

施氮对镉胁迫下山杨幼苗叶片氮磷钾吸收及镉积累量的影响

邓小红, 姬拉拉, 王健健*

(贵州大学, 生命科学学院/农业生物工程研究院, 山地植物资源保护与保护种质创新教育部重点实验室, 山地生态与农业生物工程协同创新中心, 贵阳 550025)

摘要: 为探究山杨在重金属镉胁迫与增施外源氮复合处理条件下的生长及元素积累差异, 该研究以山杨幼苗为材料, 通过盆栽实验研究在重金属镉(Cd)胁迫下增施外源氮(N)对其形态、叶绿素、淀粉和可溶性糖含量、叶片中全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)以及 Cd 含量的影响。结果表明: (1) 单独 Cd 处理显著抑制山杨幼苗的叶片宽度和茎粗; 施加外源 N 能够缓解 Cd 胁迫对植株的毒害, 其叶长、叶宽和茎粗较单独 Cd 处理显著增加。(2) 单独 Cd 处理后山杨叶片的叶绿素含量和淀粉含量均比对照显著下降, 而其可溶性糖含量显著增加; 与单独 Cd 处理相比, Cd+N 复合处理后山杨的叶绿素含量显著增加, 淀粉含量却显著下降, 而可溶性糖含量略有降低。(3) 与对照相比, 单独 Cd 处理后, 山杨叶片全 N 含量显著下降, 全 P 含量显著增加; 单独 N 和 Cd+N 复合处理后叶片全 N 含量均显著增加, 全 P 含量均显著下降; 全 K 含量在各处理下均无显著差异。(4) 在 Cd 胁迫下山杨幼苗叶片的 Cd 含量比对照极显著增加, 且 Cd+N 复合处理后叶片的 Cd 含量约是单独 Cd 处理的 2 倍。研究认为, 增施氮素处理可显著提高山杨幼苗对镉胁迫环境的适应能力以及叶片对镉的富集能力。

关键词: 镉胁迫; 氮素; 山杨; 幼苗生长; 镉积累

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Nitrogen Supplement on N, P, K Uptake and Cd Accumulation in Leaves of *Populus davidiana* under Cadmium Stress

DENG Xiaohong, JI Lala, WANG Jianjian*

(College of Life Sciences/Institute of Agro-bioengineering, Guizhou University, Key laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region [Ministry of Education], Collaborative Innovation Center for Mountain Ecology & Agro-Bioengineering [CICMEAB], Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the difference of growth and element accumulation of *Populus davidiana* seedlings under the combined of compound treatment of cadmium (Cd) and exogenous nitrogen (N), we studied the effects of N on morphology, chlorophyll, starch and soluble sugar contents, total nitrogen (N), total phosphorus (P), total potassium (K) and Cd content in leaves under Cd stress by pot experiment. The results showed that: (1) the leaf width and stem diameter of *P. davidiana* were significantly inhibited by Cd alone. The toxicity of Cd to plants was compensated by exogenous N under Cd stress, and the leaf length, leaf width and stem diameter were significantly increased compared with Cd treatment

收稿日期: 2020-06-09; 修改稿收到日期: 2020-10-26

基金项目: 贵州省科技厅自然科学基金[2016(1033)]; 国家自然科学基金(31760155); 贵州省生物学一流学科建设(GNYL[2017]009)

作者简介: 邓小红(1995-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为植物生理生态。E-mail: 2509077578@qq.com

* 通信作者: 王健健, 副教授, 主要从事植物生理生态研究工作。E-mail: wangjj33209@163.com

alone. (2) Compared with the control, the chlorophyll content and starch content of *P. davidiana* leaves decreased significantly after Cd treatment, while the soluble sugar content increased significantly. Compared with Cd+N treatment, the chlorophyll content increased significantly, the starch content decreased significantly, and the soluble sugar content decreased slightly. (3) Compared with the control, the total N content and total P content of *P. davidiana* leaves decreased significantly after Cd treatment. The total N content increased significantly and the total P content decreased significantly after N treatment and Cd+N combination treatment. However, there was no significant difference in total K content among all treatments. (4) Under Cd stress, the Cd content in leaves of *P. davidiana* seedlings was significantly increased compared with the control, and the Cd content in leaves of Cd+N composite treatment was about twice as much as that of single Cd treatment. The results showed that the adaptability of *P. davidiana* seedlings and Cd accumulation ability of leaves could be improved by increasing N application under Cd stress.

Key words: cadmium stress; nitrogen; *Populus davidiana*; seedling growth; cadmium accumulation

杨树是杨柳科(Salicaceae Mirb)杨属(*Populus* L.)植物的总称,它具有适应性强、生长迅速、易繁殖等特点,在重金属污染治理、城市绿化、防护林等方面发挥着良好的生态、社会和经济效益。随着土壤和水体重金属污染日益严重,许多研究者提出将杨树作为重金属富集修复的主要树种^[1]。目前关于杨属类植物的研究主要集中在青杨、滇杨、黑杨等对土壤镉(Cd)、铅(Pb)等重金属元素富集方面^[2-3],而关于山杨对重金属的富集效应还鲜有报道。中国山杨(*Populus davidiana* Dode)是杨属常见落叶乔木,在贵州贵阳及铜仁地区分布较多,且材质优良,在当地园林绿化、退耕还林和生态保护中发挥着重要作用^[4-5]。

镉(Cd)是一种植物非必需元素,可长期滞留在土壤中,且具难降解性和高积累性^[6-7]。目前,采用植物富集土壤中重金属 Cd,降低土壤中 Cd 含量的生物修复技术被认为是最环保最具经济效益的修复方式。但现有研究发现在高污染区植被生长受到 Cd 胁迫的抑制,表现为叶绿素含量和叶绿体数量下降^[8],光合作用减弱,碳同化作用降低^[9],且对氮(N)、磷(P)、钾(K)等营养元素吸收受到抑制^[10]等,使植物生长受到影响^[11-12],修复效率受到限制。

N 是植物生长必需的营养元素,植物 N 代谢在重金属反应中起着重要作用,通过调控 N 素,合理利用 N 素与重金属之间的交互作用可以防治或缓解重金属的毒害^[13],提高植物对重金属的富集能力^[14]。研究发现,增施氮处理可提高 Cd 胁迫下杨树的叶绿素含量,缓解 Cd 对植物的毒害^[15];施氮对 Cd 胁迫下海雀稗^[16]、白三叶草^[17]、南方四季杨^[18]植株的生长、生物量以及叶绿素和可溶性糖含量均有促进作用,并缓解 Cd 对其生物量积累的抑制程

度。因此,在应用植物进行土壤重金属污染修复时合理施用氮肥将有利于提高植物修复效率^[19]。

近年来,人们越来越关注氮素与植物受重金属胁迫后的敏感性关系,为此,本研究以山杨为研究对象,考察氮对镉胁迫下山杨的生长、叶绿素含量、渗透调节物质、叶片 N、P、K 以及 Cd 含量的影响,并与单独镉胁迫时山杨植株对镉积累能力和对逆境胁迫的适应能力进行比较,为进一步探究植物对重金属污染环境修复和适应机制提供参考,也为林业生产实践提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

本研究以山杨(*Populus davidiana* Dode)为试验材料,于 2019 年 3 月在贵州省林业科学院林场(26°30'N,106°44'E,海拔 1 205 m)^[4]采集一年生健康枝条,扦插于贵州省花溪区贵州大学试验基地(26°25'N,106°40'E,海拔 1 125 m),该地属亚热带湿润季风气候,具有冬无严寒、夏无酷暑、气候温和、昼夜温差小等特征,年降雨量 1 000~1 500 mm^[20-21],年均气温 15.3 °C^[21]。

1.2 试验设计

选取长短、粗细一致的山杨枝条,分别扦插于土质相同的培养土中,待枝条萌发新芽后,选择长势基本一致的植株扦插苗各 24 株,移栽至盛有 200 g 培养基质(蛭石和石英砂均匀混合)的圆形塑料花盆中(内径×高为 25.5 cm×20 cm),每盆 1 株,每 7 d 加 1 次 Hoagland 全营养液 500 mL,使其继续生长,3 个月后将开始增施 N 及 Cd 胁迫处理试验。试验参照董姬妃等^[17]的氮素(N)和镉胁迫(Cd)双因素完全随机设计,每个因素各设 2 水平,共组成对照(CK)、

N(10 g/盆)、Cd(0.4 g/盆)、Cd+N(0.4 g + 10 g/盆)4个处理,每个处理6次重复。其中,CK为不施用Cd和N;N和Cd+N处理以尿素[CO(NH₂)₂]为外源N,每次1 g,每10 d施用1次,整个试验过程总添加10次;Cd和Cd+N处理中每盆加0.4 g CdCl₂·5H₂O,分2次施入,分别于第1次和第6次施N时一起加入^[22]。为防止溶液渗漏,每个塑料盆下均放有托盘,每次浇水后将渗到托盘中的溶液重新倒回处理盆中。2019年10月中旬测定山杨的形态指标以及叶片叶绿素、淀粉和可溶性糖含量,之后选其成熟叶于90℃下烘干至恒重,研磨过50目尼龙筛,分别取其粉末各0.2 g,用于测定叶片Cd含量。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标 用皮尺测量山杨的叶长和叶宽,用数字游标卡尺测量其茎粗。

1.3.2 叶片叶绿素含量 使用SPAD-502测量山杨叶片中总叶绿素含量。测定时间为天气晴朗的上午(10:00~12:00),选择从叶顶向下第8片完全展开叶测定。

1.3.3 叶片淀粉和可溶性糖含量 叶片淀粉含量测定参照梁丽松等^[23]的方法。取山杨叶片样品0.1 g研磨成匀浆后,加1 mL乙醇,再加35 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaOH,沸水加热搅拌20 min,冷却后离心20 min(4 000 r/s),取上清液1 mL,稀释1 000倍;取稀释液2 mL,加入5 mL 硫酸-萘酚溶液,加热10 min显色后冷却,用分光光度计测其吸光值计算淀粉含量。叶片可溶性糖含量测定采用萘酚比色法^[16]。称取0.1 g山杨叶片于研钵中,加入1 mL蒸馏水,研磨成匀浆后转入20 mL试管中,用10 mL蒸馏水分次润洗研钵,润洗液转入试管中。然后置于100℃水浴锅中加盖煮沸10 min,冷却后过滤,滤液收集于100 mL容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度,摇匀备

用。用移液管吸收1 mL于20 mL加塞试管中,加1 mL蒸馏水和0.5 mL萘酚试剂。再缓慢加入5 mL浓H₂SO₄,盖上试管塞后,轻轻摇匀,再放入水浴锅中水浴10 min。冷却至室温后,在波长620 nm下比色,记录吸光值并计算可溶性糖含量。

1.3.4 叶片N、P、K含量 将样品于90℃烘箱中烘干至恒重后研磨过50目尼龙筛,取其粉末各0.2 g,用H₂SO₄-H₂O₂消煮备用,测定山杨叶片中全N、全P、全K含量,全N含量测定采用凯氏定氮法全,全P含量测定采用钼锑抗比色法,全K含量测定采用火焰分光光度法^[24]。

1.3.5 叶片镉含量 称取烘干磨细过50目尼龙筛的植物叶样品0.2 g于三角瓶中,加HNO₃-HClO₄(体积比为4:1)混合液20 mL,盖上漏斗,在电热板上加热0.5~1 h,直到瓶内有大量白烟,继续加热,使白烟慢慢消失,溶液呈无色透明状时停止加热。冷却后用蒸馏水洗入25 mL容量瓶,定容。用AAS原子吸收分光光度计(GGX-830)测定植物Cd含量^[25]。

1.4 数据分析

使用SPSS 22.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析对各处理的平均值进行多重比较($P < 0.05$),采用双因素方差分析比较Cd和N的交互作用。用Excel 2010软件绘图,图表数据均为平均数±标准差。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下施氮对山杨幼苗形态指标的影响

植物的形态指标是衡量植物生长的重要指标。由表1可知,在单独施N[CO(NH₂)₂]处理时,山杨的叶长和叶片数比对照(CK)显著增加,其增幅分别达到了40.76%和31.25%,而山杨的茎粗和叶宽仅比CK略有增加;在单独Cd胁迫(CdCl₂)处理下,

表1 镉胁迫下施氮对山杨幼苗形态指标的影响

Table 1 Effects of N supplement on morphological indexes of *Populus davidiana* seedlings under Cd stress

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶片数 Leaf number
CK	7.13±0.25a	6.77±0.63c	5.23±0.25a	28.00±1.26b
N	7.41±0.27a	9.53±0.13a	6.00±0.34a	36.75±7.00a
Cd	5.93±0.34b	5.85±0.11c	4.45±0.09b	27.50±4.96b
Cd+N	7.21±0.12a	8.17±0.41b	5.67±0.28a	28.25±4.99b

注:CK、N、Cd、Cd+N分别表示无镉对照、外源N[CO(NH₂)₂]处理(10 g/盆)、Cd胁迫处理(CdCl₂·5H₂O 0.4 g/盆)和氮镉复合处理(0.4 g Cd+10 g N/盆),下同;表中同列不同字母表示处理间在0.05水平差异显著

Note: CK, N, Cd and Cd+N represent control (without addition N and Cd), addition N treatment [CO(NH₂)₂] (10 g/pot), Cd stress treatment (CdCl₂·5H₂O 0.4 g/pot) and addition with Cd and N treatment (0.4 g Cd+10 g N/pot). The same as below. Different letters within the same column meant significant difference at 0.05 level among treatments

山杨的茎粗和叶宽均被显著抑制,它们较对照分别显著下降 16.76% 和 14.97%,而其叶长和叶片数比 CK 略有降低;在氮镉复合处理(Cd+N)下,山杨各形态指标均比 CK 和 Cd 处理不同程度增加,其茎粗、叶长和叶宽与单独 Cd 胁迫处理差异显著,其茎粗、叶片数和叶宽与 CK 均无显著差异,而叶长与 CK 差异显著。由此可见在镉胁迫环境下山杨生长缓慢,植株瘦小,叶片短小,叶片数基本保持稳定,而增施外源氮素可以解除镉胁迫对山杨生长的不利影响,恢复至正常生长水平。

2.2 镉胁迫下施氮对山杨叶片叶绿素含量的影响

图 1 显示,山杨叶片叶绿素含量在单独施 N 处理时较对照显著增加 12.15% ($P < 0.05$),在单独施 Cd 处理时较对照显著下降 19.99%,在 Cd+N 复合处理时与对照无显著差异,但其叶绿素含量显著高于单独 Cd 处理,较单独 Cd 处理增加 25.09%。可见,镉胁迫显著降低了山杨叶片中叶绿素含量,增施氮处理能促进叶绿素的合成,显著增加镉胁迫下叶片叶绿素含量,有效缓解镉胁迫对植物的毒害。

2.3 镉胁迫下施氮对山杨叶片淀粉和可溶性糖含量的影响

由图 2 可知,山杨幼苗叶片的淀粉含量在单独施 N 处理时较对照略有增加,在单独 Cd 处理和 Cd+N 复合处理后较对照分别显著下降 18.11% 和 45.23%,且 Cd+N 复合处理较单独 Cd 处理显著降低 27.12%;同时,山杨幼苗叶片的可溶性糖含量在单独施 N 时较对照显著下降 13.26%,在单独 Cd 处理和 Cd+N 复合处理后较对照分别显著增加了 20.39% 和 11.56%,但 Cd 胁迫处理与 Cd+N 复合处理间差异不显著。可见,山杨幼苗受 Cd 胁迫后,其体内的淀粉分解为可溶性糖,使植株可溶性糖含量增加,渗透调节能力增强,耐镉胁迫能力显著提高。

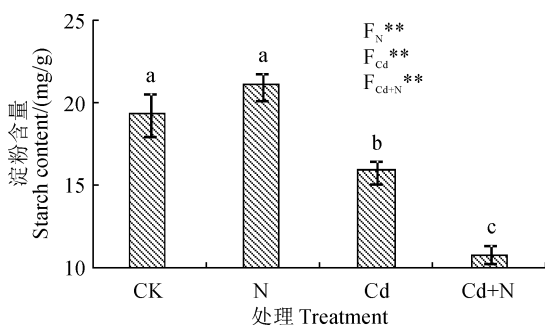


图 2 镉胁迫下施氮对山杨叶片淀粉和可溶性糖含量的影响

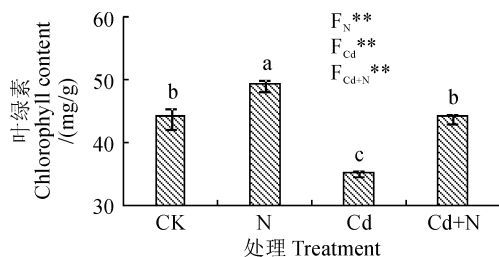
Fig. 2 The starch and soluble sugar contents in leaves of *P. davidiana* under Cd and N addition treatment

2.4 镉胁迫下增施氮对山杨叶片全 N、全 P、全 K 含量的影响

表 2 显示,不同处理对山杨叶片 K 含量无显著影响 ($P > 0.05$),对 N 和 P 含量影响显著 ($P < 0.05$)。与对照相比,山杨叶片 N 含量在单独 Cd 处理后显著下降 29.52%,在增施 N 处理及 Cd+N 复合处理后分别显著增加 77.77% 和 37.43%;山杨叶片 P 含量在单独 Cd 处理后比对照显著增加 9.62%,增施 N 处理及 Cd+N 复合处理后较对照分别显著下降 35.09% 和 13.96%。与单独 Cd 处理相比,Cd+N 复合处理使山杨叶片 N 含量显著增加 94.98%,叶片 P 含量显著下降 21.51%。说明镉胁迫显著增加山杨叶片 P 含量,显著减少 N 含量,增施 N 能显著缓解镉胁迫下叶片 N 含量降低和 P 含量升高趋势。

2.5 镉胁迫下增施氮对山杨叶片镉含量的影响

从图 3 来看,山杨幼苗叶片的 Cd 含量在单独 Cd 处理和 Cd+N 复合处理后均较对照分别极显著



F_N 、 F_{Cd} 、 F_{Cd+N} 分别表示氮效应、镉效应和氮镉互作效应;

* 和 ** 分别表示不同处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著;下同

图 1 镉胁迫下施氮对山杨叶片叶绿素含量的影响

F_N , F_{Cd} and F_{Cd+N} represent N effect, Cd effect and their interaction

effects, respectively; * and ** indicated that there were

significant difference ($P < 0.05$) and extremely significant difference

($P < 0.01$) between different treatments; The same as below

Fig. 1 Effects of N supplement on chlorophyll content

of *P. davidiana* leaves under Cd stress

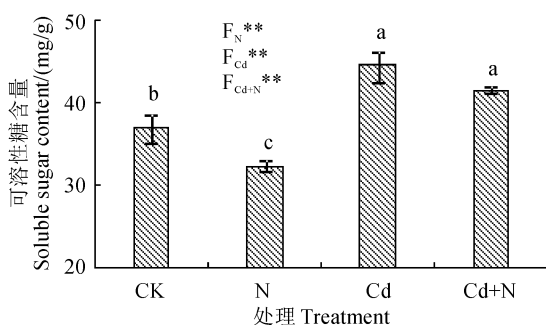


表 2 镉胁迫下增施氮对山杨叶片全 N、全 P、全 K 含量的影响

Table 2 The N, P and K contents in leaves of *P. davidiana* seedlings under Cd and N addition treatment

处理 Treatment	全 N 含量 Total N content/(g/kg)	全 P 含量 Total P content/(g/kg)	全 K 含量 Total K content/(g/kg)
CK	19.21±1.57c	5.30±0.15b	10.99±0.91a
N	34.15±0.86a	3.44±0.29d	9.86±0.81a
Cd	13.54±0.95d	5.81±0.18a	10.52±0.16a
Cd+N	26.40±1.48b	4.56±0.11c	9.80±0.92a

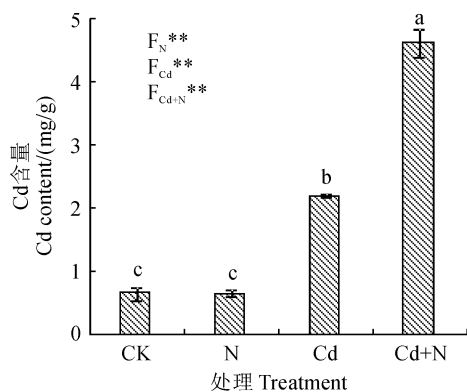


图 3 镉胁迫下增施氮对山杨叶片镉含量的影响

Fig. 3 Effects of N supplement on Cd content in *P. davidiana* leaves under Cd stress

增加 236.18% 和 615.84%，且 Cd+N 复合处理后叶片 Cd 含量比单独 Cd 处理极显著增加 112.93%。可见，在 Cd 胁迫条件下增施 N 处理能显著促进山杨幼苗对镉的吸收与积累。

3 讨论

3.1 镉胁迫下山杨幼苗形态和叶绿素含量对施氮的响应

植物个体形态特征的变化是植物自身对环境变化最直观的反应，也是植物对环境变化所产生应答机制的外部表现，可以在一定程度上反映环境变化对植物生长发育的影响效应。已有研究表明植物受到镉胁迫后，常表现出生长缓慢、植株矮小、叶片失绿等症状，而叶绿素是植物进行光合作用的主要色素，镉胁迫会破坏植物叶片的叶绿体结构，致使叶绿素含量降低，从而抑制植株生长发育^[26-27]。本研究中，Cd 胁迫使山杨幼苗叶片的叶绿素含量显著下降，且其茎粗和叶宽也明显降低，可能是因为在镉胁迫环境下山杨叶片的叶绿体结构遭到破坏，叶绿体膜被氧化甚至消失，使得叶绿素含量下降^[15]。在 Cd+N 复合处理后，山杨叶片的叶绿素含量相对单独 Cd 处理时显著增加，与对照无显著差异，同时山杨的茎粗、叶长、叶宽较单独镉处理时均增加，这与

翟晶^[25]、张帆^[22]的研究结果一致。说明植物在有效氮含量充足条件下，镉胁迫环境对植物的毒害减弱，叶绿体结构的完整性得到保护，叶绿素合成途径畅通，使得植株的生长得以正常进行^[15]，同时也表明在镉胁迫环境下 N 元素是植物生长的限制因子，为维持植株正常生长，增施氮后植株的叶绿素合成受到诱导，叶绿素含量增加^[18]。

3.2 镉胁迫下山杨幼苗叶片淀粉和可溶性糖含量对施氮的响应

植物受到胁迫时会主动积累渗透调节物质，以降低细胞水势和维持正常膨压，来增强植株的抵御能力，可溶性糖是重要的渗透调节物质，其含量增加有利于增强植株自身的调节能力和对逆境环境的适应能力^[28]。段瑞军等^[16]研究表明，当镉浓度在 1~100 mg/kg 范围时，海雀稗 (*Paspalum vaginatum*) 叶片中可溶性糖含量随镉浓度增加而显著增加，使其对镉胁迫环境的适应能力增强。陈厚蓉等^[29]研究发现，在不同镉浓度处理下，马络葵 (*Malope trifida*) 叶片中可溶性糖含量均显著高于对照。本试验中，山杨幼苗植株叶片的淀粉含量在 Cd 胁迫及 Cd+N 处理下均显著下降，而相应可溶性糖含量均显著增加，这可能是因为镉胁迫环境下，淀粉水解为可溶性糖，可溶性糖作为渗透调节物质，维持细胞膨压，其含量增加可提升自身对逆境的抵御能力，这也是植物内部的一种解毒机制。

3.3 镉胁迫下山杨幼苗叶片 N、P、K 含量对施氮的响应

在自然环境中，N、P、K 是限制植物生长发育的重要营养元素^[30]，植物叶片养分含量在一定程度上反映了特定环境下的养分状况^[31]，环境改变对植物叶片养分含量将产生直接影响。已有研究表明，镉胁迫环境明显抑制了白车轴草 (*Trifolium repens* L.) 植株的 N、P、K 含量，降低植株对 N、P、K 营养元素的利用效率^[9]；桂花 (*Osmanthus fragrans*) 各器官 C、N、P 含量均随镉处理浓度增加而显著降低^[28]。在本研究中，单独 Cd 处理显著降低山杨幼

苗叶片 N 含量,显著增加 P 含量,单独施 N 以及 Cd+N 复合处理则显著增加山杨叶片 N 含量,显著降低 P 含量,而 K 含量在各处理下均差异不显著。山杨叶片 N 含量显著下降可能是因为镉胁迫限制了土壤养分的有效性和可利用性^[32],抑制植物对养分的吸收和同化,进而影响植株的生长和生理代谢过程^[28]。而 P 元素含量与 N 表现相反,这可能是由于镉胁迫使山杨植株叶片提前凋落,导致 N 元素大量流失,而 P 元素通过衰老叶片的内转移机制而得以维持,因而表现出镉胁迫后山杨叶片仍有较高的 P 含量^[33]。为适应环境需要,植物常常有效利用有限资源以维持相对稳定的生长^[34],K 元素因能在植物体内快速转移以保持自身的正常生长,因此山杨叶片中 K 含量在镉胁迫条件下仍能保持较高水平^[35]。

3.4 镉胁迫下山杨幼苗叶片 Cd 含量对施氮的响应

大量研究发现,镉胁迫下增施氮素可提高植物对镉的吸收与积累^[19],如谭长强等^[36]研究施氮对镉胁迫下杂交相思树(*Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis*)生长及镉吸收分配的影响发现,Cd 胁迫下施氮处理显著促进了杂交相思树对镉的吸收和积累,提高了 Cd 的转移系数,董姬妃等^[17]在白三叶草中得到一致的结果。在本研究中,山杨幼苗叶片对镉的积累在不同处理下差异显著。其中,山杨

植株叶片中镉含量在单独 Cd 胁迫下比对照显著增加,Cd+N 复合处理又显著高于单独 Cd 处理,表明施氮处理促进山杨对 Cd 的吸收与积累,同时也说明单独 Cd 处理对植株生长的毒害远高于 Cd+N 复合处理。这可能是因为在氮营养元素不足环境下,Cd 进入植株叶肉细胞后,造成叶肉细胞中叶绿体、线粒体和细胞核等结构损伤,抑制了植株的生长发育^[37],使其生长受到影响^[38];而 Cd 胁迫下增施 N 处理使山杨体内产生了解毒机制,在 N 含量充足环境下,Cd 胁迫处理植株体内能合成更多的叶绿素、可溶性糖、逆境蛋白和脯氨酸等来增强自身对镉的抗性^[39],使植株茎粗、叶长和叶宽较单独镉处理时增加,从而对镉胁迫的耐受性增强。

综上所述,在重金属 Cd 胁迫环境下,山杨幼苗叶片叶绿素含量显著减少,全 N 含量显著下降,生长受到抑制;而在 Cd 胁迫下增施外源 N 的复合处理时,叶片叶绿素含量较单独 Cd 处理时显著增加,全 N 含量显著提高,渗透调节能力增强,胁迫抑制得到缓解,山杨植株能够正常生长;而且在 Cd+N 复合处理下,山杨幼苗对镉的吸收和积累能力显著增强,耐受能力提高。由此表明,N 元素对 Cd 胁迫山杨植株生长起到重要的缓解作用,增施氮肥可降低镉胁迫对植株的毒害,促进植株的生长,增加山杨对镉的积累量,从而促进镉污染生态环境的恢复。

参考文献:

[1] 文秋红,史 甌. 部分植物富集镉能力探讨[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(12): 90-92.
WEN Q H, SHI K. Enrichment capability of cadmium in some plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **29**(12): 90-92.

[2] CHEN L, HAN Y, JIANG H, *et al.* Nitrogen nutrient status induces sexual differences in responses to cadmium in *Populus yunnanensis* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **62** (14): 5 037-5 050.

[3] 魏 童,胡希智,王 盈,等. 镉处理下不同青杨种群的生长、光合生理和镉吸收差异[J]. 四川农业大学学报, 2018, **36** (1): 52-59.
WEI T, HU X Z, WANG Y, *et al.* Growth, photosynthetic physiology and cadmium enrichment of *Populus cathayana* of four populations and their responses to cadmium stresses[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, **36**(1): 52-59.

[4] 杜淑辉,王兆山,胡晓艳,等. 中国山杨遗传多样性及遗传结构分析[J]. 植物科学学报, 2018, **36**(2): 245-251.

DU S H, WANG Z S, HU X Y, *et al.* Nucleotide polymorphism and genetic structure of *Populus davidiana* Dode [J]. *Plant Science Journal*, 2018, **36**(2): 245-251.

[5] 张昭林,赵西平,苗明月,等. 山杨树枝和树根气干密度及纤维形态的研究[J]. 辽宁林业科技, 2018, (5): 5-8.
ZHANG Z L, ZHAO X P, MIAO M Y, *et al.* Research on wood air-dry density and fiber morphology of branches and roots of *Populus davidiana* [J]. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 2018, (5): 5-8.

[6] MCLAUGHLIN M J, PARKER D R, CLARKE J M. Metals and micronutrients-food safety issues [J]. *Field Crops Research*, 1999, **60**(1/2): 143-163.

[7] 李 贺,连海峰,刘世琦,等. 镉胁迫对大蒜苗生理特性的影响及施钙的缓解效应[J]. 应用生态学报, 2015, **26** (4): 1 193-1 198.
LI H, LIAN H F, LIU S Q, *et al.* Effect of cadmium stress on physiological characteristics of garlic seedlings and the alleviation effects of exogenous calcium [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(4): 1 193-1 198.

[8] 万雪琴,张 帆,夏新莉,等. 镉处理对杨树光合作用及叶绿

- 素荧光参数的影响[J]. 林业科学, 2008, **44**(6): 73-78.
- WAN X Q, ZHANG F, XIA X L, *et al.* Effects of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of solution-cultured poplar plants[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(6): 73-78.
- [9] YING R R, QIU R L, TANG Y T, *et al.* Cadmium tolerance of carbon assimilation enzymes and chloroplast in Zn/Cd hyperaccumulator *Picris divaricata* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, **167**(2), 167: 81-87.
- [10] 刘栎良, 杨容才, 马明东, 等. 镉胁迫对白车轴草生长、镉含量及养分分配的影响[J]. 核农学报, 2015, **29**(3): 595-604. LIU S L, YANG R J, MA M D, *et al.* Effects of cadmium stress on growth, cadmium content and nutrient distribution in *Trifolium repens* L. plants[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, **29**(3): 595-604.
- [11] GOGORCENA Y, LARBI A, ANDALUZ S, *et al.* Effects of cadmium on cork oak (*Quercus suber* L.) plants grown in hydroponics[J]. *Tree Physiology*, 2011, **31**(12): 1 401-1 412.
- [12] PERFUS-BARBEOCH L, LEONHARDT N, VAVASSEUR A, *et al.* Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status[J]. *The Plant Journal*, 2002, **32**(4): 539-548.
- [13] 祖艳群, 李元, L. BOCK, 等. 重金属与植物 N 素营养之间的交互作用及其生态学效应[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 7-14. ZU Y Q, LI Y, BOCK L, *et al.* Interactions between heavy metals and nitrogen and their ecological effects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(1): 7-14.
- [14] KOPYRA M, GWÓZDŹ A. Nitric oxide stimulates seed germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, **41**(11/12): 1 011-1 017.
- [15] 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, WANG 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.
- [16] 段瑞军, 吴朝波, 王蕾, 等. 镉胁迫对海雀稗脯氨酸、可溶性糖和叶绿素含量及氮、磷、钾吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, **32**(2): 357-361. DUAN R J, WU C B, WANG L, *et al.* Contents of proline, soluble sugar, and chlorophyll and accumulations of nitrogen, phosphorus and potassium in *Paspalum vaginatum* Sw. in response to Cd stress[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, **32**(2): 357-336.
- [17] 董姬妃, 张帆, 胡雨寒, 等. 镉胁迫下增施氮对白三叶草生长的影响和镉毒害的缓解效应研究[J]. 草业学报, 2017, **26**(9): 83-91. DONG J F, ZHANG F, HU Y H, *et al.* Effect of nitrogen supplementation on growth of white clover under cadmium stress and alleviation of cadmium toxicity[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, **26**(9): 83-91.
- [18] 古洪双, 赵子豪, 楼锦锋, 等. 氮沉降对镉胁迫下南方四季杨生物量积累和光合生理的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, **47**(1): 6-9, 19. GU H S, ZHAO Z H, LOU J F, *et al.* Effects of nitrogen deposition on biomass accumulation and photosynthetic physiology in *Populus deltoides* × *P. nigra* under cadmium stress[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, **47**(1): 6-9, 19.
- [19] 张圆圆, 窦春英, 姚芳, 等. 氮素营养对重金属超积累植物东南景天吸收积累镉和铜的影响[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(6): 831-838. ZHANG Y Y, DOU C Y, YAO F, *et al.* Nitrogen application to enhance zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, **27**(6): 831-838.
- [20] 张博华, 刘威, 赵致, 等. 贵州仿野生栽培红天麻的生活史及物候期研究[J]. 中国中药杂志, 2014, **39**(22): 4 311-4 316. ZHANG B H, LIU W, ZHAO Z, *et al.* Research on life history and phenological period of wild-stimulated cultivated *Gastrodia elata* f. *elata* in Guizhou[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, **39**(22): 4 311-4 316.
- [21] 余祝媛, 贺中华, 梁虹, 等. 贵州省近 55 年降水量时空变化分析[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(6): 208-215. YU Z Y, HE Z H, LIANG H, *et al.* Spatial and temporal distribution variation analysis of precipitation in Guizhou Province in recent 55 years[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, **47**(6): 208-215.
- [22] 张帆, 万雪琴, 翟晶. 镉处理下增施氮对杨树叶绿素合成和叶绿体超微结构的影响[J]. 核农学报, 2014, **28**(3): 485-491. ZHANG F, WAN X Q, ZHAI J. Effects of nitrogen supplement on chlorophyll synthesis and chloroplast ultrastructure of poplar plants under cadmium stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, **28**(3): 485-491.
- [23] 梁丽松, 徐娟, 王贵禧, 等. 板栗淀粉糊化特性与淀粉颗粒粒径及直链淀粉含量的关系[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(1): 251-260. LIANG L S, XU J, WANG G X, *et al.* Relationship between starch pasting, amylose content and starch granule size in different Chinese chestnut variety groups[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42**(1): 251-260.
- [24] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. 自然科学进展, 2006, **16**(8): 965-973. ZHENG S X, SHANGGUAN Z P. Spatial distribution pattern of nutrient composition of plant leaves in Loess Plateau [J]. *Advances in Natural Science*, 2006, **16**(8): 965-973.

- [25] 翟 晶. 镉胁迫下增施氮对杨树生长和叶绿素合成的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2013.
- [26] 贾 莲, 刘周莉, 陈 玮, 等. 镉对金银花的毒物刺激效应[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 935-940.
JIA L, LIU Z L, CHEN W, *et al.* Hormesis effect of cadmium on *Lonicera japonica* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(4): 935-940.
- [27] JAKOVLJEVIĆ T, BUBALO M C, ORLOVIĆ S, *et al.* Adaptive response of poplar (*Populus nigra* L.) after prolonged Cd exposure period[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(5): 3 792-3 802.
- [28] 吴福忠, 杨万勤, 张 健, 等. 镉胁迫对桂花生长和养分积累、分配与利用的影响[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(10): 1 220-1 226.
WU F Z, YANG W Q, ZHANG J, *et al.* Effects of cadmium stress on growth and nutrient accumulation, distribution and utilization in *Osmanthus fragrans* var. *thunbergii* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(10): 1 220-1 226.
- [29] 陈厚蓉, 王春玲, 冯静静, 等. 马络葵对镉的吸收累积特征及对镉胁迫的生理响应[J]. 安徽农业科学, 2017, **45**(6): 5-7.
CHEN H R, WANG C L, FENG J J, *et al.* Accumulation features of *Malope trifida* to cadmium and the physiological response to cadmium stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, **45**(6): 5-7.
- [30] 李 娟, 周健民, 段增强, 等. CO₂ 与养分交互作用对番茄幼苗叶片碳、氮积累及碳、氮比动态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(3): 374-381.
LI J, ZHOU J M, DUAN Z Q, *et al.* The interactive effects of carbon dioxide enrichment and fertilizers on the dynamic changes of growth and C and N accumulation and C/N ratio in tomato seedling leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, **12**(3): 374-381.
- [31] 阎恩荣, 王希华, 郭 明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C : N : P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 48-57.
YAN E R, WANG X H, GUO M, *et al.* C : N : P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, Eastern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 48-57.
- [32] 冯 丽, 张景光, 张志山, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被中油蒿的生长及生物量分配动态[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(6): 1 132-1 139.
FENG L, ZHANG J G, ZHANG Z S, *et al.* Growth and biomass allocation dynamics of *Artemisia ordosica* in sand-fixing vegetation of the tengger desert of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(6): 1 132-1 139.
- [33] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1 441-1 450.
- [34] 吴福忠, 王开运, 杨万勤, 等. 密度对缺苞箭竹凋落物生物元素动态及其潜在转移能力的影响[J]. 植物生态学报, 2005, **29**(4): 537-542.
WU F Z, WANG K Y, YANG W Q, *et al.* Effects of *Fargesia denudata* density on seasonal changes in litter nutrient concentrations and their potential retranslocation[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, **29**(4): 537-542.
- [35] 庄明浩, 李迎春, 郭子武, 等. CO₂ 浓度升高对毛竹和四季竹叶片主要养分化学计量特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(1): 239-245.
ZHUANG M H, LI Y C, GUO Z W, *et al.* Effects of elevated CO₂ on the leaf nutrient stoichiometrical characteristics in *Phyllostachys edulis* and *Oligostachyum lubricum* [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, **19**(1): 239-245.
- [36] 谭长强, 何琴飞, 秦玉燕, 等. 施氮对镉胁迫下杂交相思树生长及镉吸收分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(5): 1 326-1 334.
TAN C Q, HE Q F, QIN Y Y, *et al.* Effect of nitrogen application on seedling growth and cadmium uptake and distribution in *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis* under cadmium stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, **23**(5): 1 326-1 334.
- [37] HE S Y, YANG X E, HE Z L, *et al.* Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: a review[J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(3): 421-438.
- [38] 施 宠, 王纯利, 黄长福, 等. 镉胁迫对野燕麦幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 草地学报, 2015, **23**(3): 526-532.
SHI C, WANG C L, HUANG C F, *et al.* Effects of Cd stress on the growth and physiological characteristics of *Avena fatua* seedlings[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, **23**(3): 526-532.
- [39] LI G H, WAN Y S, LIU F Z, *et al.* Photosynthetic characteristics in different peanut cultivars under conditions of drought and re-watering at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(7): 729-739.

(编辑:裴阿卫)