

镉胁迫及施氮措施对喀斯特特有树种蚬木光合生理的影响

谭长强^{1,2,3},申文辉^{1,2,3},欧芷阳^{1,2,3},彭玉华^{1,2,3*},曹艳云^{1,2,3},郝海坤^{1,2,3}

(1.广西林业科学研究院,广西 南宁 530002;2.广西优良用材林资源培育重点实验室,广西 南宁 530002;

3.国家林业局 中南速生材繁育实验室,广西 南宁 530002)

摘要:采用盆栽方法,研究镉胁迫及施氮措施对喀斯特特有树种蚬木(*Excentrodendron hsienmu*)光合生理特性的影响,为镉污染的治理及修复措施提供科学依据。结果表明,镉胁迫显著抑制了蚬木苗高、地径、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和叶绿素含量,显著提高了蚬木胞间二氧化碳浓度(C_i),高镉($120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Cd}^{2+}$)胁迫时,分别比CK降低或升高了36.6%、66.4%、34.3%、20.9%、4.1%、12.1%;气孔导度则无明显变化。低镉($30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Cd}^{2+}$)胁迫下施氮,蚬木苗高、地径、叶绿素含量、 P_n 及 T_r 随着施氮浓度的增加表现为先微弱上升后下降,而 C_i 正好相反表现为先降后增, G_s 则表现为不断降低;高氮($0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)下,均比不施氮处理分别下降了9.7%、17.9%、23.9%、36.0%、13.5%、43.1%和5.6%。高镉胁迫下施氮,蚬木苗高、地径、叶绿素含量、 P_n 、 G_s 和 T_r 均随着施氮量的增加而不断降低,并且高氮均比不施氮显著降低了29.1%、23.4%、19.3%、40.3%、41.7%和17.9%; C_i 则显著地提升5.5%。说明镉胁迫下影响蚬木光合作用的主要因素为非气孔因素。低镉胁迫下施低氮对蚬木镉胁迫环境的适应性有一定的提升作用,高镉下施氮以及低镉下施高氮均使氮协同镉对蚬木产生了胁迫作用。

关键词:蚬木;镉胁迫;氮肥;光合作用;生理特征

中图分类号:S792.99 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)01-0026-05

Effects of Nitrogen Application on the Photosynthetic Physiology of *Excentrodendron hsienmu* in Karst Area under Cd Stress

TAN Zhang-qiang^{1,2,3}, SHEN Wen-hui^{1,2,3}, OU Zhi-yang^{1,2,3}, PENG Yu-hua^{1,2,3*},
CAO Yan-yun^{1,2,3}, HAO Hai-kun^{1,2,3}

(1. Guangxi Academy of Forestry, Nanning, Guangxi 530002, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning, Guangxi 530002, China;

3. Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation, Nanning, Guangxi 530002, China)

Abstract: This paper studied the effects of nitrogen application on the growth and physiological characteristics of *Excentrodendron hsienmu* under Cd stress, an endemic plant species occurring in Karst area to provide scientific basis for the management of cadmium pollution and remediation measures. The results indicated that under the stress of high Cd concentration ($120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), seedling height (H), ground diameter (D), transpiration rate (T_r), net photosynthetic rate (P_n), and chlorophyll content decreased by 36.6%, 66.4%, 34.3%, 20.9%, and 4.1%, respectively, while intercellular CO₂ concentration (C_i) increased by 12.1%, and no significant changes in the stomatal conductance (G_s). Under low Cd concentration stress ($30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Cd}^{2+}$) and the application of nitrogen, H , D , chlorophyll content, P_n and T_r in-

收稿日期:2017-07-17 修回日期:2017-10-31

基金项目:广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题(15-A-02-02);广西林业科技项目(桂林科字[2014]02号);广西自然科学基金(2014GXNSFAA118132);广西科技计划项目(桂科 AB16380300);广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题(14B0101)。

作者简介:谭长强,男,工程师,硕士,研究方向:森林培育和森林生态。E-mail:315990730@qq.com

*通信作者:彭玉华,女,高级工程师,研究方向:森林培育与生态林业工程。E-mail:pyh112233456789@126.com

creased slightly, and then decreased with the increase of applying nitrogen, while C_i decreased first, and then increased, and G_s decreased constantly. Under high level of applying nitrogen ($0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), H, D, chlorophyll content, P_n , T_r , C_i , and G_s decreased by 9.7%, 17.9%, 23.9%, 36.0%, 13.5%, 43.1% and 5.6%, respectively, compared with those without nitrogen application. Under high Cd concentration, H, D, chlorophyll content, P_n , G_s and T_r decreased with the increase of nitrogen application and compared with those without nitrogen application, the parameters mentioned above decreased by 29.1%, 23.4%, 19.3%, 40.3%, 41.7%, and 17.9%, respectively, while C_i increased by 5.5%, indicating that non-stomatal limitation was the key factor that affected the photosynthesis of *E. hsienmu* under cadmium stress. The adaptation of *E. hsienmu* was promoted under low cadmium stress by adding low level nitrogen. *E. hsienmu* was intimidated under low cadmium stress by adding high nitrogen or under high cadmium stress by adding nitrogen.

Key words: *Excentrodendron hsienmu*; cadmium stress; nitrogen fertilizer; photosynthesis; physiological characteristics

镉被视为最具危害性的重金属污染元素之一^[1]。广西由于矿区的不合理开发,受镉污染较为严重,并且矿区主要集中在喀斯特山地地区,随着水流镉污染范围不断扩大^[2-3]。而目前最有效和简便的治理方法为植物修复。因此,筛选和了解植物对镉胁迫的耐性及生长特征尤为重要。而镉对植物的伤害是多方面的,在形态上主要表现为根、茎生长迟缓和叶片失绿、卷曲,生理生化方面多表现为光合作用、叶绿素含量降低,高浓度镉则会导致植物生长严重受抑制^[4-5]。相关研究表明,喀斯特地区任豆、狭网真藓等特有植物具有较强的重金属吸收和耐受能力^[6-7],而氮素具有缓冲重金属引起植物毒害的能力,适量施氮可增强镉胁迫下植物叶片叶绿素含量、光合作用,从而促进植物生长,以及扭转因镉引起的植物体内的生理毒害^[8-9]。

蚬木(*Excentrodendron hsienmu*)是广西喀斯特地区特有树种,又名火木,椴树科(Tiliaceae),常绿大乔木。自然分布于广西和云南部分海拔700~900 m热带石灰岩山地季雨林,分布中心在广西南部,曾是广西北热带喀斯特季节性雨林的优势种和关键种之一^[10],因材质硬、木材好,而受乱砍滥伐严重而渐行濒危。蚬木为阳性,幼年耐荫,噬钙性树种。而目前相关研究表明,通过合理种植措施蚬木在偏酸性黄壤土上仍能正常生长^[11]。本研究通过探讨重金属镉胁迫及施氮措施对蚬木光合生理的影响及生理生化的变化,以期为土壤镉污染的治理提供更多的依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验地及供试土壤

本次试验在广西林业科学研究院苗圃进行,属湿润的亚热带季风气候,全年降水天数160 d左右,

具有明显的干湿季节,年平均降雨量1 650 mm,主要集中在5—9月份。供试土壤为赤红壤,采自广西林业科学研究院老虎岭,土壤pH值为4.73,有机质 $17.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全N $0.542 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、水解N $66.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全P $0.344 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效P $1.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全K $7.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效K $98.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全Cd $0.245 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验蚬木苗木为1年生扦插营养袋苗,采用直径为28 cm、高28 cm的塑料盆,每盆装10 kg土,设置7个处理,分别为CK: $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$, Cd1: $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$, Cd2: $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$, Cd1N1: $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$ + $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CO(NH₂)₂, Cd1N2: $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$ + $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CO(NH₂)₂, Cd2N1: $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$ + $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CO(NH₂)₂, Cd2N2: $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd $^{2+}$ + $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CO(NH₂)₂,每处理20个重复。土壤经风干、粉碎、过筛备用,Cd $^{2+}$ 以CdCl₂·2.5H₂O(分析纯)水溶液的形式一次性加入土壤,并与其混合均匀在遮雨棚下均衡1周。于2016年2月20日取预先培养好的健壮植株(生物量基本一致,苗高、地径分别约为39.9、4.48 mm),每盆栽植1株,试验期间保持土壤湿润,每次浇透至托盘有水流出但不外溢,浇水后,将盆内渗出水分倒回至盆中,以免Cd流失。按照常规方法进行松土和除草等。

1.3 测定方法

处理前1 d以及处理90 d后测量所有苗的苗高、地径。培养90 d后,于5月20日,叶片光合作用参数每处理随机抽取6株,每株取完全展开的成熟叶1片进行测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。光合作用参数测定采用LI-6400(LI-COR, USA)便捷式光

合仪,测定时间为 09:00—11:00,光强、叶温、空气流量、 CO_2 浓度分别设为 $1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 30°C 、 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 叶绿素含量采用丙酮-乙醇混合提取法^[12]。

1.4 数据分析

数据运用 Excel 2003 及 DPS 7.0 软件进行处理与分析,多重比较采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫及施氮措施对蚬木苗高地径的影响

从表 1 可知,镉胁迫下蚬木苗高、地径的生长均显著受到了抑制,Cd1、Cd2 苗高分别比 CK 降低了 41.6% 和 66.4%,地径分别下降了 27.5% 和 36.6%。低镉浓度(Cd1)胁迫下,随着施氮浓度的升高,苗高、地径表现了先升高后降低的变化趋势,苗高、地径均在 Cd1N1 时达到最大值分别比 Cd1 增加 7.7% 和 3.3%,但均未达到显著差异水平;

Cd1N2 苗高、地径分别较 Cd1 降低了 9.7% 和 17.9%,其中地径 Cd1N2 与 Cd1 之间达到了显著差异水平。高镉浓度(Cd2)胁迫下,随着施氮浓度的升高,苗高、地径表现了不断降低趋势,Cd2N1 分别降低了 16.3% 和 3.0%,Cd2N2 分别显著降低了 29.1% 和 23.4%。

2.2 镉胁迫及施氮措施对蚬木光合特征的影响

镉胁迫下蚬木叶片叶绿素含量均显著降低(表 1),并且各处理与 CK 之间均达到了显著差异水平,Cd1、Cd2 分别比 CK 降低了 24.3% 和 33.3%。低镉浓度(Cd1)胁迫下,随着施氮浓度的升高,叶绿素含量表现了先升高后降低的变化趋势,Cd1N1 比 Cd1 升高了 8.6%,Cd1N2 比 Cd1 显著降低了 23.9%。高镉浓度(Cd2)胁迫下,随着施氮浓度的升高,叶绿素含量表现了不断降低趋势,与 Cd2 相比,Cd2N1、Cd2N2 分别降低了 15.1% 和 19.3%,其中 Cd2N2 与 Cd2 达到了显著差异水平。

表 1 镉胁迫及施氮措施对蚬木生长及光合生理的影响

Table 1 Effect of nitrogen application on the photosynthetic characteristics of *Excentrodendron hsienmu* under Cd stress

处理	苗高/cm	地径/mm	净光合速率 $P_n(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	气孔导度 $G_s(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 $C_i(\text{uL} \cdot \text{L}^{-1})$	蒸腾速率 $T_r(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	叶绿素 /(mg · g ⁻¹)
CK	5.12±0.70 a	2.29±0.14 a	14.55±0.71 a	0.20±0.01 ab	254.15±8.1 d	3.53±0.03 a	6.17±0.13 a
Cd1	2.99±0.42 bc	1.66±0.11 b	13.37±0.54 a	0.22±0.05 a	280.11±2.0 c	3.15±0.07 b	4.67±0.19 bc
Cd1N1	3.22±0.29 b	1.72±0.13 b	13.59±0.36 a	0.17±0.01 b	249.03±3.2 d	3.38±0.10 a	5.07±0.83 b
Cd1N2	2.70±0.31 c	1.36±0.10 c	8.56±0.52 bc	0.13±0.01 c	264.51±4.7 cd	2.72±0.13 cd	3.55±0.44 de
Cd2	1.72±0.26 d	1.45±0.15 c	9.56±1.16 b	0.20±0.01 ab	305.63±4.6 b	2.79±0.10 c	4.11±0.20 cd
Cd2N1	1.44±0.18 de	1.41±0.11 c	7.93±0.42 c	0.13±0.01 c	319.30±6.7 ab	2.60±0.09 d	3.49±0.18 de
Cd2N2	1.22±0.14 e	1.11±0.09 d	5.71±0.59 d	0.12±0.01 c	322.44±8.5 a	2.29±0.16 e	3.32±0.12 e

注:表中同列小写字母表示差异显著水平($P<0.05$)。

镉胁迫下蚬木净光合速率(P_n)均受到了一定抑制,Cd1、Cd2 分别比 CK 降低了 8.1% 和 34.3%,其中 Cd2 与 CK 之间达到了显著差异水平。低镉浓度(Cd1)胁迫下,随着施氮浓度的升高, P_n 表现了先升高后降低的变化趋势,Cd1N1 比 Cd1 升高了 1.65%,Cd1N2 比 Cd1 显著降低了 36.0%。高镉浓度(Cd2)胁迫下,随着施氮浓度的升高, P_n 表现了不断降低趋势,与 Cd2 相比,Cd2N1、Cd2N2 分别显著降低了 17.0% 和 40.3%。

镉胁迫下,蚬木气孔导度(G_s)无显著变化。低浓度及高浓度镉胁迫下, G_s 均随着施氮浓度的增加而表现了不断降低趋势。低镉浓度(Cd1)胁迫下,Cd1N1、Cd1N2 分别比 Cd1 显著降低了 21.8% 和 43.1%;高镉浓度(Cd2)胁迫下,Cd2N1、Cd2N2 分别比 Cd2 显著降低了 36.6% 和 41.7%。

镉胁迫下蚬木胞间 CO_2 浓度(C_i)均显著上升,Cd1、Cd2 分别比 CK 上升了 10.2% 和 20.3%。低镉浓度(Cd1)胁迫下,随着施氮浓度的升高, C_i 表现

了先降低后升高的变化趋势,Cd1N1 比 Cd1 显著降低了 11.1%,Cd1N2 比 Cd1 增加了 5.6%。高镉浓度(Cd2)胁迫下,随着施氮浓度的升高, C_i 表现了不断升高趋势,与 Cd2 相比,Cd2N1、Cd2N2 分别增加了 4.5% 和 5.5%。

镉胁迫下蚬木蒸腾速率(T_r)均显著降低,Cd1、Cd2 分别比 CK 降低了 10.8% 和 20.9%。低镉浓度(Cd1)胁迫下,随着施氮浓度的升高, T_r 表现了先升高后降低的变化趋势,Cd1N1 比 Cd1 显著升高了 7.5%,Cd1N2 比 Cd1 显著降低了 13.5%。高镉浓度(Cd2)胁迫下,随着施氮浓度的升高, T_r 表现了不断降低趋势,Cd2 水平相比,Cd2N1、Cd2N2 分别显著降低了 6.8% 和 17.9%。

3 结论与讨论

镉胁迫下,蚬木光合及生长受到显著抑制,其光合作用主要受非气孔因素影响。低镉胁迫下施低氮可增强蚬木光合作用,而高镉胁迫下施氮以及低镉

胁迫下施高氮均不能提高蚬木光合能力。

镉胁迫下,多种植物生长受到抑制^[13]。本试验结果表明,镉胁迫下蚬木苗高、地径均随着镉浓度的增加呈下降趋势。张帆^[9]等研究表明镉胁迫的同时加入氮可缓解镉胁迫对其生长的抑制。也有研究表明镉胁迫下不合理的供应氮肥将使氮与镉协同抑制植物生长^[8]。本研究得出,低镉条件下施低氮有利于蚬木苗高、地径的生长,但低镉高氮以及高镉胁迫下施氮均不同程度抑制了蚬木的生长。

植物受镉毒害的典型症状就是抑制叶绿素的合成,导致叶色黄化^[14]。本研究结果表明,镉胁迫下,蚬木叶片叶绿素含量随着镉浓度的增加而显著降低。氮素是合成叶绿素的重要元素之一,当植物体内铵态氮含量增加,会提高叶绿素合成前体谷氨酸或 α -酮戊二酸的含量,从而促进叶绿素的合成^[15]。而本研究发现,低镉胁迫下随着施氮含量的增加,蚬木叶片叶绿素含量呈先升高后降低的趋势,可能与高施氮水平下氮促进镉对蚬木的毒性增强有关。这也与曹莹^[8]等的研究镉胁迫下铵态氮对春小麦叶绿素含量的影响结果相一致。而高镉胁迫下,施氮均降低了蚬木叶片叶绿素含量,并且在高氮下达到了显著差异。

光合作用是植物生长的基础。S. Mediavilla^[16]等报道, P_n 降低主要有两方面的原因:气孔限制和非气孔限制。G. D. Farquhar^[17]认为, C_i 值的大小是评判气孔限制和非气孔限制的依据。 P_n 、 G_s 和 C_i 值同时下降时, P_n 的下降为气孔限制,这可能是由于镉胁迫影响了保卫细胞K、Ca的吸收和运输,增加了叶片气孔阻力^[18];相反,如果叶片 P_n 值的降低伴随着 C_i 值的提高,说明光合作用的限制因素是非气孔限制,这可能是由于严重镉胁迫产生的大量活性氧积累使膜脂过氧化^[19],或是Cd离子影响了Mg离子的正常运输^[20],从而影响了叶绿素的合成,也可能是原初光化学反应受到了伤害^[21-22]。本研究表明不施氮镉胁迫下,随着镉胁迫程度的加深, P_n 值表现了不断降低趋势,而 C_i 值则不断上升;低镉胁迫下施氮,蚬木 P_n 随着施氮浓度的增加表现为先微弱上升后下降, G_s 则表现了不断降低,而 C_i 值则正好相反表现为先降后增;而高镉胁迫下施氮,蚬木 P_n 值的降低也伴随着 G_s 值的不断降低以及 C_i 值的提高,说明镉胁迫对蚬木光合作用的影响限制因素为非气孔因素。同时也说明低镉胁迫下低氮可减轻这种因非气孔因素限制所引起的光合速率下降,而低镉胁迫下施高氮以及高镉胁迫下施氮均加重了非气孔因素的限制,说明低镉高氮及高镉胁迫下施氮均会产生对蚬木的协同胁迫,降低蚬木光合速率,

加重对蚬木的毒害。这与曹莹^[8]等的研究结果镉胁迫下适量氮水平可提高小麦叶片叶绿素含量及希尔反应活力,而高施氮水平下氮使镉对小麦的毒性增强相吻合。这可能是由于氮素是合成叶绿素的重要元素之一,当植物体内氮含量增加,会提高叶绿素合成前体谷氨酸或 α -酮戊二酸的含量,从而促进叶绿素的合成^[15]。同时,外施氮会使土壤pH下降,进而土壤镉的有效性增强,从而使植物吸收的镉含量增加,所受毒害作用增强^[23]。

参考文献:

- [1] PELFRÉNE A, WATERLOT C, MAZZUCA M, et al. Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter - contaminated agricultural topsoils (northern France) [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(5): 477-493.
- [2] 覃朝科,易鵠,刘静静,等.广西某铅锌矿区废水汇集洼地土壤重金属污染调查与评价[J].中国岩溶,2013,32(3):318-324.
QIN C K, YI J, LIU J J, et al. Investigation and evaluation on heavy metal pollution in the waste water collecting depression in a lead-zinc mine of karst area[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(3):318-324. (in Chinese)
- [3] 翟丽梅,廖晓勇,阎秀兰,等.广西西江流域农业土壤镉的空间分布与环境风险[J].中国环境科学,2009(6):661-667.
ZHAI L M, LIAO X Y, YAN X L, et al. Spatial variation and environment risk of cadmium in agricultural land in the Xijiang river draining of Guangxi[J]. China Environmental Science, 2009(6):661-667. (in Chinese)
- [4] 曹玲,司守霞,王庆成.镉对东北枫和东北山梅花生长和叶绿素荧光特性的影响[J].西北林学院学报,2017,32(3):67-70.
CAO L, SI S X, WANG Q C. Effect of cadmium on biomass accumulation and chlorophyll fluorescence characteristics of *Acer manduricum* and *Philadelphus schrenkii* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3):67-70. (in Chinese)
- [5] 郭晖,王姐,张家洋.土壤重金属胁迫下3种观赏植物生理抗性[J].西北林学院学报,2017,32(3):62-66.
GUO H, WANG N, ZHANG J Y. Physiological resistance of three ornamental plants to soil heavy metal stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3):62-66. (in Chinese)
- [6] 刘荣相,张朝晖.贵州东南部喀斯特汞金矿带苔藓植物及其重金属富集特征[J].中国岩溶,2010,29(1):41-47.
LIU R X, ZHANG C H. Bryophytes and its heavy metal accumulation in mercury-gold ore belt in the karst area of southeast Guizhou[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29 (1): 41-47. (in Chinese)
- [7] 覃勇荣,陈燕师,刘旭辉,等.土壤重金属污染背景下的任豆修复试验[J].农业环境科学学报,2010,29(2):282-287.
QIN Y R, CHEN Y S, LIU X H, et al. Repair experiment of heavy metal polluted soil with *Zenia insignis* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2):282-287. (in Chinese)
- [8] 曹莹,段萌,刘玉莲,等.镉胁迫下铵态氮对春小麦光合生理特性的影响[J].生态环境学报,2011,20(2):359-363.

- CAO Y, DUAN M, LIU Y L, et al. Effects of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ on photosynthetic characteristics of spring wheat plant under cadmium [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(2): 359-363. (in Chinese)
- [9] 张帆, 万雪琴, 王长亮, 等. 镉胁迫下增施氮对杨树生长和光合特性的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(3): 317-321.
- ZHANG F, WAN X Q, WANG C L, et al. Effects of nitrogen supplement on photosynthetic characteristic and growth rate of poplar plants under cadmium stress [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2011, 29(3): 317-321. (in Chinese)
- [10] 李先琨, 蒋忠诚, 黄玉清, 等. 桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响 [J]. 地球学报, 2008(2): 253-259.
- LI X K, JIANG Z C, HUANG Y Q, et al. Dynamics of dominant population and its influence on karstification in southwest Guangxi, China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008(2): 253-259. (in Chinese)
- [11] 申文辉, 李志辉, 彭玉华, 等. 魁木扦插繁殖影响因子研究 [J]. 西部林业科学, 2014, 43(6): 24-28.
- SHEN W H, LI Z H, PENG Y H, et al. Study on the effects on cutting propagation of *Excentrodendron hsienmu* [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2014, 43(6): 24-28. (in Chinese)
- [12] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 163-165.
- [13] 曹玲, 王庆成, 崔东海. 土壤镉污染对四种阔叶树苗木叶绿素荧光特性和生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 769-772.
- CAO L, WANG Q C, CUI D H. Impact of soil cadmium contain ration on chlorophyll fluorescence characters and biomass accumulation of four broad-leaved tree species seedlings [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 769-772. (in Chinese)
- [14] 刘俊祥, 孙振元, 巨关升, 等. 重金属 Cd^{2+} 对结缕草叶片光合特性的影响 [J]. 核农学报, 2009, 23(6): 1050-1053.
- LIU J X, SUN Z Y, JU G S, et al. Effects of Cd^{2+} stress on photosynthetic characteristics in leaves of *Zoysia japonica* [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(6): 1050-1053. (in Chinese)
- [15] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995; 53-55.
- [16] MEDIAVILLA S, SANTIAGO H, ESCUDERO A. Stomatal and mesophyll limitations to photosynthesis in one evergreen and one deciduous Mediterranean oak species [J]. *Photosynthetica*, 2002, 40(4): 553-559.
- [17] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [18] 顾颉刚. 镉胁迫对杨树无性系植株生长发育及部分生理特性影响的研究 [D]. 天津: 天津师范大学, 2008.
- [19] 苏玲, 章永松, 林咸永, 等. 维管植物的镉毒和耐性机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 106-112.
- SU L, ZHANG Y S, LIN X Y, et al. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 106-112. (in Chinese)
- [20] 慈敦伟, 姜东, 戴廷波, 等. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响 [J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 88-91.
- CI D W, JIANG D, DAI T B, et al. Effect of Cd toxicity on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of wheat seedling [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5): 88-91. (in Chinese)
- [21] 刘劲松, 石辉, 李秧秧. 镉胁迫对黄瓜幼苗光合和叶绿素荧光特性的影响 [J]. 水土保持研究, 2011(5): 187-190, 196.
- LIU J S, SHI H, LI Y Y. Effects of Cd^{2+} stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of cucumber seedlings [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011(5): 187-190, 196. (in Chinese)
- [22] MALO D D, SCHUMACHER T E, DOOLITTLE J J. Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern great plains [J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81: 277-291.
- [23] 赵晶. 不同氮磷钾肥对土壤镉有效性和小麦吸收镉的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.