8537**
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	$Y=2.5751+0.4151X_1$	0.7618**
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	$Y=4.1853+0.2001X_3$	0.6872**
雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>	$Y=22.1472-8.6745e^{-2}X_6$	0.6506**
矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	$Y=-16.7784+0.3129X_1+0.4295X_2+0.2380X_4$	0.8778**
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	$Y=-3.1832+0.4150X_1+0.1333X_4-3.1002e^{-2}X_6$	0.9004**
柔软紫菀 <i>Aster flaccidus</i>	$Y=-8.5622+0.1393X_4$	0.8000**
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	$Y=3.2533+0.2884X_1$	0.6427**
美丽风毛菊 <i>Saussurea superba</i>	$Y=4.8085+0.2184X_1-1.7413e^{-2}X_6$	0.8591**
麻花苳 <i>Gentiana straminea</i>	$Y=-4.3985+0.2880X_1+8.0318e^{-2}X_4$	0.7765**

符号同表3, Symbol are as same as Table 3,

单位: Unit: X_1 : °C, X_2 : °C, X_3 : °C, X_4 : %, X_5 : %,

X_6 : Mbar, X_7 : $\times 10^4$ lx, Y : $\times 10^{-2}$ mg/(cm²·s)。

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$ 。

方程的回归效果均达到显著或极显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) 水平。矮嵩草蒸腾强度的回归方程属指数函数。其它11种植物则为逐步回归建立的线性方程。在每种植物蒸腾强度的回归方程中, 引入的自变量(环境因子)与每种植物蒸腾强度相关显著的环境因

子(表2)不完全一致,在回归方程中不一定将所有相关显著的环境因子都引入,也不一定不引入相关不显著的环境因子。如美丽风毛菊,与之蒸腾强度呈极显著相关的因子为 X_1 , X_2 , X_3 和 X_7 ,呈显著相关的为 X_4 ,呈不显著相关的为 X_5 和 X_6 ,但在逐步回归中,只引入变量 X_1 和 X_6 ,尽管 X_6 在相关分析中为不显著的因子,但却对回归方程贡献较大,因此获得的回归方程精度较高且较简单。

讨 论

矮嵩草草甸植物蒸腾强度日变化呈“单峰型”曲线,进一步证实杨福国等(1989)所得出的结果,但与苜蓿(*Medicago spp.*) (许令妊等,1983)和羊草(*Aneurolepidium chinense*) (宋炳煜等,1985;常杰和祝廷成,1989)的蒸腾日变化的“双峰型”曲线不同。矮嵩草草甸植物净光合速率日变化也呈“单峰”现象(张树源,1988),由此可见,矮嵩草草甸植物蒸腾强度日变化的“单峰”现象,是在青藏高原特有的环境条件下形成的,是高寒植物蒸腾的特点。植物的蒸腾与 CO_2 的捕获都是由气孔联系的,为吸收 CO_2 植物不得不损失水分,当需要减少失水时, CO_2 的进入又减少(拉夏埃尔,1985)。焦振家等(1987)曾报道红皮云杉(*Picea koraiensis*)的净光合速率与蒸腾速率存在着密切的线性关系。因此有必要从植物气孔生理、解剖结构等方面探讨高寒草甸植物蒸腾作用与光合作用间的内在规律。

常杰和祝廷成(1989)分析了影响羊草群落蒸腾作用的主要环境因子,它们依次为,辐射>气温>相对湿度。而本文所得出的影响矮嵩草草甸植物蒸腾的主要环境因子为:温度(叶温、地表温、气温、土壤温度)>光照强度>土壤水分。在高寒气候下温度为首要因子,其中叶温与植物蒸腾强度极为相关(表3),从而证实了Gates(1968)的论点。高寒地区气温较低,风速较大,而地表植被对风则有阻滞作用,加之地表有一定的贮热能力,使其地温往往比气温变化范围大,对植物蒸腾的影响也较大。大气相对湿度是影响植物蒸腾的非主要因子,这可能与高寒草甸地区相对湿度较高,变化范围较小有关。

参 考 文 献

- 史顺海、杨福国、陆国泉,1989,矮嵩草草甸主要植物种群物候观测和生物量测定,高寒草甸生态系统国际讨论会论文集,科学出版社,49—59。
- 刘福,1985,电子计算机在农业上的应用,农村读物出版社,93—109。
- 许令妊、林柏和、刘育萍、卫建光,1983,苜蓿的蒸腾强度及其在生产上的意义,中国草原,4: 11—16。
- 宋炳煜、李燕红、颜铭,1985,锡林河流域羊草草原植物蒸腾特点及其群落水分利用的初步研究,草原生态系统研究,1: 83—92。
- 沈振西、杨福国、钟海民,1988,一种快速简便测定植物蒸腾强度的方法——氯化钴纸法,中国草业科学,6: 8—10。
- 杨福国,1982,高寒草甸生态系统定位站自然地理概况,高寒草甸生态系统(夏武平主编),甘肃人民出版社,1—8。
- 杨福国、沈振西、钟海民,1989,矮嵩草草甸植物蒸腾强度的初步研究,植物生态学与地植物学学报,13(2): 136—143。
- 张树源,1988,矮嵩草草甸植物净光合速率变化的研究,高原生物学集刊,8: 133—139。
- 常杰、祝廷成,1989,羊草群落水分状况的初步研究,植物生态学与地植物学学报,13(3): 221—229。
- 焦振家、王文章、赵雨森,1987,红皮云杉蒸腾强度的研究,东北林业大学学报,15(5): 7—13。
- 赖世登、廖俊国、刘光耀,1988,冷杉蒸腾速率及其与生态因子的相关分析,植物学报,30(6): 639—643。
- 拉夏埃尔, W., 1985,植物生理生态学(李博等译),科学出版社,196—198。
- Gates, D. M., 1968, Transpiration and leaf temperature. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 19: 211—238。

A PRELIMINARY ANALYSIS ON RELATIONSHIP BETWEEN TRANSPIRATION INTENSITY OF PLANT AND ENVIRONMENTAL FACTORS IN *KOBRESIA HUMILIS* MEADOW

Shen Zhenxi, Yang Futun and Zhong Haimin

(Northwest Plateau Institute of Biology, The Chinese Academy of Sciences)

This study was carried out at Haibei Research Station of Alpine Meadow Ecosystem during the growing season from May to September in 1988. The diurnal and seasonal transpiration intensity for twelve plant species was measured by the method of cobalt paper in *Kobresia humilis* meadow, and at the same time, the data of environmental factor were also recorded.

The average value of transpiration intensity of 12 plant species in *Kobresia humilis* meadow was $9.5503 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, the value of *Kobresia humilis* [$11.4463 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] was highest and the value of *Gentiana straminea* [$6.316 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$] was the lowest; the interspecific difference is related to anatomical characteristics and metabolism. The seasonal courses showed that the transpiration intensity of plants increased gradually from May, and reached the maximum value in July or August, and then decreased gradually to September. Diurnal variations of transpiration intensity for plants in this meadow changed along with the variation of environmental factors and the diurnal courses showed single peak curve in growing season, but they were related closely with regularity of stoma opening or closing and developing rhythm of plants. The major environmental factors which influence the transpiration intensity of plants in this meadow are in such order: leaf temperature > soil surface temperature > air temperature > soil temperature > light intensity > soil water. The regressive equation of transpiration intensity to these factors was established by the method of successive regression or simple nonlinear regression.

Key words: *Kobresia humilis* meadow; Transpiration intensity; Environmental factors.