

干旱胁迫对小叶杨幼苗生长的影响

仇云峰, 李亚光, 李青山

(北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 了解小叶杨的抗旱机理, 为山西省北部半干旱风沙区小叶杨防护林建设提供科学依据。[方法] 通过在山西省苗圃基地盆栽模拟干旱试验, 以小叶杨生长过程中的苗木株高和地径、根、茎、叶生物量, 叶片相对含水量和水势, 净光合速率、蒸腾速率等为生长和生理指标, 研究干旱胁迫对小叶杨幼苗生长的影响。[结果] 干旱胁迫抑制了小叶杨幼苗的生长, 包括地上部分和根系的生长; 叶片相对含水量和水势随土壤相对含水量降低而下降; 各干旱梯度下 CK, T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ 的净光合速率、蒸腾速率也随干旱梯度加深而降低, 但从 CK(田间持水量, 土壤含水量 20.3%) 到 T₃(田间持水量的 40%, 土壤含水量 8.12%) 净光合速率和蒸腾速率随干旱梯度加深降幅逐渐较小, 并且干旱时也能保持较大的光合速率和蒸腾速率, 表明小叶杨具有明显抗旱特性; 当土壤水分进一步减少, T₄(田间持水量的 30%, 土壤含水量为 6.09%) 时小叶杨开始出现干枯现象, T₅(田间持水量的 20%, 土壤含水量为 4.06%) 时小叶杨全部死亡。[结论] 山西省西南部及其周边地区进行小叶杨造林时, 土壤水分应尽量要保持在 6.09%(T₄) 以上。

关键词: 小叶杨; 干旱胁迫; 幼苗; 生长指标

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0042-04

中图分类号: S728.2, S718

Drought Stress Effects on Growth of *Populus Simonii* Seedlings

QIU Yunfeng, LI Yaguang, LI Qingshan

(Soil and Water Conservation College of Beijing Forestry University,

State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Prevention, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This paper aimed to explore the drought resistance mechanism of *Populus simonii*, and to provide a scientific basis for the construction of the shelterbelt in the northern of Shanxi Province. [Methods] The effect of drought stress on *Populus simonii* seedling growth was studied based on the pot experiment conducted in the Taidu nursery base of Jixian Forestry Bureau in the southwest of Shanxi Province. The experiment simulated drought conditions and used the *Populus simonii* from a loess gully region as the provenance material. And height and ground diameter of the seedling, the biomass in leaves, stems and roots, the relative water content and water potential, net photosynthetic rate, transpiration rate and other growth and physiological indexes were measured in order to study the effects. [Results] The results showed that drought stress inhibited the growth of the *Populus simonii* seedlings, including the aboveground parts and the root system; Leaf relative water content and water potential decreased with the reduction of the relative water content of soil. In different drought gradient treatments(CK, T₁, T₂, T₃, T₄, T₅), net photosynthetic rate and transpiration rate slowed down with the severeness of drought stress. However, in the treatments of CK(field capacity) to T₃(40% of field capacity, soil water content is 8.12%), the declined rates were gradually smaller; in addition, the *Populus simonii* seedlings could maintain a relative large photosynthetic rate and transpiration rate, which indicated that *Populus simonii* had obvious drought resistance. When soil moisture further reduced, *Populus simonii* appeared to be drying in the period of T₄(30% of field capacity, soil water content is 6.09%), and in T₅(20% of feild capacity, soil water content is 4.06%) all died. [Conclusion] In the southwest of Shanxi Province and the surrounding areas, soil water should be stayed above 6.09%(T₄) as far as possible while planting *Populus simonii*.

Keywords: *Populus simonii*; drought stress; seedlings; growth indexes

收稿日期: 2014-04-01

修回日期: 2014-04-08

第一作者: 仇云峰(1988—), 男(汉族), 重庆市人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生物环境与能源工程。E-mail: 413658876@qq.com。

通信作者: 李亚光(1959—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持及农业生物环境与能源工程方面的研究。E-mail: yiaguang@bjfu.edu.cn。

水分是限制植物生长的最主要因素之一^[1]。水资源短缺也是我国西北地区进行植树造林的主要限制性因素。有关干旱胁迫的文章国内外有很多^[2-4],但对于小叶杨干旱的研究国内基本没有,最近的研究是 1982 年鲁作民^[5]对小叶杨幼苗土壤干旱锻炼的研究,但该研究是从小叶杨干旱锻炼后生理活性方面进行分析的,对小叶杨的抗旱机理未进行深入探究。小叶杨一直是山西省北部半干旱风沙区防护林的主要树种,但由于近年来,山西省北部降水量的减少,导致部分小叶杨死亡,使防护林效益锐减,防护功能下降,风沙危害越来越严重^[6]。因而,探明小叶杨的抗旱机理,是山西北部半干旱风沙区防护林恢复过程中急需解决的问题。本研究通过对干旱胁迫下小叶杨幼苗若干生长指标的测定和分析,旨在阐明小叶杨的水分利用和适应特点,为山西北部半干旱风沙区防护林建设和节水农业提供依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于山西省西南部的吉县林业局太度苗圃基地内(36°15'44"N,110°52'17"E),海拔 990 m,为典型的黄土残垣沟壑区。研究区内土壤为褐土,气候四季分明,光照充足,日照时数 2 538 h,无霜期年平均 172 d。年均气温 10.2 °C,年均日较差 11.5 °C,大于 10 °C 的有效积温 3 361.5 °C,年均降水达 522.8 mm,属暖温带半干旱大陆性气候^[7]。

1.2 材料与方法

1.2.1 盆栽试验 试验设在山西省吉县林业局太度苗圃基地防雨棚下,选用当地采集的插穗为试验材料,2013 年 3 月上旬将小叶杨嫩枝扦插小苗移栽于高 25 cm,内径 17 cm 的塑料盆(带底盘)中,每盆定植 1 株,盆中装入该苗圃熟土(褐土)10 kg,其土壤田间持水量采用室内环刀法测定^[8],其值为 20.3%,容重 1.39 g/cm³。从栽种当天起到开始试验期间,确保每个土壤水分充足,保证苗木成活和试验处理的一致性。设 6 种土壤水分处理,其中处理 CK 组,盆中土壤含水量为 20.3%(田间持水量);处理 T₁ 组,土壤含水量为 16.2%(田间持水量的 80%);处理 T₂,土壤含水量为 12.2%(田间持水量的 60%);处理 T₃,土壤含水量为 8.12%(田间持水量的 40%);处理 T₄,土壤含水量为 6.09%(田间持水量的 30%);处理 T₅,土壤含水量为 4.06%(田间持水量的 20%)。每组试验 30 盆,共 180 株。3 月 17 日所有试验盆土都达到预定含水量后即开始控水,每天 17:30 称取盆重,并进行补充水分,使各处理组保持设

定的含水量,控水 40 d 后测定各项生理生态指标。

1.2.2 指标测定

(1) 田间持水量。采用环刀在苗圃随机取 30 个土样,将其中 10 个土样环刀垫上滤纸,放在瓷盘内,并将有孔的底盖朝下,缓慢向瓷盘注水,水面高度到距离环刀上缘 1~2 mm 处即停止加水,让其充分吸水 24 h;另外 20 个土样进行风干,磨细后过 1 mm 筛孔,过筛干土装满 10 个环刀备用;将已经饱和的装有湿土的 10 个环刀底盖打开,环刀连同滤纸分别放在装满干土的 10 个环刀上,并加压一小块压砖,使其上下紧密接触;8 h 后,从 10 个原状土的环刀内分别取土 30 g,置于铝盒中,称重烘干,测其土壤含水量,将 10 个原状土的土壤含水量的平均值作为该土壤田间持水量^[8],测定田间持水量为 20.3%。

(2) 株高、基径、生物量测定。40 d 后,从每一处理组随机选取 10 株幼苗作为观测株,分别测定株高、基径;将植物根、茎、叶分开处理装袋,将带有土壤的整株植物根系装入编号袋中,带回实验室进行冲洗晾干(去除土壤、杂质、其它植物根系,尽量保证根系完整),处理好的整株根系、茎、叶分别置入 80 °C 烘箱中烘干至恒量,称量并记录其生物量。

(3) 水势测定。干旱处理 40 d 后,同时在上午 8:30,用 Weseor 公司的 Psypro 露点水势仪进行测定各干旱处理组下叶水势,每株选植株上、中、下部位叶片各测一次,每次测定取 4 次重复取均值。

(4) 叶片相对含水量测定。将新鲜的功能叶用吸耳球吹净,并用分析天平称其重量,记为 M_f ,全部浸入蒸馏水中 10 h 后,再称得饱和鲜重为 M_d ,105 °C 杀青后在 80 °C 烘至恒重称得 M_t ,叶片相对含水量 RWC_1 的计算公式^[9]为:

$$RWC_1 = (M_f - M_d) / (M_t - M_d) \times 100\% \quad (1)$$

(5) 净光合速率和蒸腾速率测定。苗木干旱处理后,用 LI-6400 光合测定系统(LI-Cor. Inc, 美国),测定剩余 120 株不同干旱处理小叶杨叶的净光合速率、蒸腾速率,每株选植株上、中、下部位叶片各测 1 次,每次记数 6 次重复。

1.2.3 统计分析 采用 Excel 计算各生理生态标值的平均数、标准差和百分比。依据 SPSS 20 软件中 One-way ANOVA 比较结果来评价不同干旱处理的小叶杨指标值的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对苗木株高、地径和根系的影响

由表 1 可以看出,不同干旱梯度对小叶杨幼苗的株高、地径均产生显著性的影响。随着土壤含水量的

减少,株高、地径都表现出下降的趋势。从 T_1 到 T_2 , T_2 到 T_3 的小叶杨幼苗,株高下降幅度最大,但处理从 T_2 到 T_3 的小叶杨幼苗,地径下降幅度明显减少,说明当土壤含水量从 12.2% 降到 8.12% 时,对小叶杨幼苗的株高影响更为显著;在 T_4 条件下,小叶杨株高和地径达到新低,干旱对苗木地上部分生长影响较大,地上部分基本停止进一步生长,而且,长期的缺水使试验过程中 T_4 部分幼苗有干枯的现象。 T_5 组小叶杨幼苗完全失去活力,未进行生长,说明其生长受干旱胁迫的影响最为显著。

表 1 干旱胁迫对苗木株高、地径的影响

干旱梯度	株高净增长量/cm	地径净增长量/mm
CK	7.32±0.65 ^a	5.87±0.73 ^a
T_1	6.17±0.45 ^b	4.15±0.56 ^b
T_2	3.66±0.31 ^c	1.31±0.39 ^c
T_3	1.14±0.26 ^d	0.54±0.33 ^d
T_4	0.04±0.01 ^e	0.10±0.03 ^e
T_5	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f

注:同列不同小写字母表示不同干旱胁迫处理显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 干旱胁迫对苗木生物量的影响

不同土壤水分含量对苗木总生物量、茎生物量、叶生物量均存在差异性显著,且各生物量指标值均随土壤含水量的下降而下降。根生物量 T_1, T_2, T_3 处理组差异不显著,但茎生物量、叶生物量 T_1, T_2, T_3 处理组差异显著,表明土壤含水量从田间持水量 80% 继续减少时,干旱对地上部分的影响更加显著。与 CK 组相比, T_4 组之前,根、茎、叶生物量中,根生物量降幅不大,叶生物量降幅最大,其次为茎生物量,当土壤水分进一步减少,土壤含水量降到 6.09% (T_4) 以下,根、茎、叶生物量进一步明显减少,小叶杨基本停止生长(表 2)。

表 2 干旱胁迫下苗木生物量的影响 g

干旱梯度	总生物量	根生物量	茎生物量	叶生物量
CK	22.25±3.45 ^a	9.69±2.71 ^a	8.34±2.55 ^a	4.22±1.27 ^a
T_1	15.3±2.63 ^b	6.64±1.46 ^b	5.53±1.39 ^b	3.13±1.15 ^b
T_2	11.33±2.12 ^c	6.21±1.11 ^b	3.71±0.84 ^c	1.41±0.68 ^c
T_3	9.76±1.61 ^d	5.75±0.62 ^b	3.43±0.54 ^c	0.58±0.26 ^d
T_4	1.88±0.49 ^e	1.01±0.34 ^c	0.78±0.25 ^d	0.09±0.02 ^f
T_5	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^f

注:生物量均为净生物量。

2.3 干旱胁迫对苗木叶片相对含水量和水势的影响

干旱胁迫对小叶杨幼苗叶片的相对含水量和水势有着显著影响。随着土壤含水量的减少,苗木叶片

相对含水率和水势都有下降的趋势。当土壤含水量从 CK 组的 20.3% 下降到 T_1 组的 16.2%,即降低 4.1% 时,相应的叶片相对含水率从 90.28% 下降到 85.19%,降低 5.09%,叶片水势从 -0.4 MPa 下降到 -0.7 MPa,降低 0.3 MPa,所以当土壤含水量从 CK 组降到 T_1 组的时候,叶片相对含水率有所下降但变化不明显,但水势有明显的下降;当土壤含水量从 T_1 组的 16.2% 下降到 T_2 组的 12.2%,即降低 4.0% 时,相应的叶片相对含水率从 85.19% 下降到 68.84%,降低 16.35%,叶片水势从 -0.7 MPa 下降到 -1.5 MPa,降低 0.8 MPa,当土壤含水量从 T_1 组降到 T_2 组的时候,叶片相对含水率和水势都有明显的下降。从 T_2 到 T_3 小叶杨幼苗叶片相对含水率和水势下降均很明显,苗木叶片缺水现象明显,水势低到了 -2.8 MPa。从 T_3 到 T_4 小叶杨幼苗叶片相对含水率和水势突然降幅增大,苗木叶片缺水现象更加明显,叶片相对含水率和水势更是降低到 -4.1 MPa。当从 T_4 到 T_5 ,土壤水分进一步减少,小叶杨失去水分向上运输的动力,植物失活(表 3)。

表 3 干旱胁迫下苗木生理特征值

干旱梯度	相对含水率/%	水势/MPa	净光合速率/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	蒸腾速率/ $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
CK	90.28 ^a	-0.4 ^a	10.36 ^a	7.46 ^a
T_1	85.19 ^a	-0.7 ^b	8.33 ^b	6.59 ^a
T_2	68.84 ^b	-1.5 ^c	4.91 ^c	4.12 ^b
T_3	51.05 ^c	-2.8 ^d	4.27 ^c	3.94 ^b
T_4	20.10 ^d	-4.1 ^f	1.43 ^d	1.15 ^c
T_5	—	—	—	—

2.4 干旱胁迫对苗木净光合的影响

由表 3 可以看出,干旱胁迫小叶杨幼苗的净光合速率逐渐减少,且 CK, T_1, T_2 的净光合速率差异性显著。处理 T_2, T_3, T_4 小叶杨幼苗净光合速率都降到了 $5.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下的水平,严重干旱胁迫下 (T_4),与正常供水条件相比,净光合速率下降 $8.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,说明轻度干旱胁迫对植物净光合速率影响不大,严重干旱胁迫使植物叶片的光合机构受损、光合能力降低,从而影响光合速率,最终完全丧失光合能力。随着干旱梯度的加深,蒸腾速率逐渐降低,但差异性不显著。CK 组 [$7.46 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 与 T_1 [$6.59 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 组蒸腾速率相近,远远大于 T_2 [$4.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 组与 T_3 [$3.94 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 组,净光合速率和蒸腾速率随干旱梯度加深降幅逐渐较小, T_2 和 T_3 的净光合速率和蒸腾速率差异性不显著;从 T_3 到 T_4 ,净光合速率和蒸腾速率

进一步减少,降幅达到最大,当土壤水分进一步降低,到达 T_5 ,小叶杨将逐渐失去光合作用和蒸腾作用。

3 结论与讨论

(1) 干旱胁迫对植物生长、生理都有着显著的影响,干旱区的植物通过改变植物地上、地下生物量、以及一些生理活动来适应干旱天气^[10]。本研究发现,干旱胁迫抑制了小叶杨幼苗的生长,地上部分(苗木株高、地径)、苗木生物量、叶片相对含水量、水势均随土壤相对含水量降低而下降;各干旱梯度下 CK, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 的净光合速率也随干旱梯度加深而降低,这与韩希英^[11]的研究结果基本相一致。

(2) 根系受到外界环境的胁迫时,在土壤剖面的可调节性分布对植物的存活有着重要的意义^[12],另外,根系作为植物吸收水分和养分的主要途径和重要功能器官,其对干旱有一定的抵抗能力^[13],本研究发现,CK 组到 T_1 组,根生物量减少较大,但干旱 T_1 , T_2 , T_3 处理组差异不显著,表明适当的水分亏缺对根系的影响较少,这主要是因为初步的干旱胁迫,主要影响叶细胞增大和增殖,较少叶面积和生物量^[14],从而抑制蒸腾,对地下生物量(根系)的影响较滞后^[15]。叶生物量 T_1 , T_2 , T_3 处理组差异显著,植物在干旱胁迫下,叶面积逐渐减小;与 CK 组相比,根、茎、叶生物量中,根生物量降幅不大,叶生物量降幅最大。

(3) 水分是光合作用的原料,根系是植物吸收水分的主要器官^[16],植物在干旱条件下,根系活力降低,水分向上运输的动力减小^[17],本研究发现,从 CK 到 T_3 ,随着干旱梯度的加深,苗木叶片相对含水量、水势均减小。随着干旱梯度的加深,苗木净光合速率和蒸腾速率受到抑制^[18];光合速率和蒸腾速率是评价植物抗旱性的可靠指标^[19],本研究发现,从 CK 到 T_3 ,净光合速率和蒸腾速率随干旱梯度加深降幅逐渐较小,并且严重干旱时也能保持较大的光合速率和蒸腾速率,说明小叶杨具有明显抗旱特性。

(4) 外界环境胁迫会引起植物光合速率的变化^[20]。本研究结果表明,干旱胁迫使小叶杨净光合速率和蒸腾速率逐渐减小。干旱胁迫条件下,植物由于缺水,各个生理机能都会失调甚至可能出现衰竭现象,随着干旱梯度的增加和胁迫时间的延长,植物叶片气孔密度增加,但气孔收缩,气孔变小^[21],抑制了 CO_2 向叶绿体的输送和叶片水分的蒸发,从而限制了叶片的光合作用和蒸腾作用^[22],抑制植物生长。本文中,当土壤水分进一步减少,土壤含水量降低到 6.09%(T_4) 以下,小叶杨开始出现干枯现象,当土壤含水量达到 4.06%(T_5),小叶杨全部死亡,表明山西

省西南部及其周边地区,进行小叶杨造林,土壤水分尽量要保持在 6.09%(萎蔫系数)以上。

(5) 小叶杨在干旱条件下通过调节自身生理和生态特性,减少地上、地下生物量,降低光合速率和蒸腾速率等来适应干旱环境,具有较强的耐旱性,适宜生长在西北干旱地区,这为我国充分利用干旱土地资源的提供了条件。所以说小叶杨对干旱具有较强的适应能力,这与鲁作民等研究结果一致^[5]。

[参 考 文 献]

- [1] Lange O L, Kappen L, Schulze E D. Water and plant life: Problems and modern approaches [M]. Berlin: Heidelberg Springer-Verlag, 1976.
- [2] Bachelard E P. Effects of soil moisture stress on the growth of seedlings of three eucalypt species. II: Growth effects[J]. Australian Forest Research, 1986, 16(1): 51-61.
- [3] 李林锋,刘新田. 干旱胁迫对桉树幼苗的生长和某些生理生态特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2003, 19(1): 14-17.
- [4] 马富举,李丹丹,蔡剑,等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 724-730.
- [5] 鲁作民,蒲锦春. 小叶杨幼苗土壤干旱锻炼的研究[J]. 林业科学, 1982, 18(2): 10.
- [6] 卢景龙. 山西北部风沙区主要防护林树种选择探讨[J]. 山西林业科技, 2010, 39(1): 46-48.
- [7] 王超,王冬梅,李永红,等. 能源树种文冠果在黄土残垣沟壑区引种试验的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 90-96.
- [8] 劳同浩,姜俊红,李就好,等. 南雄烟区土壤田间持水量测定对比试验研究[J]. 资源与环境科学, 2013, (1): 208-209.
- [9] Gindaba J, Rozanov A, Negash L. Response of seedlings of two *Eucalyptus* and three deciduous tree species from Ethiopia to severe water stress[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 201(1): 119-129.
- [10] 韩希英,宋凤斌. 干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 170-172.
- [11] 黄彩变,曾凡江,雷加强,等. 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 5-15.
- [12] 唐玉婧,马猛,邓西平,等. 干旱胁迫下小麦抗旱能力与根系特征间的关系[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 4(12): 1-7.
- [13] 邱楠,席本野,Jeremiah R P., 等. 宽窄行栽植下三倍体毛白杨根系生物量分布及其对土壤养分因子的响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(10): 961-971.

(下转第 51 页)

大的因素,降雨强度、降雨量、覆被盖度和坡度是对径流量影响较大的 4 个因素。

(4) 本试验过程只涉及单一覆被,未对两种覆被或两种以上覆被组合进行减流减沙效益试验,且收集的枯落物均为未分解枯落物,没有模拟自然环境中的半分解以及分解状态枯落物,需要今后做进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [2] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报,2006,24(1):19-26.
- [3] 张振明,余新晓,牛健植,等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报,2005,19(3):139-143.
- [4] 程金花,张洪江,史玉虎,等. 三峡库区几种林下枯落物的水文作用[J]. 北京林业大学学报,2003,25(2):8-13.
- [5] 冯国祿,龚军慧. 人工降雨对稻田中氮磷动态变化的影响研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):130-133.
- [6] 田育新,李锡泉,陶接来,等. 人工降雨条件下不同坡度红壤坡面径流泥沙变化特征研究[J]. 湖南林业科技,2006,33(1):1-3.
- [7] 杨晓俊. 降雨产流影响因素分析[J]. 地下水,2007,29(5):50-51,113.
- [8] 王志伟,陈志成,艾钊,等. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):17-20,26.
- [9] 甘卓亭,叶佳,周旗,等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报,2010,30(9):2387-2396.
- [10] 董月群,李淑芹,原翠萍,等. 黑麦草对黄土坡面降雨产流产沙过程的影响[J]. 中国农业大学学报,2011,16(4):67-73.
- [11] 李鹏,李占斌,郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):444-449.
- [12] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1391-1396.
- [13] 王占礼,靳雪艳,马春艳,等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. 水土保持学报,2008,22(2):24-28.
- [14] 闫俊华,周国逸,申卫军. 用灰色关联法分析森林生态系统植被状况对地表径流系数的影响[J]. 应用与环境生物学报,2000,6(3):197-200.
- [15] 李香云,王玉杰. 不同植被类型对地表径流影响的灰色关联度分析[J]. 水土保持通报,2007,27(2):83-86.
- [16] 孙晓东,焦玥,胡劲松. 基于灰色关联度和理想解法的决策方法研究[J]. 中国管理科学,2005,13(4):63-68.
- [17] 田民,刘思峰,卜志坤. 灰色关联度算法模型的研究综述[J]. 统计与决策,2008(1):24-27.
- [18] 刘振波,史学正,于东升,等. 模拟降雨下土壤前期含水量对土壤可蚀性的影响[J]. 生态环境,2008,17(1):397-402.
- [19] 琚彤军,刘普灵,徐学选,等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. 泥沙研究,2007(4):65-71.
- [20] 唐小娟,郭雪莲. 几种坡面径流调控措施的筛选试验研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):125-128.

(上接第 45 页)

- [14] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants[J]. Plant, Cell and Environment, 2002,25(2):275-294.
- [15] 郭海军. 山西北部风沙区小叶杨低产(效)成过熟林更新针叶树模式探讨[J]. 内蒙古林业调查设计,2010,33(6):55-56.
- [16] 王金胜,郭栋生,丁起盛,等. 水分胁迫对玉米幼苗几种生理生化指标的影响及其抗旱性的关系[J]. 山东农业大学学报,1992,12(2):137-140.
- [17] Sharp R E, Poroyko V, Hejlek L G, et al. Root growth maintenance during water deficits: Physiology to functional genomics[J]. Journal of Experimental Botany, 2004,55(407):2343-2351.
- [18] 高世斌,冯质雷,李晚忱,等. 干旱胁迫下玉米根系性状和产量的 QTLs 分析[J]. 作物学报,2005,31(6):718-722.
- [19] Steudle E. Water uptake by plant roots: An integration of views[J]. Plant and Soil, 2000,226(1):45-56.
- [20] 孙龙,彭祚登,王冲,等. 干旱胁迫对两种沙地灌木能源树种光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报,2014,38(2):99-104.
- [21] 文志,王丽,王效科,等. O_3 和干旱胁迫对元宝枫叶片气孔特征的复合影响[J]. 生态学杂志,2014,33(3):560-566.
- [22] 刘帅华,贺康宁,秦景,等. NaCl 胁迫下银水牛角光响应的研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,7(26):145-149.