

陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系

宋光¹, 温仲明², 郑颖¹, 丁曼¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为阐明刺槐植物功能性状在黄土高原不同环境下的变异规律, 探明刺槐对黄土高原环境的适应策略, 对陕西省境内从中部向北的 14 个县(市、区)的刺槐植物功能性状进行测定与统计分析。研究了不同生境刺槐植物功能性状的种内差异、刺槐功能性状间的相关关系及气象因子对刺槐植物功能性状的影响。结果表明: (1) 除叶氮含量(LNC)、根组织密度(RTD)和根氮含量(RNC)在各采样点之间的差异不显著之外, 其他 8 个性状在各采样点之间均表现出显著的差异($P < 0.05$)。 (2) 刺槐植物功能性状相互之间都有一定的相关关系, 比叶面积(SLA)与叶厚度(LT)、叶组织密度(LTD)和比根长(SRL)呈极显著负相关关系, 根磷含量(RPC)与叶磷含量(LPC)和比根长(SRL)呈显著正相关关系, 根组织密度(RTD)与比根长(SRL)呈极显著负相关关系。 (3) 逐步回归分析结果表明, 不同的气象因子对刺槐植物功能性状的影响是不同的, 对刺槐植物功能性状影响最大的气象因子是年均降水量(MAP)、年均温度(MAT)和年日照时数(ASR)。

关键词:植物功能性状; 刺槐; 黄土高原; 气象因子; 适应策略

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)03-0125-06

Relationships between Plant Functional Traits of *Robinia Pseudoacacia* and Meteorological Factors in Loess Plateau, North Shaanxi, China

SONG Guang¹, WEN Zhong-ming², ZHENG Ying¹, DING Man¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To elucidate the variation in plant functional traits and adaptive strategies of *Robinia Pseudoacacia* on the Loess Plateau, we measured 10 plant functional traits of *Robinia Pseudoacacia* in 14 counties along the middle area to the north of Shaanxi province, and analyzed the relationships among these functional traits along environmental gradients. The results showed that leaf nitrogen content (LNC) and root nitrogen content (RNC) have no significant differences among 14 sampling points, while other 8 plant functional traits showed significant differences among sampling points ($P < 0.05$). Specific leaf area (SLA), leaf thickness (LT), leaf tissue density (LTD) and specific root length (SRL) have significant negative correlations, and root tissue density (RTD) and specific root length (SRL) has the remarkable negative correlation. Different environmental factors had different impact on plant functional traits. It showed that mean annual precipitation has the greatest impact on plant functional traits of *Robinia pseudoacacia*, and followed by mean annual temperature and annual sunlight ratio according to the stepwise regression analysis.

Key words: plant functional traits; *Robinia pseudoacacia*; Loess Plateau; environmental factors; adaptive strategies

植物在进化过程中, 通过不断与周围环境的选择与被选择过程, 形成许多外在形态和内在生理上的适应策略, 这些生态适应特征表现为植物性状 (plant

traits)^[1]。其中能够响应环境变化或对生态系统的过程和功能有一定影响的植物性状被称为植物功能性状 (plant functional traits)^[2], 如比叶面积、叶厚

度、比根长、根的氮磷含量和冠层高等。研究表明,植物在与环境相互作用过程中,总会以“扬长避短”的方式最大程度地减小不利的环境影响^[3],叶氮含量随降水的减少而增加,而比叶面积随降水的减少而减少的变化规律,与植物利用最小的水分消耗,获得最大的碳收入的适应对策密切相关^[4-5]。因此,研究植物功能性状随环境的变化规律可以很好地揭示植物对环境的适应策略。

植物叶片是植物进行光合作用的主要器官^[6],也是与环境接触面积最大对环境变化最敏感的植物器官。因此,植物叶片的很多功能性状被认为是了解植物对环境适应策略的重要性状^[7]。研究表明,在贫瘠环境中,比叶面积较小且叶寿命较长^[8-9],这与植物在干旱条件下构建防卫结构并防止水分丧失的适应策略密切相关。与地上部分叶片相对应,植物细根是植物地下部分最重要的营养器官,植物细根性状特征对植物的生长和分布具有重要的指示作用,且能承载一定的环境变化信息^[10]。研究表明,植物叶片的功能性状与细根的功能性状间存在一定的关联,这种关联对于理解植物在生长过程中的资源分配和利用过程及其对环境的适应机理具有十分重要的意义^[11-12]。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)原生长于北美,17世纪引入欧洲,20世纪初期引入我国^[13]。20世纪70年代末到80年代初,陕北黄土高原从南到北大面积

栽植刺槐^[14],在改善黄土高原地区的生态环境、防治水土流失方面发挥了重要作用^[15]。但20世纪90年代以来,部分区域刺槐人工林出现了大面积的“小老树”现象,林下形成了极其严重的“土壤干层”,林木生长条件和水分生态环境日趋恶化^[16],其植被生态环境问题已引起了社会各界的广泛关注^[17]。这些“小老树”的出现是因为刺槐对环境的不适应还是适应环境的一种结果,目前尚不清楚,也缺乏相应的研究可供借鉴。

鉴于此,本文尝试通过对陕西省中北部的刺槐的叶片与细根性状进行调查测定,并试图回答两个问题:(1)刺槐的叶片与根系功能性状是否随环境变化有显著的差异?导致差异的主要气象因子有哪些?(2)刺槐各功能性状之间是否有显著的相关性?在回答这两个问题的基础上,揭示刺槐对于黄土高原环境变化的适应策略,并讨论刺槐为适应干旱环境而采取的策略是否影响到了其在植物生长方面的物质分配,进而导致小老树的形成。

1 研究区概况

根据刺槐在陕西省境内的分布情况,由南向北沿纬度方向选择了泾阳、三原、淳化、铜川、宜君、黄陵、洛川、富县、甘泉、延安、安塞、米脂、榆林、神木14个县(市、区)作为研究地点,各地点详细情况见表1。

表1 研究地点地理及环境信息

采样点	经度	纬度	坡度/ (°)	海拔/ m	年降水 量/mm	年均温 度/°C	相对湿 度/%	年日照 时数/h
泾阳	108°40'31.60"	34°42'39.79"	26	777	481.1	13.4	0.72	1968
淳化	108°39'17.69"	34°55'04.21"	36	1318	556.9	10.6	0.67	2101
三原	108°49'29.69"	34°43'37.79"	34	935	543.0	13.1	0.68	2272
耀县	108°59'36.08"	35°00'00.85"	32	824	517.2	12.7	0.62	2245
宜君	109°04'03.13"	35°16'27.18"	24	1384	654.1	9.6	0.58	2434
黄陵	109°14'34.79"	35°33'46.02"	8	969	578.0	9.4	0.6	2548
洛川	109°26'22.66"	35°42'33.70"	21	1003	579.8	9.9	0.61	2521
富县	109°25'28.83"	35°59'58.10"	16	1015	518.3	9.5	0.65	2434
甘泉	109°24'44.03"	36°21'22.08"	19	1132	510.3	9.2	0.65	2310
延安	109°09'48.48"	36°41'41.12"	22	1181	501.8	10.3	0.60	2507
安塞	109°10'15.21"	37°00'22.40"	29	1191	499.2	9.1	0.61	2360
米脂	110°09'47.96"	37°52'45.48"	32	945	412.6	9.4	0.62	2827
榆林	109°46'57.03"	38°10'33.49"	7	1077	390.3	8.7	0.55	2658
神木	110°21'31.77"	38°47'47.70"	22	1167	414.2	9.1	0.55	2674

2 研究方法

2.1 样品采集

样品采集于2011年8月至9月进行。首先在每个县内选择一块生长状况良好的成熟刺槐纯林样地,

所选林分无病虫害、人为干扰较少、地形均一,样方面积为10 m×10 m。然后在其左边、右边和中部各选取一株长势良好的个体,采集树冠外层枝条上完全展开、没有病虫害且未被遮光的叶片各20片,用Yaxin-1242便携式叶面积仪现场测量新鲜单叶叶面积,取

10片用于叶片厚度的测量,然后将叶片置于塑封袋中带回室内用于其他指标的测量。同时在三株刺槐根部挖取带有一定数量细根(直径 <2 mm)的粗根,将粗根及附着土壤一起装进塑封袋带回室内。记录每个样点的坡向和坡位,用GPS实际测量经纬度、海拔,用坡度仪测量坡度。在计算处理时,以每棵树20片树叶各功能性状的平均值作为一个样本,每个县的样本数为3,从南到北样本总数为42个。

2.2 植物功能性状及其测定

2.2.1 叶厚度(leaf thickness, LT) 选取测量完叶面积后的10片叶子用电子游标卡尺(精度为0.01 mm)测量其叶厚度,测定时避开叶片主脉分别测量叶片前、中、末端,最后取三者的平均值作为所测叶片的叶厚度值(mm)。

2.2.2 叶面积(leaf area, LA)、比叶面积(specific leaf area, SLA)和叶组织密度(leaf tissue density, LTD) 用Yaxin-1242便携式叶面积仪直接测得各单叶叶面积,然后将叶片带回实验室中,在烘箱中 80°C 下烘干48~72 h后用万分之一天平测得叶片干重(leaf mass, LM),最后计算比叶面积(SLA)=叶面积/叶干重,由叶厚度与叶面积的乘积得到叶体积,然后计算得出叶组织密度=叶干重/叶体积。

2.2.3 比根长(specific root length, SRL)和根组织密度(root tissue density, RTD) 比根长是根长(root length, RL)与根干重(root mass, RM)的比值,其单位通常为 m/g 。将带回的粗根用清水洗掉附着的泥土,将去掉根毛的细根剪下,用电子游标卡尺(精度为0.01 mm)测量10条细根的根长(mm)。采用排水替代法测出10条细根的总根长,将新鲜洗净的细根完全浸入盛水的量筒约5 s,读取量筒中水增加的体积即为根体积(RV),然后将根放入烘箱中在 80°C 下烘干48~72 h后用万分之一天平测出细根的干重

(root mass, RM),最后计算出比根长和根组织密度:比根长=细根长/细根干重;根组织密度=细根干重/细根体积。

2.2.4 叶氮含量(leaf nitrogen content, LNC)、叶磷含量(leaf phosphorous content, LPC)、根氮含量(root nitrogen content, RNC)和叶磷含量(root phosphorous content, RPC) 将烘干后的叶片和细根分别粉碎后,采用凯氏定氮法(测氮含量)和钼锑抗比色法(测磷含量)进行叶片全氮全磷含量和细根全氮全磷含量(以单位干物质重的氮含量表示, N_{mass})的测定。

2.3 数据处理

为满足统计假设,首先对各植物功能性状数值进行以10为底的对数转换。采用One-Way ANOVA分析各采样点之间植物功能性状值的差异,用Pearson相关系数检验植物功能性状之间的相关性,利用多元逐步回归法确定影响植物功能特征的主要气象因子。数据的方差分析、相关分析和多元逐步回归分析采用SPSS 17.0软件。

3 结果与分析

3.1 刺槐植物功能性状的特征

由表2可知,研究地刺槐比叶面积的变化范围为 $78.96\sim 175.98\text{ cm}^2/\text{g}$,叶厚度为 $0.06\sim 0.21\text{ mm}$,叶组织密度为 $0.29\sim 1.22\text{ g/cm}^3$,叶面积为 $5.05\sim 14.35\text{ cm}^2$,叶氮含量为 $7.37\sim 36.27\text{ g/kg}$,叶磷含量为 $0.16\sim 0.61\text{ g/kg}$,比根长为 $2.14\sim 13.71\text{ m/g}$ 、根组织密度为 $0.14\sim 1.15\text{ g/cm}^3$,根氮含量为 $16.23\sim 39.11\text{ g/kg}$,根磷含量为 $0.09\sim 0.42\text{ g/kg}$ 。方差分析结果(表3)表明,刺槐各植物功能性状中除了叶氮含量、根组织密度和根氮磷含量在各采样点之间的差异不显著之外,其他8个性状在各采样点之间的差异均显著($P<0.05$)。

表2 刺槐植物功能性状值的描述性统计

植物功能性状	样本数	最小值	最大值	平均值(标准误)	极差
叶厚度/mm	42	0.06	0.21	0.13(0.006)	0.15
比叶面积/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	42	78.96	175.98	130.96(3.798)	97.02
叶组织密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	42	0.29	1.22	0.67(0.202)	0.93
叶面积/ cm^2	42	5.05	14.35	9.40(0.331)	9.3
叶氮含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	28	7.37	36.27	25.79(4.982)	28.90
叶磷含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	28	0.16	0.614	0.36(0.126)	0.457
比根长/ $(\text{m} \cdot \text{g}^{-1})$	40	2.14	13.71	6.48(2.714)	11.57
根组织密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	40	0.14	1.15	0.31(0.218)	1.015
根氮含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	42	16.23	39.11	25.30(5.431)	22.88
根磷含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	39	0.09	0.42	0.13(0.097)	0.41

注:样本数(N)=14(样点数) \times 3(3棵刺槐)。

表3 刺槐植物功能性状采样点间的方差分析

植物功能性状	自由度	F	显著性
叶厚度/mm	13	23.342	<0.001
比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)	13	18.625	<0.001
叶组织密度/(g·cm ⁻³)	13	20.644	<0.001
叶面积/cm ²	13	4.746	<0.001
叶氮含量/(g·kg ⁻¹)	13	1.434	0.256
叶磷含量/(g·kg ⁻¹)	13	8.243	<0.001
比根长/(m·g ⁻¹)	13	5.302	<0.001
根组织密度/(g·cm ⁻³)	13	5.396	0.049
根氮含量/(g·kg ⁻¹)	13	1.825	0.337
根磷含量/(g·kg ⁻¹)	13	1.188	<0.001

3.2 刺槐功能性状与气象因子之间的回归模型

为定量分析气象因子对刺槐植物功能性状的影响,采用逐步回归分析法建立刺槐植物功能性状与气象因子之间的回归模型,探寻对刺槐植物功能性状影响最大的气象因子。

由刺槐植物功能性状与气象因子的逐步回归模型(表4)中可以看出,对比叶面积、叶厚度和叶面积影响最大的气象因子依次为年均降雨量和年均温度;影响叶组织密度的气象因子为日照时数和年均降雨量,其中叶组织密度与年日照时数呈正相关关系,与年均降雨量则呈负相关关系;年日照时数对叶氮含量、比

根长和根磷含量都产生正向影响;年均温度对根组织密度产生正向作用;叶磷含量和根氮含量与气象因子的相关性都不显著,所以没有环境变量输入到逐步回归方程中。

表4 气象因子与刺槐植物功能性状的逐步回归分析模型

植物功能性状	逐步回归方程	复相关系数	P
叶厚度	$y = -0.431 - 0.493wap - 0.350wat$	0.422	<0.001
比叶面积	$y = 1.687 + 0.615wap + 0.456wat$	0.662	<0.001
叶组织密度	$y = -0.315 + 0.392asr - 0.446wap$	0.459	<0.001
叶面积	$y = 0.462 + 0.552wap$	0.483	0.001
叶氮含量	$y = 1.088 + 0.544asr$	0.296	0.003
比根长	$y = -0.553 + 0.655asr$	0.429	<0.001
根组织密度	$y = -1.59 + 0.706wat$	0.485	<0.001
根磷含量	$y = -2.321 + 0.306asr$	0.325	<0.05

asr:日照时数;rh:相对湿度;wap:年均降雨量;wat:年均温度。

3.3 刺槐各功能性状之间的相关性

对刺槐各功能性状的相关性分析表明(表5),比叶面积与叶厚度、叶组织密度和比根长呈极显著负相关关系($P < 0.001$);叶组织密度与叶面积呈极显著负相关关系($P < 0.001$);根磷含量与叶磷含量和比根长显著正相关($P < 0.05$);根组织密度与比根长呈极显著负相关关系($P < 0.001$);叶氮含量和根氮含量与其他性状的相关性不显著。

表5 刺槐各功能性状间的相关性

植物功能性状	LT	SLA	LTD	LA	LNC	LPC	SRL	RTD	RNC	RPC
叶厚度(LT)	1.000									
比叶面积(SLA)	-0.491**	1.000								
叶组织密度(LTD)	0.238	-0.448**	1.000							
叶面积(LA)	-0.249	0.234	-0.486**	1.000						
叶氮含量(LNC)	0.268	-0.345	0.282	0.168	1.000					
叶磷含量(LPC)	-0.132	0.052	-0.293	0.133	0.184	1.000				
比根长(SRL)	0.212	-0.603**	0.204	0.000	0.224	0.137	1.000			
根组织密度(RTD)	-0.204	0.293	-0.008	-0.309	-0.208	-0.100	-0.509**	1.000		
根氮含量(RNC)	-0.017	-0.278	-0.118	0.067	0.001	0.085	0.122	0.029	1.000	
根磷含量(RPC)	0.092	-0.074	0.004	0.056	0.042	0.407*	0.351*	-0.109	-0.024	1.000

注:*表示显著相关($P < 0.05$),**表示极显著相关($P < 0.001$)。

4 讨论

4.1 刺槐植物功能性状随环境的变异规律

从表3的方差分析结果可以看出,刺槐叶片和细根植物功能性状中除叶氮含量与根氮含量外,其他8个性状在14个样点间随环境变化的差异显著。逐步回归分析结果表明(表4),刺槐植物功能性状产生差异的主要驱动因子是年均降雨量、年均温度和年均日照时数。从南到北随着样地纬度的增加,降雨量减小温度降低,刺槐的比叶面积随之减小,叶厚度增加,叶

面积也随年均降雨量减小而减小。该结论与全球尺度的研究结果一致,表现为比叶面积随着降水和温度的减少而减小。比叶面积及叶厚度随降水与温度的这种变化规律,与植物对干旱环境的适应密切相关。干旱和半干旱地区生长的植物,为了维持在干旱条件下的新陈代谢,并减少水分散失,叶片通常表现为革质且SLA较小^[18]。刺槐的叶片厚度随降雨量减少而逐渐增加,可以增加叶片内部水分向叶片表面扩散的距离或阻力,有效降低植物内部水分散失^[8]。

从南到北随着样地日照时数的增加,年均降雨量

和年均温度降低,刺槐为了保证正常的生理活动,会分配较多的有机氮于类囊体和 RuBP 羧化酶中,同时为了加强根系对养分和水分的吸收效率,提高叶片的光合能力^[2],植物比根长和叶氮含量随着日照时数的增加而增大。通常 SRL 较高的植物有较多细根、较大根表面积,以高效利用土壤资源快速生长^[19-21]。

4.2 刺槐植物功能性状间的关系

比叶面积作为植物碳收获策略的关键叶性状之一^[9],其变化通常会引起其他性状的响应。本实验中,比叶面积与叶厚度、叶组织密度和比根长呈极显著负相关关系。陕北北部的榆林、神木等地降雨量减少,刺槐比叶面积随之降低,是刺槐为了适应干旱的生存环境,将叶片中的很大一部分物质用于构建保卫构造(防虫食、防止过度失水等)或者增加叶肉细胞密度,如分配较多的氮于非溶性蛋白纤维来增强叶片细胞壁韧性或者用提高叶肉细胞密度以防止高温对叶片的损伤或水分丧失^[22],并在体内积累脯氨酸或蔗糖等可溶性化合物以降低植物的水势^[23],结果导致叶片厚度增加面积减小^[8],叶组织密度增大^[24]。科尔沁沙地 22 种菊科草本植物叶片的比叶面积只与叶片组织密度存在负相关性^[25];董莉莉^[26]等对中国南北样带的 99 种常绿阔叶树种研究结果与本研究一致。说明刺槐具有与其他植物种同样的适应策略,都可以通过增加对防卫结构构建的物质投入(形成较大的 LT 和较小的 SLA)以减少水分散失来适应干旱环境。

研究表明,刺槐叶氮含量在不同样点间变化不显著,且与根氮含量之间无显著相关性。这与其他植物氮含量的变化趋势不同。如全球 452 个样点的 1 280 种植物叶片氮含量都随着纬度升高和温度降低而增加^[27],而且干旱地区植物会有较高的氮含量^[28]。Han 等^[29]发现中国 753 种陆生植物随着纬度增高、年温度降低,叶氮、磷含量都有所增加。这可能与刺槐的物种属性有关。作为一种豆科植物,刺槐具有较强的固氮作用,因此氮往往不会成为限制刺槐生长的因子,而含量较少的磷元素对刺槐的生长或许更为重要;研究尺度过小也可能是一个原因。本研究表明,刺槐的比根长与根磷含量呈正相关,而与根氮含量没有相关性,叶磷含量和根磷含量呈现出显著的正相关,这可能是刺槐对低磷环境的一种适应性表现。通过提高细根的吸收面积,可以有效吸收磷元素^[30],从而确保刺槐光合作用的正常进行。

上述结果表明,在陕北黄土高原,随着纬度和海拔的升高,水分条件在逐渐恶化^[15],刺槐为了维持正常的生理需水,增加地下部分的细根比根长以吸收足够的水分和养分^[31],地上部分的叶片厚度也相应的增

加以减小水分散失^[8]。对干旱环境的这些适应策略需要分配更多的物质给吸收和保持水分的组织或器官来构建防卫结构,从而影响到对刺槐生长的物质投入,使刺槐的生长速率和高度降低,这可能是黄土高原森林草原区和草原区出现“小老树”的主要原因。在严重干旱的情况下(崮顶或坡度较大的阳坡等),刺槐甚至会牺牲部分构件,形成枯梢现象^[32]。因此,“小老树”和枯梢都是刺槐对于干旱环境的适应性表现,但这种适应性表现超出了刺槐正常的生长范围。在黄土高原植被恢复规划中,考虑物种对环境的适应性的同时,还要考虑物种在该环境下能否发挥其生态经济效益,使黄土高原植被恢复与重建得以健康持续地发展。

参考文献:

- [1] 胡启鹏,郭志华,李春燕,等. 植物表型可塑性对非生物环境因子的响应研究进展[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 135-142.
- [2] 冯秋红,史作民,董莉莉,等. 南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5781-5789.
- [3] Gratani L, Meneghini M, Pesoli P, et al. Structural and functional plasticity of *Quercus ilex* seedlings of different provenances in Italy[J]. *Trees*, 2003, 17(6): 515-521.
- [4] Wright I J, Reich P B, Comelissen J H. Assessing the generality of global leaf trait relationships[J]. *New Phytol.*, 2005, 166(2): 485-496.
- [5] Wright I J, Reich P B, Westoby M. The worldwide leaf economics spectrum[J]. *Nature*, 2004, 428: 821-827.
- [6] 张林,罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 844-852.
- [7] 张慧文,马剑英,孙伟,等. 不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5747-5758.
- [8] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, et al. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups[J]. *Oecologia*, 1998, 114(4): 471-482.
- [9] Wright I J, Westoby M, Reich P B. Convergence towards higher leaf mass per area in dry and nutrient-poor habitats has different consequences for leaf life span[J]. *The Journal of Ecology*, 2002, 90(3): 534-543.
- [10] Farrish K W. Spatial and temporal fine root distribution in three Louisiana forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1752-1757.
- [11] 徐冰,程雨曦,甘慧洁,等. 内蒙古锡林河流域典型草原植物叶片与细根性状在种间及种内水平上的关联[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 29-38.

- [12] 冯秋红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用[J]. 林业科学, 2008, 44(4): 125-131.
- [13] 王世绩, 张敦伦. 刺槐[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [14] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原油松和刺槐叶片光合生理适应性比较[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 16-22.
- [15] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 84-91.
- [16] 上官周平, 邵明安, 李玉山. 黄土高原森林植被对土壤水分循环过程的影响[J]. 中华水土保持学报, 2004, 35(2): 175-183.
- [17] 韩蕊莲, 侯庆春. 延安试区刺槐林地不同立地条件下土壤水分变化规律[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(1): 74-76.
- [18] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C. Modulation of leaf economic traits and trait relationships by climate [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(5): 411-421.
- [19] Leva P E, Aguiar M R, Oesterheld M. Underground ecology in a Patagonian steppe: Root traits permit identification of graminoid species and classification into functional types [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(4/5): 428-434.
- [20] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(8): 1-68.
- [21] Westoby M, Falster D S, Moles A T, et al. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 125-159.
- [22] Turner I M. Sclerophylly: primarily protective [J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(6): 669-675.
- [23] Comstock J, Mencuccini M. Control of stomatal conductance by leafwater potential in *Hymenoclea salsola*, a desert subshrub [J]. *Plant Cell and Environment*, 1998, 21(10): 1029-1038.
- [24] 郑淑霞, 上官周平. 不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系 [J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 171-181.
- [25] 李晓兰, 李雪华, 蒋德明, 等. 科尔沁沙地 22 种菊科草本植物叶片形态特征研究 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1397-1401.
- [26] 董莉莉. 中国南北样带栲属植物叶功能性状及其与气象因子的关系 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [27] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [28] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats [J]. *Functional Ecology*, 2001, 15(4): 423-434.
- [29] Han W, Fang J, Guo D. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol.*, 2005, 168(2): 377-385.
- [30] 施宇, 温仲明, 龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化 [J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6805-6814.
- [31] Xu K, Li F L, Gou S Y, et al. Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica.*, 2012, 32(1): 215-225.
- [32] Liu J H, Liu G B, Chen S Y. Relationship between soil moisture of *Robinia pseudoacacia* forests and aboveground biomass of understory vegetation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3): 57-60.