

刺槐与环境因子相关性的缩元递阶矢量分析

赵丽英¹, 宋玉伟¹, 杨建伟^{1,2}, 杜敏华¹, 杜瑞卿^{1,*}

(1. 南阳师范学院生命科学与技术学院 河南南阳 473061; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了研究环境因子对刺槐综合影响, 揭示其重要影响因子, 研究设置了水分适宜、干旱、严重干旱 3 种不同生境, 从环境因子——刺槐生理变化——刺槐生长状况 3 个层次采用多个指标进行了实验观测。根据实验结果, 利用缩元递阶矢量分析法对层与层间的关系进行分析。分析结果表明: 土壤有效供水量和温度是两个重要的因子。在水分适宜的条件下, 环境因子对叶水势和 *WUE* 有一定的影响, 对其它生理指标没有明显影响, 刺槐基本上不受环境因子的制约, 能够按自身生理发展。但随着干旱加重, 环境因子对刺槐的影响加重, 刺槐的生理变化受环境因子的制约。在干旱、严重干旱的条件下, 光合速率, 蒸腾速率, *WUE* 是 3 个重要指标, 生理变化对枝条生长有制约性。刺槐在生长季内的生物总量明显下降, 土壤水分对刺槐的生长、成活有重要影响。由此得出: 刺槐的生长与土壤水分、土壤有效供水量、温度等环境因子关系密切, 种植刺槐时要注意它的生存环境, 特别是土壤的水分含量。缩元递阶矢量分析法是一种值得应用的好方法。

关键词: 缩元递阶矢量分析法; 刺槐; 环境因子; 相关性

文章编号: 1000-0933 (2009) 08-4147-10 中图分类号: Q945 文献标识码: A

Reducing variable hierarchical vector analysis of correlations between *Robinia pseudocacia* and environmental factors

ZHAO Li-Ying¹, SONG Yu-Wei¹, YANG Jian-Wei^{1,2}, DU Min-Hua¹, DU Rui-Qing^{1,*}

1 College of Life Science and Technology Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4147 ~ 4156.

Abstract: In order to investigate relations between *Robinia pseudocacia* and environmental factors and find out the important influencing factors, we obtained data of growth of *R. pseudocacia* under three soil water conditions, that is favorable, medium drought and serious drought soil water condition, which respectively hold about 70%—80%, 50%—60% and 30%—40% of field water capacity and we also employ indicators from three levels—environmental factors, physical changes, and the growth situation to test and observe. The data was analyzed in a Hierarchical vector way. The results showed that the soil effective supplying water and temperature played important roles in this process. When the water content changed from favorable to medium drought or to serious drought, the influence of the environmental factors (including water, temperature etc.) on potentials leaf water and water use efficiency (*WUE*) was deepened gradually, but other physiology has no obvious changes. While photosynthetic rate, transpiration rate and *WUE* of *R. pseudocacia* were inhibited seriously. The total biomass of *R. pseudocacia* decreased remarkably. Water content of soil affects the survival and growth of *R. pseudocacia* obviously. In conclusion, the growth of *R. pseudocacia* has close relation to water content of soil, effective supplying water of soil and temperature etc. Therefore, our result approved reducing function hierarchical vector analysis is a reasonable method.

Key Words: reducing variable hierarchical vector method; *Robinia pseudocacia*; environmental factor; correlation

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90302005); 中国科学院知识创新基金资助项目(KZCX1-06)

收稿日期: 2008-05-15; 修订日期: 2009-02-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duruiqing8@163.com

刺槐 (*Robinia pseudacacia*) 林是黄土高原半干旱半湿润地区植被恢复和重建的主要人工林类型之一,作为一种典型的中生树种,既喜湿润肥沃的土壤又耐干旱瘠薄,有较强的适应性和抗逆性^[1],同时还具有繁殖快、生长快特点,成为我国水土保持林的先锋树种,它对改善生态环境、防治水土流失、调节水文状况发挥着重要的作用。因此几十年来,作为黄土高原主要的水土保持树种,人工刺槐林得到大面积的营造^[2],但由于刺槐的耗水性特强,过高的林分密度造成了严重的林地土壤水分亏缺,出现土壤干化现象^[3~5],进一步恶化了林地的水分生态环境,使刺槐生长受到影响,造成目前黄土高原出现了大面积的“小老树”,从而严重制约了黄土高原的植被建设。为了寻求解决土壤水分亏缺的理论依据和方法,很多学者对林地水分进行了广泛的研究。研究表明,水分(尤其是土壤水分)对植物的生长、蒸腾、光合及有机物运输等生理过程具有明显的影响,从而影响植物对水资源的利用效率^[6]。因此,在水分是植被生产力第一决定因子的干旱半干旱地区,以主要抗旱造林树种——刺槐为研究对象,探索刺槐生理变化与环境因子的关系,分析不同土壤水分条件下刺槐的生理生态特点,对于提高黄土高原人工刺槐林的造林成活率和水利用效率有重要的意义。

虽然关于研究刺槐生理变化及其与环境因子的关系,已有一些报道^[7~10],但存在以下几个方面的不足:(1)大多数研究主要通过时间与某一指标或单一指标与单一指标的相关性回归性进行计算和文字性的描述,缺少综合性。事实上,环境因子是多因素的,植物生理变化也是多方面的,环境因子对植物生理的影响,往往并非是单因素与单指标的关系,而是群体因素与群体生理指标的群体关系。目前,关于多变量组间关系的研究,主要有典型相关分析、回归分析法等^[11]。实际上,植物生理变化与环境因子间的关系也并非都是线性的对应关系,用典型相关分析、回归分析法有时很难揭示它们之间的关系,结果并不理想。(2)大多数研究停留在平面层结构上,主要研究环境与植物生理的关系。实际上,环境首先影响植物生理,而植物的生理变化最终影响植物生长状况和生存状态,应该从环境因子-植物生理-植物生长 3 个层次的立体结构去研究。(3)环境对植物生理的影响,植物生理对生长的影响,往往并非能用线性知识或函数关系来表达出来,而应该考虑它们各自变化方向的一致性程度来揭示它们的关系。

基于以上几个方面的原因,本研究选择刺槐作为研究对象,设置 3 种土壤水分条件,采取分层次多指标进行实验观测,利用缩元递阶矢量分析法进行分析,旨在为刺槐的研究、种植、保护提供科学的理论依据,同时,也为推广新的研究方法,为生态学研究提供重要的参考资料。缩元递阶矢量分析法的基本思想是:用因子分析法分析刺槐生理指标,得出 2 主因子。对环境因子进行主成分分析,得出 2 主成分。由于各主成分所包含的信息大小不等,所以,按信息大小比例(特征值比例)进行矢量合成,假设为合成 D 矢量。相信合成 D 矢量中包含对生理指标影响的主要因子成分,因此,将计算 D 矢量在刺槐生理指标的 2 主因子上的投影,作为环境因子对某一生理指标的影响因素。

1 材料与方法

1.1 试验材料与土壤水分胁迫处理

本试验采用黄土高原常见的造林树种刺槐,由中国科学院安塞生态试验站提供 1 年生的实生苗。试验用土采用该站的黄绵土,田间持水量为 21.5%,盆栽条件下对刺槐分别设置 3 个供水水平:适宜水分、中度干旱、严重干旱,含水量分别是土壤持水量的 70%~80% (A 组)、50%~60% (B 组)、30%~40% (C 组),各处理组分别设置 20~25 盆重复,每盆栽植 3~4 株苗,待成活后选择大小基本一致的苗木保留 2 株,各苗木于 2006 年 3 月初植入口径 30cm 高 50cm 的生长钵内。生长钵放置于中国科学院水土保持研究所的可移动模拟干旱防雨棚内,雨天用防雨棚遮雨,晴天露地生长。从移栽次日开始,每天定时用电子秤(最大称量 15 kg,最小感量 5g)称重控制土壤含水量,并加水补充其蒸腾损失,为排除土壤蒸发用塑料薄膜覆盖盆面裸土。整个试验持续至 10 月中旬结束。

1.2 测定项目及方法

(1)新生枝条生长速率测定 从移栽苗木的次日起,每隔 15d 用毫米刻度尺定枝测量新生枝条长度的变化,计算枝条的生长速率。

(2) 光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr)的测定 从各树种叶片完全展开起,在每月选择晴朗的天气于早上 9:00 ~ 10:00 用 Licor-6400 型便携式光合仪测定,每处理选 5 ~ 6 片成龄叶片,取其平均值。

(3) 水分利用率(WUE)的测定 单叶水分利用率 = 光合速率(P_n)/蒸腾速率(Tr);总水分利用率 = 生长季总生物量(g)/生长季总耗水量(kg)。

(4) 生长季总生物量的测定 生长季总生物量为试验期间各树种苗木生物量的增量,在试验结束时(10 月中旬)将各苗木连根取出烘干称重后的总干重加上落叶干重之和再减去栽前干重。栽前干重的测定:选取与将要移栽的苗木大小一致的苗木 10 株,烘干称重,计算出各苗木单株栽前干重。

(5) 土壤有效供水量、总耗水量及成活率的测定 每天定时称盆重,在排除土壤蒸发和苗重的增量后,以盆重的减少量为树种的当日土壤有效供水量,并加水补充至设定土壤含水量;总耗水量为整个试验期内每天加水量之和;成活率的测定:试验结束时统计各树种在各种土壤水分下的成活数(含试验中拨去的活植株)与总植入植株数的比值。

(6) 光照强度、温度、相对湿度的测定 利用 Licor-1600 稳态气孔计测定蒸腾速率,同时记录。

1.3 缩元递阶矢量分析法

植物的生长受到很多环境因子的影响,但不同的因子对不同的植物影响程度不同,不同的因子对同一植物的影响程度也不同。植物的生长情况又是通过多项生理指标加以考核,各项生理指标又与环境因子之间有关系,植物生长的最终结果,又是多项生理活动的结果。可以把植物的生长与环境的关系从 3 个层次上加以分析。有的层次变量(指标)较多,在研究层次之间的变量关系时,需要减少变量,缩小变量的元数。所以本文提出一种研究植物生长生态缩元递阶矢量分析法。

(1)、设立指标,建立层次

可设立 3 层:第一层是环境因子层,本文选择了在 3 种不同干旱状态下的土壤有效供水量、光辐射强度、温度、相对湿度 4 个指标,从 3 月到 9 月进行动态检测。

第二层为生理指标层,本文选择了在 3 种不同干旱状态下的叶水势、叶含水量、光合速率、蒸腾速率、 WUE 5 个指标,从 3 月到 9 月进行动态检测。第三层为结果层,主要反映植物生长的物质量,包括枝条生长净增长量、成活率、根干重、地上干重、总生物量、总水分利用率 6 个指标。

(2)、确立层次间的递进关系

第一层环境因子层对第二层生理指标的影响,实际上是一个整体环境因素与植物机体生理活动的关系,是群体与群体的关系,如果单从环境某一因素与生理某一指标间进行相关分析,可能并不会显著相关。环境因子与生理指标也并不一定表现为线性关系,所以,回归分析也不一定理想。事实,环境因子一定对生理指标存在影响,如何反映这种影响关系,本文提出了一种新的合理的办法。

设 Q 为一带有单位的原变量,为了消除单位的影响,对 Q 进行标准化处理形成新的无量纲变量 M :

$$M_i = \frac{Q_i - \bar{Q}}{S} \quad (1)$$

式中, M_i 为 M 的分量, Q_i 为 Q 的分量, $\bar{Q}$ 为 Q 的均值, S 为 Q 标准差。

依据公式(1)可对各变量进行无量纲标准化处理。

令生理指标叶水势、叶含水量、光合速率、蒸腾速率、 WUE 为 5 个变量: X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 (为标准化处理后的变量)。对 5 变量进行主成分分析和因子分析,可得到若干个主成分(一般依据方差累计贡献率 $\geq 85\%$ 时,确定主成分个数,一般不超过 3 个),本文以 3 个为例说明。

主成分模型:

$$\begin{aligned} F_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + a_{14}X_4 + a_{15}X_5 \\ F_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + a_{24}X_4 + a_{25}X_5 \\ F_3 &= a_{31}X_1 + a_{32}X_2 + a_{33}X_3 + a_{34}X_4 + a_{35}X_5 \end{aligned} \quad (2)$$

F_1 、 F_2 、 F_3 为第一主成分、第二主成分、第三主成分。

因子分析模型:

$$\begin{aligned} X_1 &= b_{11} Y_1 + b_{12} Y_2 + b_{13} Y_3 \\ X_2 &= b_{21} Y_1 + b_{22} Y_2 + b_{23} Y_3 \\ X_3 &= b_{31} Y_1 + b_{32} Y_2 + b_{33} Y_3 \\ X_4 &= b_{41} Y_1 + b_{42} Y_2 + b_{43} Y_3 \\ X_5 &= b_{51} Y_1 + b_{52} Y_2 + b_{53} Y_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为公共因子。

令环境因子(指标)土壤有效供水量、光辐射强度、温度、相对湿度为变量 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 (为标准化处理后的变量),对 4 变量进行主成分分析:

$$\begin{aligned} E_1 &= c_{11} Z_1 + c_{12} Z_2 + c_{13} Z_3 + c_{14} Z_4 \\ E_2 &= c_{21} Z_1 + c_{22} Z_2 + c_{23} Z_3 + c_{24} Z_4 \\ E_3 &= c_{31} Z_1 + c_{32} Z_2 + c_{33} Z_3 + c_{34} Z_4 \end{aligned} \quad (4)$$

E_1 、 E_2 、 E_3 为第一主成分、第二主成分、第三主成分。基于事实,应该相信环境因子对刺槐生理变化存在影响,可能有重要影响,环境因子应该构成生理指标因子分析中主要因子的组成部分,因此,应该寻求环境因子的主成分在生理指标因子分析中主要因子上的影响量。

首先,对环境因子主成分进行矢量合成。

设 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为第一主成分、第二主成分、第三主成分的特征值,依据各主成分所占的信息量,对 E_1 、 E_2 、 E_3 进行向量合成,由于第 i 主成分所含信息量为方差贡献率 d_i , $d_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i}$,所以合成向量时,以第一主成分

为单位,按特征值大小比例进行合成。令合成向量为 D ,于是,

$$D = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} E_2 + \frac{\lambda_3}{\lambda_1} E_3 + E_1 \quad (5)$$

其次,求主成分合成向量在生理指标各主要因子上的投影(分量):

令 D 与 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ,

$$\cos \theta_i = \frac{\|Y_i\|^2 + \|D\|^2 - \|D - Y_i\|^2}{2 \times \|D\| \times \|Y_i\|} \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

那么 D 在 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 上的分量: $D_1 = D \cos \theta_1$, $D_2 = D \cos \theta_2$, $D_3 = D \cos \theta_3$ (7)

最后,依据公式(7),求解环境因子对各生理指标的影响值。

将 D_1 、 D_2 、 D_3 替换 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 ,将得出 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 的环境影响预测值 X'_1 、 X'_2 、 X'_3 、 X'_4 、 X'_5 ,然后分别对 X_i 与 X'_i 进行相关分析和检验。这样就可以分析出环境因子对生理指标的影响程度。

在公式(2)中,通过系数 a_{ij} 的大小,分析 X_i 的相对重要性,在公式(4)通过系数 c_{ij} 的大小,分析 Z_i 的相对重要性。

同理,依据公式(5)对 F_1 、 F_2 、 F_3 进行向量合成,令合成向量为 H 。

令枝条生长净增长量为变量 W (为标准化处理后的变量),对 H 与 W 进行相关分析检验。这样就可以分析出生理指标对枝条生长净增长量的影响程度。

2 实验结果

关于刺槐的生长指标、生理指标和环境因子(指标)的测定结果见表 1~4。

2.1 环境指标

从表 1 看出,在适宜水分、中度干旱、严重干旱 3 种不同的生境下,土壤有效供水量在各月的变化不同。

高峰期主要在 6 月到 8 月份之间,这可能与光照、温度有关。但随着土壤水分含量的下降,土壤有效供水量也明显下降,在严重干旱下土壤有效供水量最少。结合表 3,从生物生长量与水分利用比来看,中度干旱下利用率最高。对 4 个环境指标进行主成分分析,结果在 3 种状态下,第一主成分和第二主成分的方差累积贡献率都大于 92%,所以只取 2 个主成分。

表 1 环境指标测量值

Table 1 Measurement values of environmental indicators

月份 Month	土壤有效供水量(kg) Soil effective supplying water			光辐射强度(klx) Light intensity(klx)	温度(℃) Air temperature	相对湿度(%) Air humidity
	A 组 Group A	B 组 Group B	C 组 Group C			
3	0.158	0.045	0.044	8387.10	8.1	67
4	0.491	0.381	0.028	9670.05	14.1	70
5	4.475	3.252	2.108	10300.46	19.1	70
6	6.633	4.819	3.338	10304.15	25.2	59
7	7.990	5.672	3.754	9779.08	26.6	72
8	7.599	5.324	3.642	8718.89	25.5	74
9	3.872	2.819	1.746	6787.09	19.4	80
平均值 Average	4.460	3.187	2.094	9135.26	19.7	70.3
标准差 SD	3.205	2.284	1.596	1269.61	6.8	6.4

表 2 刺槐生理指标测量值

Table 2 Measurement values of *Robinia pseudocacia* physiological indices

月份 Month	叶水势(MPa) Leaf water potential			叶含水量(%) Leaf water content			光合速率($\text{ng}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Photosynthesis rate		
	A 组	B 组	C 组	A 组	B 组	C 组	A 组	B 组	C 组
	Group A	Group B	Group C	Group A	Group B	Group C	Group A	Group B	Group C
3	1.2	1.6	2.8	60.4	59.8	58.3	16.5	11.5	8.36
4	1.1	1.5	2.5	61.2	58.4	55.9	20.0	14.4	10.5
5	0.8	1.0	1.0	65.6	65.0	64.1	30.2	21.3	14.6
6	0.6	1.3	1.7	65.2	64.0	59.7	60.8	56.9	35.0
7	0.8	1.4	2.0	65.3	63.5	57.8	155.2	105.7	53.3
8	1.2	1.6	2.2	61.7	61.0	58.0	39.5	32.0	17.0
9	1.1	1.7	2.7	61.0	59.3	56.8	23.1	18.6	11.4
平均 Average	1.0	0.97	2.1	62.9	62.9	58.7	49.3	37.2	21.5
标准差 SD	0.2	0.24	0.6	2.3	2.3	2.7	49.0	33.9	16.6

各组在各月内的重复实验结果,方差分析无显著差异 There have no significant differents at the repeated experimental results in each group at his month

表 3 刺槐生理指标测量值及枝条生长净增量测量值

Table 3 *Robinia pseudocacia* physiological indices and branch growth rate

月份 Month	蒸腾速率($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Transpiration rate			WUE ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			枝条生长净增量(cm) Branch growth rate		
	A 组	B 组	C 组	A 组	B 组	C 组	A 组	B 组	C 组
	Group A	Group B	Group C	Group A	Group B	Group C	Group A	Group B	Group C
3	7.4	5.4	4.5	2.3	2.1	1.9	1.4	0.0	0.0
4	8.5	6.5	5.2	2.4	2.2	2.0	9.5	10.7	6.4
5	8.8	7.1	5.5	3.4	3.0	2.7	7.7	6.9	5.7
6	9.6	9.1	8.3	6.3	6.3	4.2	3.2	0.3	1.2
7	21.1	18.0	10.7	7.3	5.9	5.0	0.8	0.0	0.8
8	16.7	14.2	8.5	2.4	2.3	2.0	0.2	0.0	1.2
9	10.6	8.7	5.8	2.2	2.1	2.0	0.1	0.8	0.2
平均 Average	11.8	9.9	6.9	3.8	3.4	2.8	3.3	2.7	2.2
标准差 SD	5.1	4.6	2.3	2.16	1.8	1.3	3.8	4.3	2.7

各组在各月内的重复实验结果,方差分析无显著差异 There have no significant differents at the repeated experimental results in each group at his month

表 4 刺槐生长总量值及总水分利用率

Table 4 Total biomass and total water use efficiency of *Robinia pseudocacia*

组别 Different groups	成活率(%) Survival rate	根干重(g) Root dry weight	地上干重(g) Branch dry weight	总生物量增量(g) Total biomass increment	总水分利用率($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Total water use efficiency
A 组 Group A	100.00	71.21 $\pm$ 0.21A	90.89 $\pm$ 0.45A	153.13 $\pm$ 0.37A	6.27 $\pm$ 0.42B
B 组 Group B	92.10	55.68 $\pm$ 0.45B	64.72 $\pm$ 0.34B	112.27 $\pm$ 0.43B	6.78 $\pm$ 0.45A
C 组 Group C	43.20	28.03 $\pm$ 0.26C	27.73 $\pm$ 0.28C	47.20 $\pm$ 0.31C	5.66 $\pm$ 0.33C

表中英文字母表示同列方差分析,小写示 $\alpha = 0.05$ 水平,大写示 $\alpha = 0.01$ 水平(SSR 检验) English alphabets mean the analysis of variances of same row data in table, small alphabets mean $\alpha = 0.05$, capital alphabet mean $\alpha = 0.01$ (SSR test)

A 组环境指标的主成分模型:

$$E_1 = 0.541Z_1 - 0.161Z_2 + 0.506Z_3 - 0.09Z_4$$

$$E_2 = -0.157Z_1 + 0.55Z_2 - 0.007Z_3 + 1.321Z_4$$

B 组环境指标的主成分模型:

$$E_1 = 0.539Z_1 - 0.163Z_2 + 0.507Z_3 - 0.089Z_4$$

$$E_2 = -0.154Z_1 + 0.549Z_2 - 0.008Z_3 + 1.32Z_4$$

C 组环境指标的主成分模型:

$$E_1 = 0.551Z_1 - 0.157Z_2 + 0.495Z_3 - 0.076Z_4$$

$$E_2 = -0.214Z_1 + 0.528Z_2 + 0.074Z_3 + 1.295Z_4$$

从 3 模型的系数来看,第一主成分有重要影响的因子为土壤有效供水量和温度,第二主成分有重要影响的因子为光辐射强度和相对湿度,但第一主成分所占信息量大,所以说土壤有效供水量和温度是重要因子。利用公式(5)对 3 种状态下的 E_1 和 E_2 进行合成向量 D 。

2.2 生理指标

从表 2 和表 3 可以看出,随着干旱程度的增强,叶水势和叶含水量都下降,特别是叶水势下降明显。在各月的表现上也出现前后低中间高的现象,这可能与光照和温度前后低中间高的现象有关。光合速率、蒸腾速率、 WUE 的高峰期是 6 月到 8 月份,但 WUE 高峰期主要在 6 月和 7 月份。从 3 种不同干旱状态来看,各项指标也表现出随干旱加重而下降的趋势,土壤水分对刺槐生理有重要影响。

将各项生理指标与各环境因子进行相关分析,结果表明,A 组,叶含水量与光辐射强度、光合速率、蒸腾速率与土壤有效供水量、蒸腾速率与温度有显著相关性。B 组,叶水势(X_1)、叶含水量(X_2)与光辐射强度(Z_2)、光合速率(X_3)与土壤有效供水量(Z_1)、温度(Z_3)、蒸腾速率(X_4)与土壤有效供水量(Z_1)、温度(Z_3)有显著相关性。C 组,叶水势(X_1)与光辐射强度(Z_2)、光合速率(X_3)与土壤有效供水量(Z_1)、蒸腾速率(X_4)与土壤有效供水量(Z_1)、温度(Z_3)有显著相关性。可见,在不同的状态下,不同的环境因子对不同的生理指标有不同的影响,表现出一定的复杂性,单从一对一的相关分析中很难把握环境因子对刺槐生理的整体影响。

生理指标做为中间层,既要研究与环境因子的相互关系,还要研究与生长指标的关系,所以对 5 项生理指标进行主成分分析和因子分析,结果在 3 种状态下,第一主成分和第二主成分的方差累积贡献率都大于 92%,所以只取 2 个主成分。

A 组生理指标主成分模型:

$$F_1 = -0.433X_1 + 0.811X_2 - 0.223X_3 + 0.023X_4 - 0.149X_5$$

$$F_2 = 0.261X_1 + 0.206X_2 + 0.263X_3 + 0.817X_4 - 0.153X_5$$

B 组生理指标主成分模型:

$$F_1 = -0.426X_1 + 0.941X_2 - 0.253X_3 + 0.012X_4 - 0.284X_5$$

$$F_2 = 0.265X_1 + 0.168X_2 + 0.311X_3 + 0.812X_4 - 0.197X_5$$

C 组生理指标主成分模型:

$$F_1 = -0.266X_1 - 0.045X_2 - 0.992X_3 + 0.869X_4 + 0.972X_5$$

$$F_2 = -0.943X_1 + 0.979X_2 + 0.072X_3 - 0.010X_4 + 0.216X_5$$

从三模型系数的绝对值大小来看,在水分适宜、中度干旱的情况下主要生理指标为叶水势(X_1),叶含水量(X_2),但在严重干旱的情况下,光合速率(X_3),蒸腾速率(X_4),WUE (X_5)成为主要指标。

利用公式(5)对 F_1 和 F_2 进行向量合成,形成新的向量 D 。

A 组生理指标因子分析模型:

$$X_1 = -0.943Y_1 - 0.023 Y_2$$

$$X_2 = 0.960Y_1 + 0.262 Y_2$$

$$X_3 = 0.391Y_1 + 0.798Y_2$$

$$X_4 = 0.06 Y_1 + 0.993 Y_2$$

$$X_5 = 0.678 Y_1 + 0.456Y_2$$

B 组生理指标因子分析模型:

$$X_1 = -0.895Y_1 - 0.059 Y_2$$

$$X_2 = 0.947Y_1 + 0.281Y_2$$

$$X_3 = 0.388Y_1 + 0.771Y_2$$

$$X_4 = 0.099 Y_1 + 0.987 Y_2$$

$$X_5 = 0.621 Y_1 + 0.371Y_2$$

C 组生理指标因子分析模型:

$$X_1 = -0.266Y_1 - 0.943 Y_2$$

$$X_2 = -0.045Y_1 + 0.979Y_2$$

$$X_3 = 0.992Y_1 + 0.072Y_2$$

$$X_4 = 0.869Y_1 - 0.01 Y_2$$

$$X_5 = 0.972Y_1 + 0.216Y_2$$

根据环境因子主成分合成的向量 D ,利用公式(6)和(7)对 D 进行运算,并代入公式(3)中(生理因子模型中)可得到叶水势(X_1),叶含水量(X_2),光合速率(X_3),蒸腾速率(X_4),WUE (X_5)5 个变量的环境影响预测值 X^1, X^2, X^3, X^4, X^5 ,然后分别对 X_i 与 X^i 进行相关分析,结果见表 5。

表 5 生理指标实测值与环境因子影响预测值的相关系数

Table 5 Correlative coefficients between observation values of physiological indices and estimated values of environmental factor

组别 Different groups	X_1 与 X^1	X_2 与 X^2	X_3 与 X^3	X_4 与 X^4	X_5 与 X^5
A	0.193	0.761 *	0.757 *	0.869 *	0.384
B	0.003	0.283	0.505	0.803 *	0.193
C	0.264	0.004	0.459	0.687	0.326

* $P < 0.05$

表 5 表明,在适宜的水分条件下,刺槐受环境的制约较少,基本能够按自身的生理生长,所以生理表现出的指标值与从环境因子预测的值在多个指标上有显著差异,在中度干旱下,刺槐受环境的制约增强,生理表现出的指标值与从环境因子预测的值仅在一个指标上有显著差异,其它指标无显著差异。到严重干旱下,刺槐受环境的制约进一步增强,在 5 个指标上都无显著差异了。

利用公式(5)对生理 2 主成分进行合成,形成新的向量 H ,以便与枝条生长净增量 W 进行相关分析。

2.3 生长量指标

从表 3 看出,枝条生长净增量主要在 4 月和 5 月份,其它月份生长很小,而且随土壤水分含量的下降,增

长量也在减少。与适宜水分条件相比,在中度干旱和严重干旱下,分别下降 18.78% 和 30.7%。枝条生长净增量在各月的变化与生理指标的变化并不同步,与生理指标无显著相关性。利用公式(6)可求出枝条生长净增量 W 与生理主成分合成向量 H 之间的夹角余弦值。余弦值的大小反映了生理指标变化的方向与生长净增量变化的方向的差异,也说明生理指标变化的信息量在枝条生长净增量变化方向上的投影大小,余弦值越大,说明生理指标变化对枝条生长净增量变化的促进就越大,计算结果如下:

水分适宜的条件, $\cos\theta = 0.348$; 中度干旱的条件, $\cos\theta = 0.147$, 严重干旱的条件下, $\cos\theta = -0.102$ 。表明水分适宜的条件下,5 个生理指标的变化与枝条生长净增量变化有较大共向性,能促进枝条生长,但干旱条件下,与枝条生长净增量变化的共向性减少,促进作用减弱,特别是在严重干旱下,此时 5 个生理指标的变化滞后于枝条生长净增量变化,表现出一定的反向性。

根系的生长是反映植物忍耐干旱胁迫的一个重要的指标。从表 4 可以看出,随着土壤含水量的下降,刺槐在整个生长季中根干重、茎叶干重下降显著。其根干重和茎叶干重均表现为适宜土壤水分下最高,严重干旱下最低,但根冠比却是在严重干旱下最高,适宜水分下最低,每 3 种处理之间的差异性均达到极显著水平,表明在干旱胁迫下刺槐根的生长和茎叶生长受到显著抑制,但茎叶生长受到的影响比根大。在适宜水分的总耗水量分别是中度干旱和严重干旱下的 1.49、2.93 倍,在适宜水分下总生物量分别是中度干旱和严重干旱下的 1.36、3.24 倍。方差分析其差异性均达极显著水平。刺槐总耗水量和总生物量的高低和土壤水分含量之间密切相关,但刺槐的总水分利用率则为中度干旱时最高,严重干旱下最低,与韩蕊莲等人对沙棘的研究结果基本上一致^[4]。

3 结论

通过对实验结果的统计分析,可以得出以下几点结论。

(1) 在本文研究的环境因子中,最重要的是土壤有效供水量和温度,而且随着干旱加重,影响作用越显著,研究表明刺槐属于高耗水树种,这与杨建伟等人研究结果基本一致^[12]。

(2) 环境因子对刺槐生理的影响,随着干旱程度的加重,影响越明显。在水分适宜的条件下,环境因子对叶水势(X_1)和 WUE (X_5) 有一定的影响,对叶含水量(X_2),光合速率(X_3),蒸腾速率(X_4)没有明显影响,刺槐基本上不受环境因子的制约,能够按自身生理发展。但随着干旱加重,环境因子对刺槐的影响加重,刺槐的生理变化受环境因子的制约。

(3) 在水分适宜、中度干旱的情况下主要生理指标为叶水势(X_1)和叶含水量(X_2),但在严重干旱的情况下,光合速率(X_3),蒸腾速率(X_4), WUE (X_5) 成为主要指标。这与接玉玲等人^[13~15]对其他树种的研究结果基本一致。

(4) 生理指标的变化基本上不与枝条生长净增量同步变化,枝条生长净增量与各生理指标都无显著相关性。在水分适宜的条件下,刺槐生理变化与枝条生长基本上呈一致方向,对枝条生长有促进作用。但随着干旱加重,刺槐生理变化已不能满足枝条生长的变化,对枝条生长的促进作用减弱。在严重干旱下,已对枝条生长有一定的制约。

(5) 土壤水分的含量对刺槐总生长量的影响明显。随着干旱加重,刺槐的根干重、地上部干重、总生物量都明显下降,成活率也明显下降,土壤水分的含量对刺槐生长有重要影响^[16,17]。

(6) 本文所提出的缩元递阶矢量分析法,采取分层次、缩减变量元递进性研究。在研究不同层次间的关系时,采用向量合成、向量分解和向量投影的方法,没有采用线性回归方法。从分析结果来看,也基本上能正确反映研究对象间的关系。本方法有一定的合理性、创新性和有效性,对其进行介绍,对植物生态研究者能有一些借鉴意义。同时该方法也有待进一步深入研究。

4 讨论

由于环境因子对刺槐生理的变化影响较大,而环境因子如光照、温度、相对湿度又往往是人力所难控制的因素,在种植刺槐这些高耗水树种时,要注意它的生存环境。在西北干旱、半干旱地区造林时,要特别注意当

地土壤水分是否能达到树种生长对水分的要求,尽可能使有限的水资源得到充分合理的利用,提高水分利用率。尤其是在黄土高原地区,仅有的降水主要集中在 7~9 月份,3~6 月份的水分条件不能满足刺槐这种高耗水量树种快速生长及干物质积累对水分的需要,所以在黄土高原造林时,对于刺槐这种高耗水量树种应尽可能建立在阴坡、沟道等立地水分条件较好的地带,以提高它成活率。

在研究刺槐生长与生理变化的关系时,所的选择枝条生长净增量与各生理指标的变化并不同步变化,没有显著相关性,这就难于用一般的方法揭示它们的关系。在研究环境因子与生理指标的关系时,虽已选 4 个环境因子指标,但还有土壤的营养、理化特性、风力、空气污染程度等因素的影响还未排除,这也将影响我们的结果。所以,在选择指标时应遵循两个原则:第一,在允许的情况下,多选几个指标。第二,要选择相互影响较大的指标。

目前,关于环境因子与植被(或群落)关系的研究,主要有基于 PCA(主成分分析)上产生出来的 CPCA(典范主分量分析)、CCA(典范对应分析)、DCCA(除趋势典范对应分析)、DCA(除趋势对应分析)等。但它们都是一种分类思想和方法,是基于 PCA 上的以分类单位或实体(研究单位)作图的 Q 分析和以性状或指标作图的 R 分析的两种分类方法上的改进的新的分类法^[18~20]。在研究植被(或群落)与环境因子的关系时,是以环境因子与研究的植被(或群落)的主成分之间存在回归关系为前提条件进行研究的^[20]。事实上,“一般认为,线性模型不能很好地反映物种、植被与环境间的关系,因此,PCA 结果的解释较为困难而且有较大的主观性”^[20]。曾以刺槐的各项生理指标与环境因子之间,所有生理指标的各项主成分与环境因子之间都进行过逐步筛选回归分析,结果回归系数不显著,回归方程不显著。也就是在研究环境因子对生理指标的影响,采用 CPCA、DCA、CCA、DCCA 是不适宜的。CPCA、DCA、CCA、DCCA 分析环境因子对植被(或群落)(本文为生理指标)的影响,是以某环境因子在环境因子与植被(或群落)(本文为生理指标)各主成分的回归方程中的回归系数为坐标分量,形成矢量,以矢量的“模长的大小反映该环境因子与植物种和群落相关性大小,矢量与排序轴夹角的大小表示环境因子与排序轴相关性大小”^[20],显然这种反映是不够精确的,因为:(1)模长大小的实质意义不明确。(2)模长大小没有反映出某一环境因子对某一具体指标(群落或植被)的关系大小,反映的是所有指标(群落或植被)与某一环境因子的关系。

本文提出的缩元递阶矢量分析法,与 CPCA、DCA、CCA、DCCA 有所不同:(1)没有以“环境因子与研究的植被(或群落)的主成分之间存在回归关系为前提条件进行研究”。(2)生理指标与环境因子间的联系,不是通过线性模型进行关联,而是以矢量合成、矢量投影来反映某一生理指标与环境因子的关系,表示方向影响量,影响量是有数据表示的。

缩元递阶矢量分析法虽有能克服线性分析不足的优点,但也存在问题和不足:(1)主成分按何种方式进行合成最为合理有效,有待进一步研究。(2)合成的矢量按何种方式进行分解最为合理有效,有待进一步研究。(3)它反映的是某个群体的多个指标对另一个群体的某一个指标的影响,即多对一的关系,没有反映多对多的更复杂的关系,这也有待进一步的深化。(4)主成分分析、因子分析时,造成信息的损失,转化的变量、系数的直接意义不明确,变量的模长统一化,变量间失去了绝对差值大小的意义。所以,有待同仁者的进一步研究。

References:

- [1] Tree Compilation Committee in China. The major afforestation tree species in china. Beijing: The Publishing House of Agriculture, 1976. 631—641.
- [2] Song Y F. *Robinia pseudoacacia* exploitation. China Forestry Science and Technology, 2002, 16(5): 11—13.
- [3] Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern regions of China. Scientia Silvae Sinicae, 1996, 32(1): 78—85.
- [4] Han R L, Liang Z S. Water consumption properties of adaptable nursery stocks on Loess plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(2): 210—213.

- [5] Guo X P, Zu J Z, Yu X X, *et al.* The preliminary discussion on reforming the low-yield locust in loess plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(4): 77—81.
- [6] Saltyer R O. *Plant-water Relationships*. London and New York: Academic Press, 1967. 45—48.
- [7] Wei S P, Wei Z X, Li S H, *et al.* Evaluation on suitability of *Robinia pseudocacia* forests in hill and gully region of western Shanxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, (2): 36—39.
- [8] Wang K Q, Wang B R. Study on thinning to *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 11—15.
- [9] Yang W W, Wang H Y. *Robinia pseudoacacia* transpiration rate and environment Factors in loess hilly region. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2005, 1: 20—22.
- [10] CAO Q G, Zhang X P, Niu L L, *et al.* Analyze and study on characteristics of artificial *Robinia pseudocacia* plantation physiological ecology in Loess Areas in West Shanxi. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3): 330—333.
- [11] Gao H S. *Application of multivariate statistic analysis*. Beijing: The Publishing House of Beijing University, 2005. 343—379.
- [12] Yang J W, Han R L, Wei Y K, *et al.* Water relation and growth of sea buckthorn and poplar under different soil water content. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(3): 579—586.
- [13] Jie Y L, Yang H Q, Cui M G, *et al.* Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3): 387—390.
- [14] Heitbelt J J. Water use efficiency and dry matter distribution in nitrogen-and water stressed winter wheat. *Agronomy Journal*, 1989, 81: 464—469.
- [15] Li H J, Chai B F, Wang M B. Study on the water physio-ecological characteristics of *Populus beijingensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 417—422.
- [16] Gao Y B, Liu Feng, Ren A Z, *et al.* Herbage production and water use of perennial pyegrass population under different types and levels of drought stress. *Journal of Plant Ecology*, 1999, 23(6): 510—520.
- [17] Ruan C J, Li D O. Study on the transpiration of artificial *Hippophae rhamnoides* L. forest in the loess hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2142—2146.
- [18] Xu K X. *Biological mathematics*. In: Xu, eds. Beijing: Science Press, 2001. 65—69.
- [19] Gao H S. *Application of multivariate statistic analysis*. Beijing: The Publishing House of Beijing University, 2005. 324—341.
- [20] Zhang J T. *The number of Ecology*. Beijing: Science Press, 2005. 133—177.

参考文献:

- [1] 中国树木志编纂委员会. 中国主要造林树种(上册). 北京: 农业出版社, 1976. 631~641.
- [2] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用. *林业科技开发*, 2002, 16(5): 11~13.
- [3] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78~85.
- [4] 韩蕊莲, 梁宗锁. 黄土高原适生树种苗木的耗水特性. *应用生态学报*, 1994, 5(2): 210~213.
- [5] 郭小平, 朱金兆, 余新晓, 等. 论黄土高原低效刺槐林改造问题. *水土保持研究*, 1998, 5(4): 77~81.
- [7] 卫三平, 卫正新, 李树怀, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区刺槐林适宜性调查研究. *山西水土保持科技*, 2001, 2: 36~39.
- [8] 王克勤, 王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 11~15.
- [9] 杨文文, 王洪英. 黄土丘陵刺槐蒸腾速率及其环境影响因子. *水土保持科技情报*, 2005, 1: 20~22.
- [10] 曹奇光, 张学培, 牛丽丽. 晋西黄土区人工刺槐林生理生态特点分析与研究. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 330~333.
- [11] 高惠璇. *应用多元统计分析*. 北京: 北京大学出版社, 2005. 343~379.
- [12] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲. 不同土壤水分状况对刺槐的生长及水分利用特征的影响. *林业科学*, 2004, 40(5): 93~98.
- [13] 接玉玲, 杨洪强, 催明刚, 等. 土壤含水量与苹果叶片水分利用率的关系. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 387~90.
- [15] 李洪建, 柴宝峰, 王孟本. 北京杨水分生理生态研究. *生态学报*, 2000, 20(3): 417~422.
- [16] 高玉葆, 刘峰, 任安芝, 等. 不同类型和强度的干旱胁迫对黑麦草实验种群物质生产与水分利用的影响. *植物生态学报*, 1999, 23(6): 510~520.
- [17] 阮成江, 李代琼. 黄土丘陵区人工沙棘蒸腾作用研究. *生态学报*, 2001, 21(12): 2142~2146.
- [18] 徐克学. *生物数学*. 北京: 科学出版社, 2001. 65~69.
- [19] 高惠璇. *应用多元统计分析*. 北京: 北京大学出版社, 2005. 324~341.
- [20] 张金屯. *数量生态学*. 北京: 科学出版社, 2005. 133~177.