

水分和铅交互胁迫对紫穗槐苗木光合特性和水分利用效率的影响

邹朋, 王进鑫, 张青, 刘俊峰, 伍欢

(西北农林科技大学 资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过盆栽实验研究 1 a 生紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)在不同水分处理(土壤相对含水率为 40%, 60%, 80%, 100%)及重金属铅胁迫水平(0, 1 000, 2 000, 4 000, 6 000 mg/kg)交互作用下叶绿素含量、净光合速率和水分利用效率的变化。结果表明:在水分和铅交互胁迫下,紫穗槐叶绿素含量变化无明显规律可循,铅含量 $<4\ 000\ \text{mg/kg}$ 时,不同水分胁迫条件下紫穗槐叶绿素含量呈逐渐下降趋势,铅含量 $>4\ 000\ \text{mg/kg}$ 时,不同水分胁迫条件下紫穗槐叶绿素含量呈逐渐上升趋势。水分和铅交互胁迫下,紫穗槐净光合速率呈下降趋势,铅含量 $<2\ 000\ \text{mg/kg}$ 时,不同水分胁迫条件下紫穗槐净光合速率逐渐上升,铅含量 $>2\ 000\ \text{mg/kg}$ 时,不同水分胁迫条件下紫穗槐净光合速率逐渐下降。在水分和铅交互胁迫下,紫穗槐水分利用效率呈上升趋势,土壤相对含水率为 40%(重度水分胁迫)时,紫穗槐水分利用效率最大。

关键词:紫穗槐;交互胁迫;叶绿素;净光合速率;水分利用效率

中图分类号:Q945.78

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)03-0146-04

Effects of Interactive Stress of Water and Lead on Characteristics of Photosynthesis and Water Use Efficiency of *Amorpha fruticosa* Seedlings

ZOU Peng, WANG Jin-xin, ZHANG Qing, LIU Jun-feng, WU Huan

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The theory of the changes of chlorophyll content, net photosynthesis rate and water use efficiency in annual of *Amorpha fruticosa* seedlings treated was explored by different levels of water (40%, 60%, 80%, and 100%) and lead (0, 1 000, 2 000, 4 000, and 6 000 mg/kg) through the pot experiment. The results showed that the change of chlorophyll content of *Amorpha fruticosa* seedlings had no obvious regularity under interactive stress, under lead less than 4 000 mg/kg, chlorophyll content of *Amorpha fruticosa* seedlings decreased in different water stress conditions, under lead more than 4 000 mg/kg, chlorophyll content of *Amorpha fruticosa* seedlings increased in different water stress conditions. Net photosynthesis rate of *Amorpha fruticosa* seedlings decreased gradually under interactive stress, under lead less than 2 000 mg/kg, net photosynthesis rate of *Amorpha fruticosa* seedlings increased in different water stress conditions, under lead more than 2 000 mg/kg, net photosynthesis rate of *Amorpha fruticosa* seedlings decreased in different water stress conditions. Water use efficiency of *Amorpha fruticosa* seedlings increased gradually under interactive stress, water use efficiency of *Amorpha fruticosa* seedlings reaches to a maximum value when relative soil water content was 40% (severe water stress).

Key words: *Amorpha fruticosa*; interaction stress; chlorophyll content; net photosynthesis rate; water use efficiency

收稿日期:2012-10-16

修回日期:2012-11-28

资助项目:国家自然科学基金项目(31170579);高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20110204110009)

作者简介:邹朋(1987—),男,辽宁营口人,硕士研究生,主要从事生态环境工程研究。E-mail:zploveyl@126.com

通信作者:王进鑫(1962—),男,甘肃镇原人,教授,博士生导师,主要从事干旱区人工林生态系统水分运移调控与生态恢复理论研究。E-mail:jwang118@126.com

我国的干旱和半干旱地区,由于受到社会经济、自然条件和历史条件的限制,植被破坏严重,水土流失和荒漠化等生态环境问题越来越突出,与此同时,随着工、农业生产和交通运输业的高速发展,排放的重金属污染物通过各种渠道进入土壤,导致了部分植物和土壤中某些重金属元素的积累。铅(Pb)是具有毒性的重金属元素之一,是植物非必需元素,但可通过根系和叶片等器官吸收进入植物体内,从而使得细胞膜透性发生改变,对叶绿体、线粒体、细胞核等亚显微结构造成一定程度的破坏,从而引起植物光合作用、呼吸作用、核酸代谢、细胞分裂等一系列生理生化过程的紊乱^[1]。尽管铅污染治理的方法很多,但植被恢复或植物修复技术则被认为是最具潜力的方法之一,因而成为目前环境生态学的研究热点^[2]。木本植物,因其具有生长迅速、生物量大、根系发达等特征,吸收积累的污染物不会在短时期内释放到环境中,而且大部分林木以生产木材和绿化为主要目的,不进入食物链而对人体产生危害。因此,其在重金属矿业废弃地植物修复或植被恢复中的作用受到广泛关注。目前相关的研究主要针对铅胁迫或干旱胁迫进行单一的研究,或者是将铅与其他的重金属结合起来研究其复合效应,对北方矿区废弃地普遍存在的干旱和重金属污染交互胁迫问题的研究甚少。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)又名棉槐,为豆科紫穗槐属的一种易繁殖多年生丛生落叶灌木,抗铅性较强、耐干旱、贫瘠,是防洪坝土坡、治理沙漠等工程的重要植物^[3-4],同时在黄土高原矿区的植被建设中发挥着非常重要的作用。本文选择木本植物紫穗槐为研究对象,通过测定紫穗槐幼苗在水和铅交互作用下的叶绿素含量,净光合速率和水分利用效率的变化,阐明紫穗槐幼苗对逆境的抗性和适应能力,对干旱和半干旱矿区的植被建设具有非常重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试植物 为 1 a 生紫穗槐,为了减少苗木基础生长所引起的系统误差,起苗前对圃地苗木进行了调查、逐一标记,起苗后精心挑选,基本确保了苗高、地径与长势的一致性。

1.1.2 供试土壤 为杨凌塬土,质地黏壤,田间持水量 22.3%,土壤铅的背景值^[5]为(16.3±2.96) mg/kg,土壤有机质含量 13.70 g/kg,全氮含量为 0.73 g/kg,速效磷含量为 35.91 mg/kg,速效钾含量为 96.52 mg/kg;风干土过筛,除去石砾、结核及林草根系,充分混匀备用;在实验前向土壤中加入 99%的

分析纯 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O,充分混匀后让其钝化 2 个月,备用;试验期间栽培基质保持自然肥力,不施肥。

1.2 方法

试验在暖温带半湿润气候区的陕西杨凌西北农林科技大学主校区内进行,采用旱棚人工控水的方法进行试验布设。试验设置 5 个重金属铅胁迫水平(0, 1 000, 2 000, 4 000, 6 000 mg/kg);土壤相对含水率上限 100%、下限 40%,分设 4 个水平,分别为 40%(重度水分胁迫)、60%(轻度水分胁迫)、80%(轻微水分胁迫)、100%(充分供水)^[6-8](表 1);采用随机区组实验设计,共 20 个处理。塑料栽培容器高 30 cm、口径 27 cm,按 0—30 cm 平均土壤容重 1.15 g/cm³装土,保持各容器干土重相同。三月中旬将土壤装入塑料桶,每桶土壤质量为 11 kg,并将苗木移栽,浇灌一定体积的水,保证苗木成活。每桶栽植紫穗槐 1 株,每个处理重复 3 次。之后采用人工称质量的方法补充消耗的水分,使各处理的土壤相对含水量(土壤水分占田间持水量的百分比)分别为 100%, 80%, 60%, 40%,每隔 2 d 称量一次,以便及时调整每日补充的灌水量。为保持各处理土壤水分相对稳定,除每天补充灌水外,土壤表面用小砂石覆盖(厚约 2 cm)。

试验自 3 月 27 日开始进行人工控水,以 18:00 时的土壤水分为标准,灌水量用称质量法控制,每天 18:00 点向桶中补充水分。干旱胁迫 60 d 后,于 5 月 26 日开始采集各处理苗木完全展开的叶片(枝条顶端第 5~8 片叶),测定其叶绿素含量。干旱胁迫 61 d 后,于 5 月 27 日上午 9:00—11:00,选取长势良好,于树冠上部向阳的叶片(3~5 片),用 Li-6400 便携式光合测定仪测定净光合速率,蒸腾速率,通过计算得出其水分利用效率。

表 1 实验设计

Pb 含量/ (mg·kg ⁻¹)	供水率/%			
	100(CK)	80(T1)	60(T2)	40(T3)
0(CK)	CK	T1	T2	T3
1000(A)	A	AT1	AT2	AT3
2000(B)	B	BT1	BT2	BT3
4000(C)	C	CT1	CT2	CT3
6000(D)	D	DT1	DT2	DT3

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素含量测定 叶绿素含量以 80%丙酮提取,紫外分光光度计测定^[9]。具体方法为:称取 0.1 g 样品放入研钵中,加入少量石英砂,加入 80%丙酮 5 ml,充分将样品研磨细碎,直至变白,然后将其过滤,得到叶绿素的提取液。将过滤后的提取液用 80%丙酮定容至 10 ml。用紫外分光光度计测定定

容后的提取液的光密度 D_{663} 、 D_{645} 。

根据比耳定律 $D=K \times C$ 可得:

$$C_a = 12.71 \times D_{663} - 2.59 \times D_{645} \quad (1)$$

$$C_b = 22.88 \times D_{645} - 4.67 \times D_{663} \quad (2)$$

$$C_{a+b} = 20.3 \times D_{645} + 8.04 \times D_{663} \quad (3)$$

将 D_{645} 、 D_{663} 代入公式(1)–(3),可求得 C_a 、 C_b 、 C_{a+b} ,再把所得的数据代入公式(4),可求出叶绿素含量。

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g}) = C \times V / A \times 1000 \quad (4)$$

式中: C ——叶绿素浓度(mg/L); V ——提取液总体积(ml); A ——取样鲜重(g)。

1.3.2 光合指标测定 在室外自然光照下,选择光照条件好的时间测定当天的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度及蒸腾速率的变化规律。每次测定时间均控制在上午 9:00—11:00。选取长势良好,于树冠上部向阳的叶片,用 Li-6400 便携式光合测定仪进行测定。

1.3.3 水分利用效率计算 水分利用效率通过计算得出, $\text{WUE} = \text{净光合速率}(\text{Pn}) / \text{蒸腾速率}(\text{Tr})$,其中净光合速率和蒸腾速率可以通过 Li-6400 光合测定仪测定得出。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 软件对所测的 3 个重复数据取平均值,再进行作图,并运用 SPSS 17.0 软件中的 Duncan 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水分和铅胁迫对紫穗槐幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素在光合作用中对光能的吸收、传递及光化学反应起着非常重要的作用,同时,叶绿素含量的多少可作为表征植物抗旱性的重要指标^[10]。因此,对叶绿素的研究是植物逆境生理研究中的基本指标。研究结果表明(图 1),在相同铅胁迫条件时,随着水分胁迫的加剧,紫穗槐叶绿素含量变化幅度不大,整体呈上升趋势;在相同水分胁迫条件下,随着铅胁迫的增大,紫穗槐叶绿素含量整体呈先降后升的趋势;不同水分胁迫的紫穗槐叶绿素含量均在土壤铅含量 4 000 mg/kg(C)时达到最小,随着水分胁迫程度的加剧和铅胁迫的增大,紫穗槐叶绿素含量变化无明显规律,紫穗槐叶绿素含量在土壤铅含量 4 000 mg/kg(C)时达到最小,且显著低于对照(CK)处理($P < 0.05$),为对照(CK)处理的 72.2%。紫穗槐叶绿素含量在(T3)处理时达到最大,与对照(CK)处理呈极显著性差异($P < 0.01$),为对照(CK)处理的 1.31 倍。

紫穗槐叶绿素含量随干旱胁迫的加重呈上升趋

势,土壤相对含水量为 40%(重度水分胁迫)时可以促进紫穗槐叶绿素含量的增加。紫穗槐叶绿素含量随着铅胁迫的增大呈先下降后上升的趋势,不同水分胁迫的紫穗槐叶绿素含量均在土壤铅含量为 4 000 mg/kg(C)时达到最小,叶绿素含量下降可能是由于重金属铅破坏叶绿素和叶绿体的结构,破坏叶绿素合成过程并影响叶绿素合成酶的活性^[11],也可能是 Pb 胁迫下植物叶绿素分子中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Mg^{2+} 被包括 Pb^{2+} 在内的其他重金属离子所取代^[12],破坏了叶绿素体的结构和功能,随着铅胁迫继续加剧(当土壤铅含量为 6 000 mg/kg),不同水分胁迫下的紫穗槐叶绿素含量都有所增加,可能是紫穗槐对铅胁迫的适应性表现。

2.2 水分和铅胁迫对紫穗槐幼苗净光合速率的影响

光合作用是绿色植物生命活动的能量和物质基础,植物只有产生较多的光合产物才能生存和发展,因此光合作用对于植物自身的延续和人类的生活需求都具有十分重要的现实意义^[13],净光合速率是表示植物光合作用的重要指标。研究结果表明(图 2),在相同铅胁迫条件下,随着水分胁迫的加剧,紫穗槐净光合速率整体呈下降趋势;在相同水分胁迫条件下,随着铅胁迫的增大,紫穗槐净光合速率整体呈先升后降的趋势(T3 处理除外),且均在土壤铅含量为 2 000 mg/kg(B)时达到最大,随着水分胁迫程度的加剧和铅胁迫的增大,紫穗槐净光合速率呈下降趋势,在重度水分胁迫(T3)处理下,紫穗槐净光合速率极显著低于其他 3 个水分胁迫处理($P < 0.01$),紫穗槐净光合速率在(B)处理时达到最大,且极显著高于对照(CK)处理($P < 0.01$),为对照处理的 1.17 倍,紫穗槐净光合速率在(CT3)处理时达到最小,且极显著低于对照(CK)处理($P < 0.01$),为对照处理的 15.6%。

叶绿体是植物进行光合作用的场所,只有充足的叶绿素和完整的叶绿体才能保证光合作用的顺利进行^[14],紫穗槐净光合速率随干旱胁迫的加重呈下降趋势,土壤相对含水量为 40%(重度水分胁迫)时,紫穗槐净光合速率极显著小于其他 3 个水分胁迫处理($P < 0.01$),这与吕廷良等^[15]研究旱、盐及其交互胁迫对紫荆幼苗净光合速率及其叶绿素含量的影响中,紫荆幼苗叶片净光合速率随干旱胁迫的持续及干旱浓度的增大而逐渐降低的结果基本一致。本试验结果说明,重度水分胁迫可能损害了植物体中叶绿体的结构,从而导致紫穗槐在重度水分胁迫的条件下虽然叶绿素含量较高,但其净光合速率却较低。土壤铅含量为 2 000 mg/kg 时,不同水分胁迫的紫穗槐净光合

速率达到最大(T3 处理除外),说明在土壤铅含量为 2 000 mg/kg 能在一定程度上促进紫穗槐的光合作用。当土壤铅含量大于 2 000 mg/kg 时,铅胁迫对紫穗槐光合作用伤害变大,导致紫穗槐净光合速率逐渐下降。随着交互胁迫的加剧,紫穗槐净光合速率逐渐下降,说明水和铅交互胁迫对紫穗槐光合作用伤害较大。

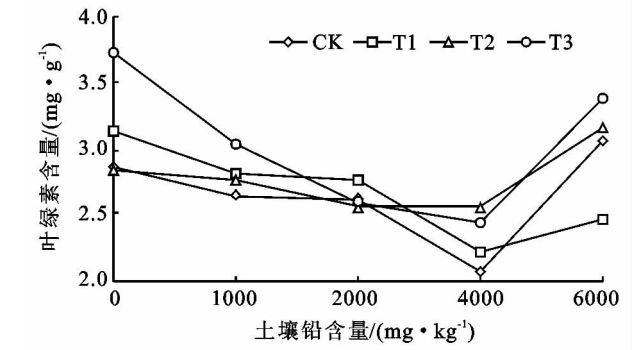


图 1 交互胁迫对紫穗槐幼苗叶片叶绿素含量的影响

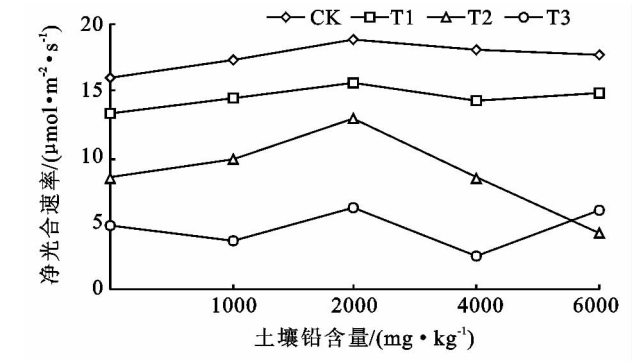


图 2 交互胁迫对紫穗槐净光合速率的影响

2.3 水分和铅胁迫对紫穗槐幼苗水分利用效率的影响

树木叶片的水分利用效率能较为准确地反映出树木叶片的瞬间或短期的反应行为,是评价水分亏缺条件下树木生长适宜程度的一个综合生理生态指标^[16]。研究结果表明(图 3),在相同铅胁迫条件下,随着水分胁迫的加剧,紫穗槐水分利用效率呈上升趋势;在相同水分胁迫条件下,随着铅胁迫的增大,紫穗槐水分利用效率整体呈上升趋势,随着水分胁迫程度的加剧和铅胁迫的增大,紫穗槐水分利用效率呈上升趋势,在土壤相对含水量为 40%(重度水分胁迫)时,紫穗槐水分利用效率显著高于其他 3 个水分胁迫处理($P<0.01$),紫穗槐水分利用效率在(T3)处理时达到最大,与对照处理(CK)呈极显著性差异($P<0.01$),为对照处理(CK)的 2.02 倍,紫穗槐水分利用效率在(A)处理下达到最小值,为对照(CK)处理的 88.8%。

水分利用效率是净光合速率与蒸腾速率间的比值,因此水分利用效率的变化和净光合速率及蒸腾速率密切相关。紫穗槐水分利用效率随干旱胁迫的加

重呈上升趋势,在土壤相对含水量为 40%(重度水分胁迫)时显著高于其他 3 个水分处理,这与柴胜丰等^[17]研究干旱胁迫对槐树幼苗生长和生理生态特征的影响中,随着干旱胁迫的增加槐树幼苗水分利用效率逐渐升高的结果一致。本试验中,适当的干旱胁迫增强了叶片的渗透调节能力,使叶片保持较低的蒸腾速率,使得紫穗槐水分利用率逐渐增加。不同水分胁迫下紫穗槐水分利用效率随铅胁迫的加剧整体呈上升趋势,说明紫穗槐以提高自身的水分利用效率来提高其适应铅胁迫环境的能力。随着交互胁迫的加剧,紫穗槐水分利用效率增大,说明紫穗槐对水分和铅交互胁迫具有一定的耐受性。

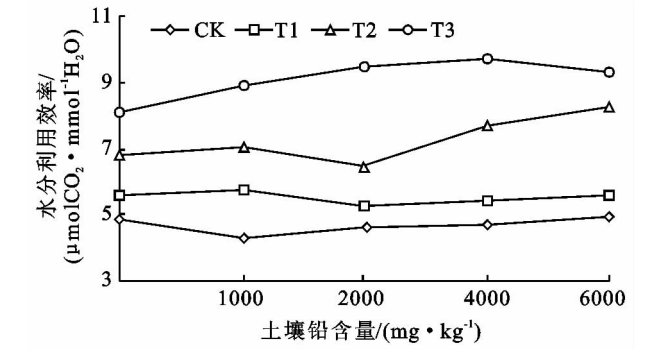


图 3 交互胁迫对紫穗槐水分利用效率的影响

3 结论

本研究中,水分胁迫对紫穗槐净光合速率和水分利用效率影响较大,而铅胁迫对紫穗槐叶绿素含量影响较大,紫穗槐叶绿素含量在不同水分条件随着土壤中铅含量的增加表现出先下降后上升的趋势,但是其含量随着水分和铅交互胁迫的加剧无明显规律可循,可能是与铅的种类及施入方式不同有关,有待于进一步研究。紫穗槐水分利用效率随着水分胁迫程度的加剧和铅胁迫的增大表现出上升趋势,说明紫穗槐对干旱和铅胁迫具有一定的适应能力,因而在干旱、半干旱矿区种植紫穗槐能发挥其较高的生态效应。

参考文献:

[1] 夏建国,兰海霞,吴德勇. 铅胁迫对茶树生长及叶片生理指标的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):43-48.
[2] 廖琴,王胜利,南忠仁. 干旱区绿洲土壤中 Cd、Pb、Zn、Ni 的吸收积累及形态分布实验研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(5):108-113.
[3] 崔大练,马玉心,石戈,等. 紫穗槐幼苗叶片对不同干旱梯度胁迫的生理生态响应[J]. 水土保持研究,2010,17(2):178-143.
[4] 聂俊华,刘秀梅,王庆仁. Pb(铅)富集植物品种的筛选[J]. 农业工程学报,2004,20(4):255-258.

参考文献:

- [1] 王绍武. 全新世气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [2] 马冲亚, 王海霞, 付长超. 东北地区 50 年气温序列特征及趋势研究[J]. 长春师范学院学报, 2009, 28(6): 55-59.
- [3] Hong Y T, Wang Z G, Jiang H B, et al. A 6000-year Record of Changes in Drought and Precipitation in Northeastern China Based on ^{13}C Time Series From Peat Cellulose[M]. Earth Planet Sci Lett, 2001.
- [4] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia[J]. Gephys. Res. Letts., 2002, 29(9): 381-384.
- [5] 李辑, 龚强. 东北地区夏季气温变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 6-10.
- [6] 刘实, 闫敏华, 隋波. 东北三省冬季气温变化的有关研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 357-361.
- [7] 孙莹, 江静, 杨青, 等. 东北夏季气温分区变化特征[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 50-55.
- [8] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. Mon. Wea. Rev., 1981, 109(4): 784-812.
- [9] 于梅, 邢俊江, 于洪敏. 黑龙江省近 46 年气温变化[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 158-164.
- [10] 高永刚, 那济海, 顾红, 等. 黑龙江省气候变化特征分析[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 45-47.
- [11] 杨凤海, 杨凤江, 苏琦, 等. 基于 ArcGIS 的黑龙江省活动积温空间插值与计算[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(1): 61-66.
- [12] 朱红蕊, 刘赫男. 黑龙江省 1961—2009 年极端气温事件变化特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 110-115.
- [13] 周秀杰, 张桂华, 潘华盛. 黑龙江省气候变暖对极端天气气候事件的影响[J]. 气象, 2002, 28(2): 51-55.
- [14] 玄明君. 黑龙江省黑土区气候时空变化特征分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [15] 魏丹, 杨谦, 迟凤琴. 东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J]. 黑龙江省农业科学, 2006(6): 69-72.
- [16] 赵军, 商磊, 蕊翠萍, 等. 基于 GIS 的黑土区土壤有机质空间变化分析[J]. 农业系统科学与研究, 2006, 22(4): 304-307.
- [17] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 50-54.
- [18] 孔令娜, 向南平. 基于 ArcGIS 的降水量空间插值方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(3): 123-126.
- [19] 曹文静, 李强子, 蒙继华, 等. 基于 GIS 的气温插值方法比较[J]. 中国农业气象, 2007, 28(增刊): 175-186.
- [5] 夏增禄, 李森照. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [6] Hisao T C. Plant responses to water stress[J]. Ann. Rew. Plant Physiology, 1973, 24: 519-570.
- [7] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J]. 林业科学, 1996, 32(4): 289-296.
- [8] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水利行业标准 (SL424—2008): 中华人民共和国水利行业标准: 旱情等级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [9] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] 周丽娜, 曲东, 邵丽丽, 等. 干旱胁迫下硫营养对小麦光合色素及 MDA 含量的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1579-1583.
- [11] 何冰, 叶海波, 杨肖娥. 铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 274-279.
- [12] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. Exp. Bot., 1996, 47(2): 259-266.
- [13] 毛卫佳, 张会慧, 金微微, 等. 干旱胁迫对移栽期烟草幼苗光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 68-70.
- [14] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [15] 吕廷良, 孙明高, 宋尚文, 等. 旱、盐及其交互胁迫对紫荆幼苗净光合速率及其叶绿素含量的影响[J]. 山东农业大学学报, 2010, 41(2): 191-195.
- [16] 刘茂秀, 史军辉, 王新英, 等. 微咸水灌溉下 3 种耐盐植物光合特性及水分利用效率比较研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 6-12.
- [17] 柴胜丰, 蒋运生, 韦宵, 等. 干旱胁迫对槐树幼苗生长和生理生态特征的影响[J]. 浙江林业科技, 2008, 28(2): 44-47.

(上接第 149 页)