

黄土高原降雨梯度对刺槐不同器官内源激素分布格局及生长的影响

陈克利¹, 孟敏², 张鹏², 魏芙蓉², 王国梁^{2,3}, 马艳萍¹

(1.西北农林科技大学 林学院, 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; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:环境梯度如何影响树木不同器官内源激素分布格局,以及该内源激素格局变化如何影响树木不同器官的异速生长,目前尚不是十分清楚。选择黄土高原地区不同降雨量梯度神木(440.8 mm/a)、绥德(475.4 mm/a)、安塞(505.3 mm/a)和淳化(606.1 mm/a)地区的刺槐林为材料,比较其叶、枝和不同径级根(最细根(0~1 mm)、细根(1~2 mm)、粗根(2~5 mm))内源激素含量及其对器官生长的影响。结果表明:(1)随着降雨量增加,3种器官中玉米素核苷(ZR)、赤霉素(GA₃)含量增加,脱落酸(ABA)含量整体下降;不同径级根系中 $w(ZR+GA_3+IAA)/w(ABA)$, $w(GA_3)/w(ABA)$, $w(ZR)/w(ABA)$, $w(IAA)/w(ABA)$ 比值增加,但不同器官增幅不一致。淳化地区刺槐叶、枝、最细根、细根和粗根中 GA₃ 含量比神木地区分别高 55%, 21%, 274%, 376% 和 279%。(2)降雨量相对较高的安塞和淳化地区刺槐各器官年均累积量均显著高于降雨量相对较低的绥德和神木地区($p<0.05$)。(3)根系促生长类激素(ZR, GA₃ 和 IAA)含量主要受降雨量和土壤全氮(TN)影响。(4)根系生物量与 ZR 和 $w(ZR)/w(ABA)$ 呈显著正相关, $w(GA_3)/w(ABA)$ 和 $w(ZR)/w(ABA)$ 比值与枝生物量显著负相关。沿着降雨梯度,降雨量和土壤 TN 通过增加不同径级根系中 ZR, GA₃ 和 IAA 含量从而促进刺槐根系的异速生长。

关键词:内源激素; 异速生长; 降雨梯度; 刺槐

中图分类号:S719

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0298-07

Effects of Rainfall Gradients on the Distribution Pattern and Growth of Endogenous Hormones in Different Organs of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau

CHEN Keli¹, MENG Min², ZHANG Peng², WEI Furong², WANG Guoliang^{2,3}, MA Yanping¹

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:How environmental gradients affect the distribution pattern of endogenous hormones in different organs of trees, and how the changes in endogenous hormone patterns affect the allometric growth of different organs of trees are still not very clear. This study selected different rainfall gradients of Shenmu (440.8 mm/a), Suide(475.4 mm/a), Ansai (505.1 mm/a) and Chunhua (606.1 mm/a) in the Loess Plateau. *Robinia pseudoacacia*'s leaves, branches and roots of different diameters (the finest root (0~1 mm), fine root (1~2 mm), coarse root (2~5 mm)) content and their effect on organ growth were compared. The results showed that: (1) with the increase of rainfall, the contents of zeatin nucleoside (ZR) and gibberellic acid (GA₃) increased, and the content of abscisic acid (ABA) decreased in all organs; the ratio of different diameter roots $w(ZR+GA_3+IAA)/w(ABA)$, $w(GA_3)/w(ABA)$, $w(ZR)/w(ABA)$, $w(IAA)/w(ABA)$ increased, but the growth of different organs was inconsistent; in Chunhua area, the GA₃ contents in the leaves, branches, finest roots, fine roots and coarse roots of the locusts were 55%, 21%, 274%, 376% and 279% higher than those in Shenmu area; (2) the average annual accumulation of the organs of *Robinia*

收稿日期:2019-02-27

修回日期:2019-03-14

资助项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0504601);国家“十二五”科技支撑课题(2015BAC01B03);中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZSDTP-036)

第一作者:陈克利(1993—),男,山东滕州人,硕士,研究方向:植物资源利用。E-mail:1227351237@qq.com

通信作者:马艳萍(1976—),女,陕西兴平人,博士,副教授,硕导,研究方向:植物资源利用。E-mail:mypl273@163.com

pseudoacacia in Ansai and Chunhua areas with relatively high rainfall was significantly higher than that in Suide and Shenmu areas with relatively low rainfall ($p<0.05$); (3) the contents of root growth-promoting hormones (ZR, GA₃ and IAA) are mainly affected by rainfall and soil total nitrogen (TN); (4) there is the significant positive correlation between root biomass and ZR and $w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$ content, and $w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$ and $w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$ ratios are significantly negatively correlated with shoot biomass. Along the rainfall gradient, rainfall and soil TN promote the allometric growth of the roots of *Robinia pseudoacacia* by promoting the contents of ZR, GA₃ and IAA in roots of different diameter classes.

Keywords: endogenous hormone; allometric growth; rainfall gradient; *Robinia pseudoacacia*

全球气候变化通过影响大气环流和水文循环,导致全球范围降雨格局的改变^[1-2]。在干旱半干旱地区,水分是限制植物生长发育的首要因子^[3],将直接影响树木的生理特征和生长速率,从而影响森林生态系统的组成、结构和功能^[4-5]。目前,关于降雨格局变化如何影响生长激素在树木不同器官中的分配格局,以及因此对不同器官异速生长的影响尚不清楚,制约着人们对降雨格局变化将如何影响森林生态系统的认识。

土壤水分变化会影响植物器官中激素含量,其中水分对植物体内生长素(IAA)含量的影响较为复杂。敖红等对红皮云杉的研究发现,在轻度和中度干旱时枝条 IAA 含量有所上升,严重干旱时 IAA 含量下降^[6]。王霞等发现干旱胁迫导致怪柳插穗 IAA 含量显著增加^[7]。刘瑞香等研究沙棘认为,IAA 含量与水分亏缺程度无关^[8]。这说明土壤水分对植物器官中 IAA 或与干旱程度、植物种类有关。同样,土壤水分对植物器官中赤霉素(GA₃)含量的影响也存在不同。如闫志利等发现干旱胁迫导致豌豆根系内 GA₃ 含量下降^[9],韩瑞宏等发现,干旱胁迫引起 2 种苜蓿的 GA₃ 含量均下降^[10],而张明生等的研究进一步表明,水分减少引起的 GA₃ 含量下降幅度与植物种类有关^[11]。大量研究表明,降雨对脱落酸(ABA)以及玉米素核苷(ZR)在器官中的分配也有明显影响,但目前结论并不一致^[12-14]。目前,关于土壤水分对植物激素含量的影响主要集中在单一或某些重要器官中,对植物不同器官,尤其不同径级细根中植物激素含量的影响缺乏系统研究。对不同器官中多种激素含量协同变化的研究较少,难以系统揭示土壤水分如何通过影响不同器官中不同激素含量的分配格局的影响。所以我们提出假设,土壤水分会影响不同激素含量在植物不同器官中的分布格局,多种激素的分布格局共同决定着树木不同器官的生长。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)原生长于北美,是一种抗旱树种,在全世界都有广泛种植^[15]。近年研究发现,黄土高原北部干旱地区大量刺槐出现生长减慢、枝梢干枯的现象^[16],但在南部的淳化生长良好。因此,本研究以黄土高原北部降雨量更少的神木、绥德以及南部降雨量较多的安塞和淳化为取样点,通过

研究内源激素、生长和土壤指标,期望在理论上阐明降雨量如何通过影响植物激素在不同器官中的分配进而影响刺槐不同器官的异速生长,为刺槐林管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

从北到南沿着降雨量梯度,依次选择神木县,绥德县,安塞县和淳化县 4 个地区。地带性植物分别为典型草原区(神木县),森林草原区(安塞和绥德县)和森林区(淳化县)。黄土高原属于典型的温带大陆性季风气候,由西北到东南逐渐由干旱区、半干旱区变为半湿润区。4 个样点土壤类型均以黄绵土为主,从北到南降雨量依次增加,降雨量分别为 440.8 mm/a, 475.4 mm/a, 505.1 mm/a, 606.1 mm/a。多年平均温度依次为 8.9℃, 9.7℃, 8.8℃ 和 10℃。研究选取生长正常林龄分别为 38, 35, 36, 36 a 的成熟人工刺槐林。刺槐林基本概况见表 1。

表 1 人工刺槐林样地基本概况

区域	胸径/ cm	树高/ m	长冠幅/ m	短冠幅/ m	坡度/ (°)	坡向
神木县	18.18±0.86a	6.91±0.84c	3.8	3.2	36	阳坡
绥德县	16.33±1.94a	7.44±0.82c	5.5	4.6	32	阳坡
安塞县	17.35±1.31a	12.35±0.92b	6.5	5.5	28	阳坡
淳化县	15.93±1.42a	15.93±0.62a	5	5	33	阳坡

注:不同小写字母表示不同地区存在显著差异($p<0.05$)。

1.2 试验设计和样品采集

依据降雨量梯度设置 4 个处理,选取坡度、坡向一致的地段,每个处理划定 5 个 10 m×10 m 重复样地。刺槐各器官生物量我们采用 Allometric models^[17],根据现有生物量除以林龄得到年均积累量。于 2017 年 9 月进行野外调查及采样,在每个样地内随机选择三株刺槐记录胸径,地上部分采用高枝剪取样成熟枝与成熟叶,地下部分人工挖掘发育相对完整的根系用游标卡尺分为三级(最细根(0~1 mm)、细根(1~2 mm)和粗根(2~5 mm))并收获表层 0—10 cm 土样。植物样品需立刻洗净放入 10 ml 离心管并将其放入携带的液氮罐,带

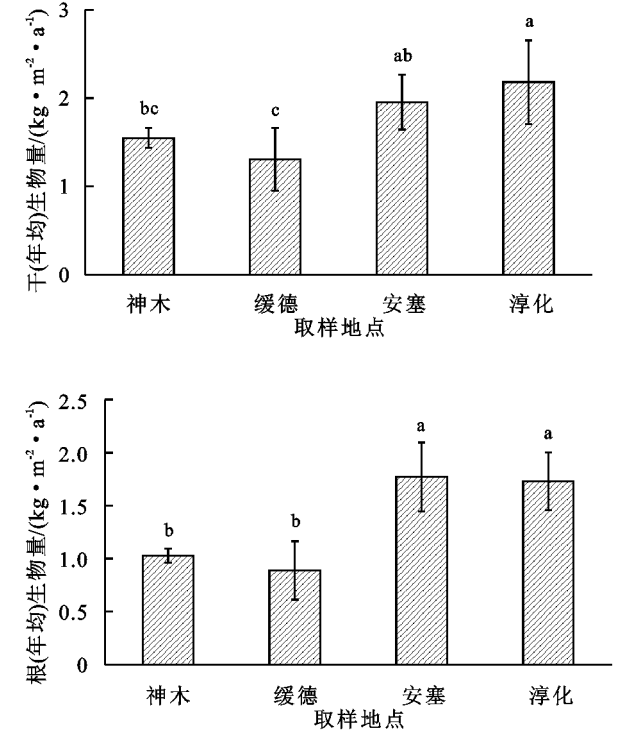
回实验室放入-80℃低温保存。

1.3 样品测定方法

样品测定分为植物器官内源激素(ZR, GA₃, IAA 和 ABA)和土壤的有机碳、全氮和全磷含量。内源激素样品用液氮在球磨仪研磨,用酶联免疫吸附法(ELISA)测定。并计算各激素与 ABA 含量的比值,以 $w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$, $w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$, $w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$ 和 $w(\text{IAA} + \text{GA}_3 + \text{ZR})/w(\text{ABA})$ 表示。土壤样品在自然风干研磨过 0.15 mm 筛备用。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法,土壤全氮采用凯氏定氮法,土壤全磷用钼蓝比色法测定^[18]。

1.4 数据分析

各器官内源激素含量用质量比(ng/g)表示。在



注:不同小写字母表示不同地区存在显著差异($p<0.05$);图中数据为平均值±标准差。

图 1 沿降雨量增加梯度刺槐不同器官生物量的变化

2.2 不同降雨量对刺槐不同器官内源激素分布格局的影响

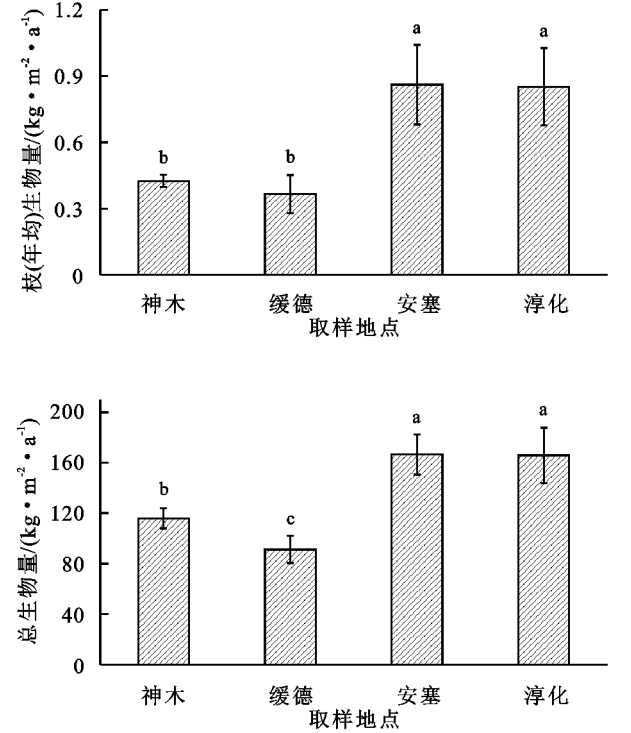
图 2 表明,随着降雨量的增加,各器官内源激素含量不同。不同器官,ZR 和 ABA 的变化趋势整体一致(图 2B—D),叶中内源激素含量均显著高于地下根系,在叶中的含量达到最高,分别为 104.1 ng/g, 12.77 ng/g;在不同径级根,ZR 和 ABA 差异不显著。值得一说的是,ZR 在枝中含量最低,远低于叶。对于 GA₃(图 2A),情况与 ZR 和 ABA 相反,不同径级根内源激素含量均显著高于叶和枝,在最细根含量达到最大为 15.6 ng/g,且枝中最低;对于根系,GA₃ 含量随着直径的升高而降低。对于不同器官 IAA(图 2C),含量介于 27.5~53.2 ng/g,各器官中变化受环

Excel 中进行数据预处理,SPSS 22.0 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 检验比较不同降雨量器官内源激素含量差异,使用 Origin 2015 软件作图。

2 结果与分析

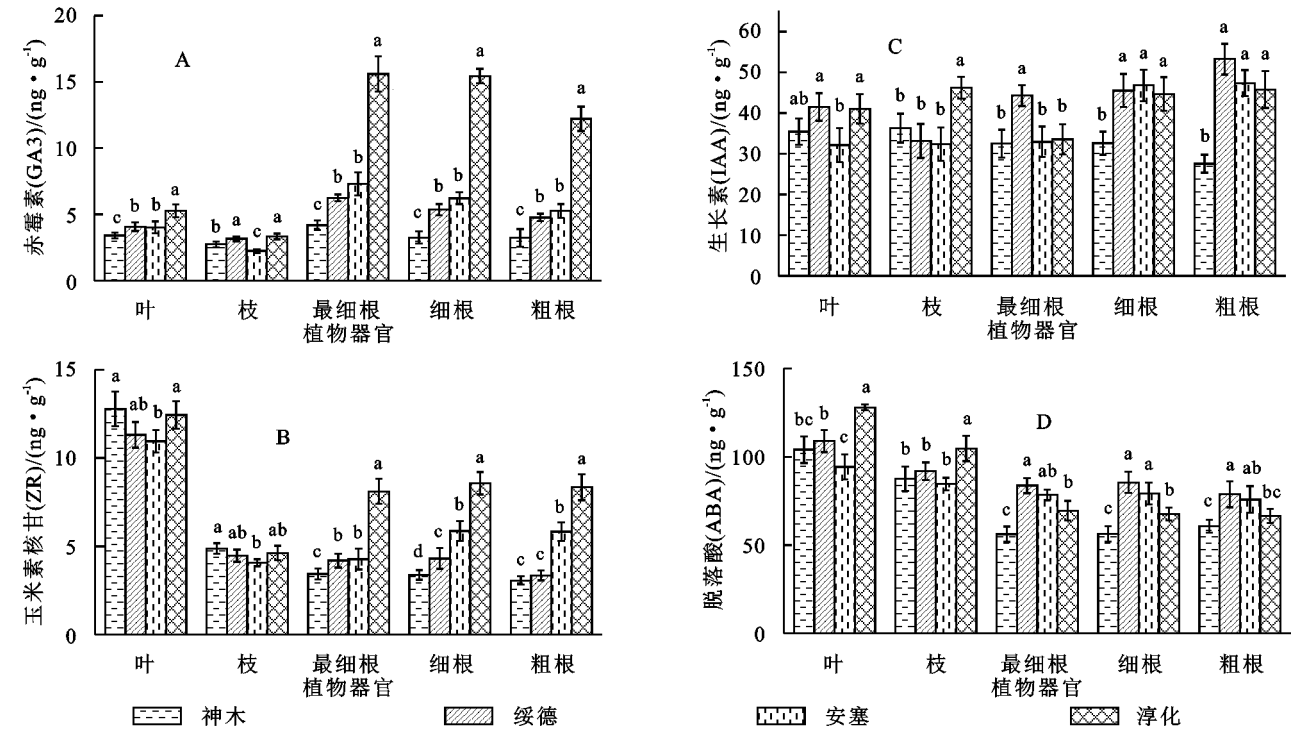
2.1 不同降雨量对刺槐不同器官生长特征的影响

随着降雨量的增加,总生物量、枝(年均)生物量、根(年均)生物量、干(年均)生物量呈整体增加的趋势(图 1)。降雨量较高的安塞和淳化地区刺槐各器官年均累积量均显著高于降雨量较低的绥德和神木地区。安塞和淳化,神木和绥德地区枝(年均)生物量、根(年均)生物量和干(年均)生物量两两间差异不显著。



境影响,粗根和细根含量均高于其余器官,其中粗根中最高。

同一器官,内源激素随着降雨量变化不一致,降雨量影响了其含量与分配格局。促生长类激素如 GA₃, ZR(图 2A—B),随着降雨量增加,各器官中的激素含量整体上升,根系增幅明显大于地上器官,如淳化地区最细根,细根,粗根 GA₃ 含量分别高于神木地区 274%, 376% 和 279%。随着降雨量增加,IAA(图 2C)变化无显著规律,在神木地区 IAA 取得最低值。总体上 ABA 含量(图 2D)在三级根系降低,从大到小依次是绥德,安塞,淳化与神木。绥德与安塞各径级根系激素含量差异均不显著($p>0.05$),但与神木和淳化均差异显著($p<0.05$)。



注:图中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示不同地区存在显著差异($p<0.05$)。

图2 4个地区刺槐不同器官中各内源激素含量的变化

2.3 不同降雨量对刺槐不同器官内源激素含量比值的影响

由表2可以看出,随着降雨量的增加 $w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$, $w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$, $w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$, $w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$ 的比值在叶和枝变化较平稳。

地下三级根系,各内源激素比值变化整体一致,但是增幅不同,随着降雨量的增加,淳化地区 $w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$ 比值增幅最大, $w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$ 比值次之,可能主要由于内源激素 IAA 的大量合成。同时这与根系年均生物量累积量相一致,表明生物量的累积与激素含量与比值有关。

表2 降雨梯度对刺槐不同器官内源激素含量比值的影响

植物器官	比值	地点			
		神木县	绥德县	安塞县	淳化县
叶	$w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$	0.03	0.03	0.04	0.04
	$w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.12	0.11	0.11	0.09
	$w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$	0.34	0.38	0.34	0.32
	$w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.5	0.53	0.47	0.46
枝	$w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$	0.03	0.03	0.02	0.03
	$w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.05	0.04	0.04	0.04
	$w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$	0.41	0.38	0.38	0.44
	$w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.5	0.44	0.47	0.49
最细根	$w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$	0.07	0.07	0.09	0.24
	$w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.06	0.05	0.05	0.12
	$w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$	0.57	0.52	0.59	0.67
	$w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.78	0.66	0.56	1.01
细根	$w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$	0.05	0.06	0.07	0.15
	$w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.05	0.05	0.07	0.15
	$w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$	0.57	0.53	0.59	1.16
	$w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.77	0.69	0.77	1.05
粗根	$w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$	0.05	0.06	0.06	0.18
	$w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.05	0.04	0.07	0.12
	$w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$	0.45	0.67	0.62	0.68
	$w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$	0.62	0.81	0.82	0.99

2.4 内源激素含量与不同器官生物量的关系

由表 3 可见,叶生物量与 ABA 和 GA₃ 含量呈极显著正相关($p<0.01$),与 $w(ZR)/w(ABA)$ 比值显著负相关($p<0.05$); $w(GA_3)/w(ABA)$ 比值与枝生物量极显著负相关($p<0.01$),同时 $w(ZR)/w(ABA)$ 与枝生物量呈显著负相关($p<0.05$);对于根系,与 $w(ZR)$ 和 $w(ZR)/w(ABA)$ 呈显著正相关。

2.5 环境梯度对内源激素的影响

由表 4 可见,刺槐叶和枝与降雨量及土壤理化性质无显著关系,但 ABA 在叶和枝中与温度呈显著正相关($p<0.05$)。细根通常是指直径小于 2~5 mm 的根系,其特殊的构造特点以及生理特性使其成为植物吸收水分和养分的主要部分^[19],根系除 ABA 外与降雨量呈显著正相关,其中 GA₃ 与最细根,ZR 与细

根呈极显著正相关,对 TP 来看,GA₃ 和 IAA 各级根系均与之显著相关。

表 3 刺槐不同器官内源激素含量及其比值与各器官生物量的相关性分析

激素含量和比值	叶生物量	枝生物量	根生物量
ABA	0.84 * *	0.22	0.02
ZR	0.41	-0.41	0.51 *
GA ₃	0.71 * *	-0.25	0.34
IAA	0.41	0.19	-0.06
$w(IAA)/w(ABA)$	-0.36	0.05	-0.15
$w(GA_3)/w(ABA)$	0.12	-0.56 * *	0.33
$w(ZR)/w(ABA)$	-0.51 *	-0.45 *	0.46 *
$w(IAA+ZR+GA_3)/w(ABA)$	-0.29	-0.11	0.27

注:* 表示 $p<0.05$; * * 表示 $p<0.01$ 。

表 4 环境梯度指标与不同器官中内源激素含量的相关性分析

参数	激素	叶	枝	最细根	细根	粗根
MAP	GA ₃	0.938	0.358	0.977 * *	0.973 *	0.968 *
	ZR	0.154	-0.139	0.958 *	0.992 * *	0.990 *
	IAA	0.998 * *	0.359	0.977 *	0.973 *	0.970 *
	ABA	0.695	0.783	0.048	-0.054	-0.121
MAT	GA ₃	0.926	0.852	0.897	0.906	0.913
	ZR	0.270	0.194	0.925	0.783	0.698
	IAA	0.804	0.852	0.897	0.906	0.911
	ABA	0.956 *	0.984 *	0.145	0.059	-0.043
SOM	GA ₃	0.837	0.459	0.920	0.925	0.926
	ZR	0.501	0.220	0.931	0.876	0.885
	IAA	0.948	0.459	0.932	0.925	0.921
	ABA	0.794	0.835	-0.301	-0.397	-0.466
TN	GA ₃	0.932	0.634	0.972 *	0.978 *	0.981 *
	ZR	0.411	0.193	0.988 *	0.902	0.874
	IAA	0.953 *	0.634	0.979 *	0.978 *	0.978 *
	ABA	0.899	0.941	-0.114	-0.213	-0.299
TP	GA ₃	0.795	0.127	0.728	0.709	0.699
	ZR	-0.535	-0.692	0.669	0.825	0.790
	IAA	0.711	0.127	0.706	0.709	0.711
	ABA	0.312	0.449	0.683	0.608	0.564

注:SOM (Soil organic matter contents)土壤有机质,TN (Total nitrogen contents)全氮,TP (Total phosphorus contents)全磷,MAP(Mean annual precipitation,mm)多年平均降雨量,MAT(Mean annual temperature,℃)多年平均温度。

3 讨论与结论

3.1 环境梯度对内源激素的影响

研究发现,环境梯度的变化会影响植物内源激素的含量^[20]。植物遇到非生物胁迫会通过改变自身的激素含量从而调节生长以适应环境^[12]。本研究发现,随着降雨量增加,不同径级根系 ZR 与 GA₃ 含量和 $w(ZR + GA_3 + IAA)/w(ABA)$, $w(GA_3)/w$

(ABA), $w(ZR)/w(ABA)$, $w(IAA)/w(ABA)$ 比值增加,这与 Levent 等的研究结果一致,外界条件胁迫会降低促进生长的激素含量^[21],这些激素在植物生长和应对环境都起着重要作用^[22-23]。玉米素核苷(ZR)作为植物中最常见的细胞分裂素,可促进细胞分裂,体内营养物质流动^[24];GA₃ 能使植物生长加速。对促进生长的激素来讲,最好的办法就是降低此类激素水平,抑制生长,减少水分消耗。干旱条件下,

植物适应环境的主要途径是减缓生长,降低水分的消耗。地上器官与地下器官变化格局不一致。ZR 在不同径级根系变化规律相近,总体含量显著升高。对于地上部分影响因素较为复杂,无明显规律,李岩等在研究土壤水分条件下玉米的生理对策时发现,则得出玉米根系合成 ZR 的生理过程对土壤水分亏缺不敏感,即在不同水分条件下 ZR 含量差异不显著,这可能与植物受干旱胁迫时间和本身的抗旱属性有关^[25]。IAA 可调节根系代谢,促进根系对水分的透性,使根系伸长,增大根冠比,增强植物对干旱的适应^[26],目前研究有的植物升高,有的降低,本研究中,IAA 处于波动状态,ABA 主要由根系产生,增强植物的环境适应力。本研究表明随着降雨量增加 ABA 含量在根系整体下降,这与 Reddy 等在桑树叶片中研究较为一致^[27]。但陈博雯等研究发现,干旱胁迫下油茶组培苗与实生苗叶片 ABA 含量均呈现先升后降的趋势^[28]。我们分析这或与胁迫时间及种属差异性有关。在水分亏缺时,ABA 能加速离子流出保卫细胞从而使保卫细胞膨压降低,诱导气孔关闭,使水分损耗减少,保水能力增强^[29]。令人惊奇的是对于 ABA 来说,各器官神木的 ABA 含量最低,本研究分析刺槐枯梢情况严重,叶片质量小,为了维持自身的生命活动需要维持相对高的光合作用制造养分,故脱落酸含量低于其他地区。土壤含氮量直接影响刺槐器官含氮量,而氮素是内源激素的组成元素之一,将显著影响内源激素含量^[30]。本研究表明降雨量和土壤 TN 在三级根系各促生长类均有好的相关性,但环境温度,土壤全磷和有机质对其无明显相关性。

植物是一个有机整体,刺槐的生长发育不仅与内源激素绝对含量有关,还与多种激素综合调控有关。 $w(\text{IAA})/w(\text{ABA})$ 是有拮抗作用的激素,二者的消长会影响植物器官的生长和脱落; $w(\text{GA}_3)/w(\text{ABA})$ 比值变化会影响植物休眠等生理活动, $w(\text{IAA}+\text{GA}_3+\text{ZR})/w(\text{ABA})$ 比值则可反映几种内源激素的平衡状态。本研究中其比值在叶和枝中变化较平稳,可见地上器官存在一种调节机制,内源激素含量及比值可能存在一定临界浓度点或阈值。地下根系中,随着降雨量增加,促生长类激素增幅大于抑制生长类激素增幅,表明降雨量的增加,地下根系内源激素的协同更有利于根系生长分化。

3.2 内源激素含量对不同器官生长的影响

降雨量是林木生长的限制性因子,会影响内源激素在各器官中的含量及平衡并通过内部代谢制约器官生长。本研究中,在实际调查中发现降雨量低的神木和绥德地区刺槐总生物量显著降低。这或是刺槐

对干旱的适应方式,通过降低生长速度,消耗较少的能量,从而最终让乔木根系减少吸收土壤水分和养分。本研究表明降雨量较高的安塞与淳化地区刺槐各器官年均累积量显著高于降雨量较低的绥德与神木地区($p<0.05$),这与 kim 等的研究结果一致,降雨量的增加有利于森林生物量积累^[31]。根系生物量与 $w(\text{ZR})$ 和 $w(\text{ZR})/w(\text{ABA})$ 呈显著正相关。在植物遭受胁迫时,ZR 起到从根到冠的传递作用,可以促进根框质元素吸收和转运,满足植物根系生长的需要,而 ABA 可抑制离子跨膜运输影响矿质元素如氮元素的吸收,进而影响根系细胞的生长和分裂^[24],这与我们的研究结果接近,根系生物量与 ZR 显著正相关,但本研究没有发现其与 ABA 的关系,原因可能是根系主要受 ZR 影响,ABA 对其影响不显著。 GA_3 和 ZR 均能促进细胞分裂生长,但本研究发现二者与生物量呈负相关,我们分析地上器官受刺槐生境条件综合影响,比如林分密度,以及地下植被,同时受激素含量调控可能存在一定阈值。未来通过多年连续取样,并控制生境环境一致,或许可以解释我们的结果。本研究表明各内源激素会改变在各生长器官的浓度及比例,相关分析表明最终影响各器官的异速生长。

随着降雨量的增加,本研究发现刺槐各器官中 ABA 含量整体下降,促生长类激素 ZR 和 GA_3 含量增加,IAA 无明显规律。在不同径级根系中,各促生长类激素与脱落酸比值均在增加。相关分析表明,内源激素含量主要受降雨量和土壤 TN 影响并最终调节各器官生长。后续研究需进一步分析内源激素是如何调控代谢进而影响了器官的差异生长。

参考文献:

- [1] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [2] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. summary for policymakers [J]. *Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change*, 2007, 18(2): 95-123.
- [3] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1155-1164.
- [4] 阎秀峰, 李晶, 祖元刚. 干旱胁迫对红松幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响 [J]. *生态学报*, 1999, 19(6): 850-854.

- [5] Ain-Lhout F, Zunzunegui M, Barradas M C D, et al. Comparison of proline accumulation in two mediterranean shrubs subjected to natural and experimental water deficit[J]. *Plant and Soil*, 2001, 230(2): 175-183.
- [6] 敖红, 王炎. 干旱胁迫下云杉内源激素的响应及其气孔调节[J]. *经济林研究*, 2011, 29(3): 28-34.
- [7] 王霞, 候平, 尹林克, 等. 土壤缓慢水分胁迫下柞柳植物内源激素的变化[J]. *新疆农业大学学报*, 2000, 19(3): 41-43.
- [8] 刘瑞香, 杨劼, 高丽. 中国沙棘和俄罗斯沙棘叶片在不同土壤水分条件下脯氨酸、可溶性糖及内源激素含量的变化[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 148-151.
- [9] 闫志利, 轩春香, 牛俊义, 等. 干旱胁迫及复水对豌豆根系内源激素含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 297-301.
- [10] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5229-5237.
- [11] 张明生, 谢波, 谈锋. 水分胁迫下甘薯内源激素的变化与品种抗旱性的关系[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(5): 498-501.
- [12] Wang S, Wang L, Hua W, et al. Effects of bisphenol A, an environmental endocrine disruptor, on the endogenous hormones of plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(22): 17653-17662.
- [13] Wang C, Yang A, Yin H, et al. Influence of water stress on endogenous hormone contents and cell damage of maize seedlings. *journal of integrative*[J]. *Plant Biology*, 2008, 50(4): 427-434.
- [14] 马文涛, 樊卫国. 不同种类柑橘的抗旱性及其与内源激素变化的关系[J]. *应用生态报*, 2014, 25(1): 147-154.
- [15] 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[J]. *林业科学*, 2004, 40(5): 93-98.
- [16] 单长卷, 梁宗锁, 郝文芳, 等. 黄土高原不同立地条件下刺槐生长与水分关系研究[J]. *西北林学院学报*, 2004, 19(2): 9-14.
- [17] 李秦君. 陕西黄土高原人工刺槐林碳固持特征与影响因素[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015, 15-25.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] King J S, Pregitzer K S, Zak D R, et al. Fine root chemistry and decomposition in model communities of north-temperate tree species show little response to elevated atmospheric CO₂ and varying soil resource availability[J]. *Oecologia*, 2005, 146(2): 318-328.
- [20] 刘霞, 穆春华, 尹燕桦, 等. 花后高温、弱光及其双重胁迫对小麦籽粒内源激素含量与增重进程的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(4): 677-681.
- [21] Tuna A L, Kaya C, Dikilitas M, et al. The combined effects of gibberellic acid and salinity on some antioxidant enzyme activities, plant growth parameters and nutritional status in maize plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(1): 1-9.
- [22] Buer C S, Masle W J. Ethylene modulates root-wave responses in arabidopsis[J]. *Plant Physiology*, 2003, 132(2): 1085-1096.
- [23] Hu B, Hong L, Liu X, et al. Identification of different ABA biosynthesis sites at seedling and fruiting stages in *Arachis hypogaea* L. following water stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2013, 70(2): 131-140.
- [24] Nie L, Wang L, Wang Q, et al. Effects of bisphenol A on mineral nutrition in soybean seedling roots[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(1): 133-140.
- [25] 李岩, 潘海春, 李德全. 土壤干旱条件下玉米叶片内源激素含量及光合作用的变化[J]. *植物生理学报*, 2000, 26(4): 301-305.
- [26] Zhang H, Han W, De S I, et al. ABA promotes quiescence of the quiescent centre and suppresses stem cell differentiation in the *Arabidopsis* primary root meristem[J]. *Plant Journal*, 2010, 64(5): 764-774.
- [27] Reddy A R, Chaitanya K V, Jutur P P, et al. Differential antioxidative responses to water stress among five mulberry(*Morus alba* L.) cultivars[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(1): 33-42.
- [28] 陈博雯, 刘海龙, 蔡玲, 等. 干旱胁迫对油茶组培苗与实生苗内源激素含量的影响[J]. *经济林研究*, 2013, 31(2): 60-64.
- [29] Wang Y Y, Zhou R, Zhou X. Endogenous levels of ABA and cytokinins and their relation to stomatal behavior in dayflower (*Commelina communis* L.)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 144(1): 45-48.
- [30] Zhang Y, Yu G, Yang J, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2014, 23(2): 144-155.
- [31] Kim Y, Kang S, Lim J H, et al. Inter-annual and inter-plot variations of wood biomass production as related to biotic and abiotic characteristics at a deciduous forest in complex terrain, Korea [J]. *Ecological Research*, 2010, 25(4): 757-769.