

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期

Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文煊, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响

李品¹, 周慧敏², 冯兆忠³

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 快速城市化和工业化进程, 导致植物生长季常暴露于高浓度地表臭氧(O₃)、干旱和氮(N)沉降的环境中. 为探究植物非结构性碳水化合物(NSC)及其组分(可溶性糖和淀粉)对多重环境因子胁迫的响应格局, 本实验设置2个O₃处理(对照, 以过滤空气计; 增加O₃, 未过滤空气+40 nmol·mol⁻¹ O₃)、2个水分处理(充分灌溉; 干旱, 60%灌溉)和2个N添加处理[不加氮; 加氮, 50 kg·(hm²·a)⁻¹尿素], 研究三因子交互作用对杨树叶片和细根NSC及其组分的影响. 结果表明, O₃胁迫显著增加杨树叶片可溶性糖和细根淀粉含量, 降低叶片淀粉和总NSC含量. 干旱胁迫显著降低叶片淀粉和总NSC含量, 增加细根可溶性糖和总NSC含量. 氮添加对叶和细根NSC及其组分无显著影响. 叶片和细根NSC及其组分与光合速率、生物量存在显著正相关关系. 随着胁迫因子数量的增加, 叶片NSC呈现下降趋势, 而细根NSC呈现上升趋势. 本研究发现环境胁迫可促使植物叶片中的淀粉转化为可溶性糖, 并将叶片中的NSC转移到根部储藏, 这可能是植物抵御胁迫环境的一种应对策略.

关键词: 臭氧; 氮沉降; 干旱; 非结构性碳水化合物; 细根; 杨树

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-1004-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007213

Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar

LI Pin¹, ZHOU Hui-min², FENG Zhao-zhong³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Ground-level ozone (O₃) pollution frequently co-occurs with drought and nitrogen (N) deposition during the growing season. It is important to understand how the carbon dynamics of plants respond to O₃ pollution in drier and N-enriched environments. Here we present the patterns of non-structural carbohydrates and its components (soluble sugar and starch) in the leaves and fine roots in poplar clone 546 (*Populus deltoides* cv. '55/56' × *P. deltoides* cv. 'Imperial') for one growing season at two O₃ concentrations (control, charcoal-filtered air, and elevated O₃, non-filtered air + 40 nmol·mol⁻¹ of O₃), two watering regimes (well-watered and reduced watering at 40% of well-watered irrigation), and two soil nitrogen addition treatments [no addition and the addition of 50 kg·(hm²·a)⁻¹]. The results showed that O₃ stress significantly increased the content of soluble sugar in leaves and starch in fine roots but decreased the content of starch and total non-structural carbohydrate (NSC) in leaves. Drought stress significantly reduced the content of starch and total NSC in leaves but increased the contents of soluble sugar and total NSC in fine roots. Nitrogen addition had no significant effect on NSC and its components in leaves and fine roots. NSC and its components in leaves and fine roots were positively correlated with photosynthetic rate and biomass. With an increase in the number of environmental stress factors, NSC in leaves showed a significant downward trend while NSC in fine roots showed a significant upward trend. The study demonstrates that environmental stress can promote the transformation of starch into soluble sugars in plant leaves and the transfer of NSC from leaves to roots for storage, which may be a coping strategy for plants exposed to environmental stress.

Key words: O₃; nitrogen deposition; drought stress; non-structural carbohydrates; fine roots; poplar

随着城市化和工业化的快速发展,大量化石燃料燃烧、汽车尾气排放、农业过度施肥和非植被土地利用增加等导致全球变暖、活性氮(N)排放增加和地表臭氧(O₃)浓度升高^[1,2],对植物的生长和生存产生了重大威胁^[3,4].植物的生长季(5~9月)常常暴露在高浓度O₃的氧化伤害、干旱缺水和大气N沉降等多重胁迫环境中^[5,6].有研究发现,环境O₃浓度大幅增加是森林衰退的主要原因之一^[3,7].长期干旱是导致近十年来全球范围内树木死亡现象发

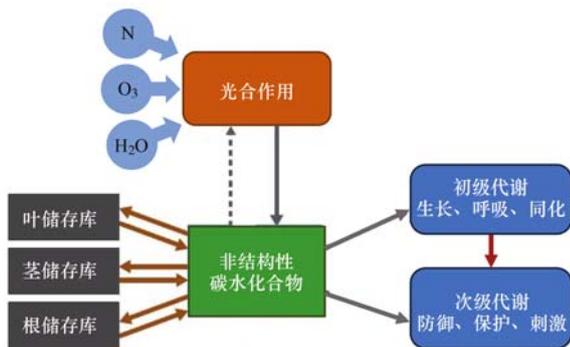
生的主要原因^[8-10].植物体内的非结构性碳水化合物(non-structural carbohydrates, NSC)的代谢直接影响着植株的生长发育和对环境因子的响应^[11].NSC是植物通过叶片光合作用固定的糖类物质,主要包括可溶性糖和淀粉,是植物生长、发育与繁殖过程中

收稿日期: 2020-07-22; 修订日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870458); 国家重点研发计划项目(2017YFE0127700)

作者简介: 李品(1987~),女,博士,青年研究员,主要研究方向为环境变化的生态效应, E-mail: lipin@bjfu.edu.cn

主要的能量供应底物,发挥着新陈代谢、运输水和同化产物、渗透调节和储存库的功能; NSC 同时也是合成次级代谢物(如挥发性有机化合物、单宁等)的主要底物,用于抵御外界生物(如植食性昆虫、病菌等)和环境胁迫(图 1)^[10]. 因此,理解树木 NSC 含量及其在各器官中的变化格局,成为探讨树木生长和生理生态过程对多因子环境变化响应和适应的理想切入点^[12].

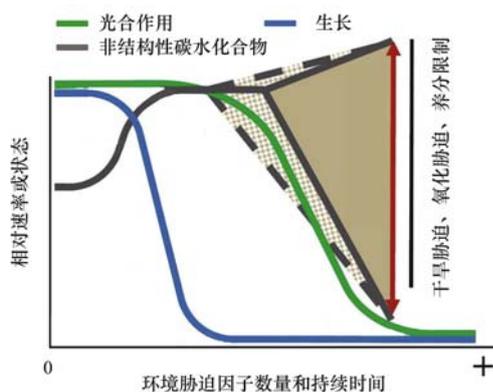


改绘自文献[13]

图 1 植物中非结构性碳水化合物的源汇关系和功能响应概念

Fig. 1 Conceptual diagram of the source-sink balance and nonstructural carbohydrates allocation in plants exposed to environmental stress

面对环境胁迫,有研究发现植物的生长会先于光合作用受到抑制(图 2),从而导致 NSC 积累储存的增加^[13]. 随着胁迫因子(诸如干旱、氧化和养分限制)数量的增加和胁迫持续时间的延长,NSC 可能维持在比较高的水平,或增加、或降低(图 2),这取决于环境胁迫因子的类型和数量^[13]. 由于植物不能像动物一样主动逃走以躲避环境胁迫,因此植物发展了一系列的 C 利用策略来应对和适应不利环境^[14]. 比如, O₃ 和干旱都会产生并积累活性氧自由基并引发氧化胁迫,使植物光合作用和生理代谢机能受到损伤,最终阻碍植物生长^[4]. 当受损的光



改绘自文献[13]

图 2 环境胁迫下碳动态的假设框架

Fig. 2 Hypothesized framework for C dynamics under environmental stress

合系统同化的 C 已经不能满足生长和修复需要时,植物会将更多的 C 用于抗氧化物质的合成以解毒和修复机能,而减少了用于生长的 C. NSC 库因此在环境胁迫下为植物提供了一个 C 缓冲区以权衡生长和维持生存的平衡^[15]. 植物通过不同器官间的 C 分配彼此协作,以适应外界环境变化. 如遇到 O₃ 胁迫后,杨树叶片首先发生反应,可溶性糖含量增加,淀粉和总 NSC 含量降低;细根反应不显著^[16]. 遇到干旱胁迫后,细根的 NSC 反应先于叶片发生^[16]. 可见,NSC 及其组分(可溶性糖和淀粉)在不同器官间表现出对不同环境因子的响应差异^[16-18]. 了解不同环境胁迫下植物不同器官 NSC 的变化格局,成为探究复合胁迫下植物适应策略的重要手段^[12].

目前,大量研究主要集中在单因子环境胁迫对树木 NSC 的影响方面,对干旱胁迫的研究较多^[9,16,18-22],对 N 沉降或者 O₃ 污染对于 NSC 的积累和分配特征的研究较少^[16,23,24],对于多因子复合胁迫下植物 NSC 的响应特征更是不清楚. 根据多因子限制假说认为^[25],水分供应缺乏可能限制土壤中水和 N 的扩散,从而使得植物在缺水和缺 N 的条件下更易受到 O₃ 的伤害^[5]. 根据最优分配假说认为^[26],当植物地上资源受到限制时(如 O₃ 诱导的 C 饥饿),植物会优先将更多的 C 分配到叶片和茎干^[27,28];当植物地下资源受到限制时(如土壤水分缺乏、土壤 N 可利用性降低),植物会优先将更多的 C 分配到根^[29,30]. 杨树(*Populus* spp.) 以其生长迅速、成林早、适应性广、抗风力强和易于更新等生物学特点成为我国北方平原地区防护林、用材林和城乡绿化的首选树种. 杨树的气孔较大,吸收 O₃ 量较其他树种多,对 O₃ 污染较敏感^[5,31],而且速生的特点使得杨树需水量和需 N 量都比较大,对许多杨树人工林而言,N 素和水分均是杨树生长发育的主要限制因子^[32,33]. N 沉降可从养分供应方面促进杨树生产力的提高. 因此,本研究选择杨树叶片和细根作为实验材料,并假设:① 干旱和 N 限制将增加细根中的 NSC 含量, O₃ 胁迫将增加叶片中 NSC 的含量;② 三因子复合胁迫对杨树叶片和细根的 NSC 及其组分的影响存在差异. 本研究结果以期为杨树在 O₃ 污染下的水分、养分管理及防护园林建设提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 实验地点和植物材料

本实验地点位于北京市延庆区唐家堡村野外实验与示范基地(116.34°E, 40.47°N). 该地区属于

温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均气温为 10℃,年降水量为 400~500 mm. 选用由中国林业科学研究院从意大利引进的第四代杨树新品种黑杨派欧美 546 杨 (*Populus deltoides* cv. '55/56' × *P. deltoides* cv. 'Imperial') 扦插苗为实验材料. 该杨树品种被国家林业局选定为三北地区防护林带主栽树种,目前在北方地区广泛栽种. 2017 年 5 月将相同基径 [(4.5 ± 0.6) mm] 和株高 [(27 ± 6) cm] 的幼树移入开顶式气室 (OTC, 高 3.0 m、占地 12.5 m² 的正八面钢化玻璃柱体), 适应 10 d 后进行 O₃ 熏蒸处理. 在适应期间所有幼树每 1~2 d 进行自动滴灌, 保持充分一致的土壤含水量.

1.2 实验处理

本实验设置 2 个 O₃ 处理: 对照 (以活性炭过滤的空气计) 和升高 O₃ 浓度 (非过滤的空气 + 40 nmol·mol⁻¹ O₃), 该升高浓度设置是模型预测的我国北方未来本世纪中叶可能达到的 O₃ 浓度. 每个 O₃ 处理设置 3 个 OTC 重复. 每个 OTC 有 32 盆植物, 随机挑选植物设置两个水分处理: 灌溉 (土壤饱和含水量, 叶片水势 -1.3 MPa) 和干旱 (减水 40%, 叶片水势 -3.2 MPa)^[33], 以及两个氮处理: 不加氮 (无额外氮添加) 和加氮 [添加 50 kg·(hm²·a)⁻¹ 尿素]; 添加的 N 量是在每年 N 沉降速率 [50 kg·(hm²·a)⁻¹]^[2] 基础上增加 1 倍左右, 模拟未来的 N 沉降水平; 于 6 月 13 日、6 月 29 日、7 月 16 日、8 月 1 日和 8 月 17 日分 5 次于每盆土壤中浇灌 100 mL 尿素溶液 (含有 0.105 g 尿素), 不加氮处理浇灌等体积水. 每个亚处理 8 棵植株重复.

本实验期间各 OTC 中的 O₃ 浓度由美国热电公司 49i 臭氧分析仪监测 (Model 49i; Thermo Scientific, Franklin, USA), O₃ 熏蒸时间为 6 月 10 日至 9 月 22 日. 每日熏气时间为 10 h (08:00~18:00), 阴雨雾-霾天停止熏气. 使用湿度传感器 (EC-5, Decagon Device, UK) 插入植物根部 5 cm 处连续监测土壤含水量, 利用数据记录器 (EM50, Decagon Device, UK) 每 5 min 读数一次, 直至实验结束. 在整个实验期间, 灌溉和干旱处理的日平均土壤含水量分别为 (29.9 ± 2.5)% 和 (19.8 ± 2.3)%; 对照和升高 O₃ 处理的平均 O₃ 浓度分别为 24.0 nmol·mol⁻¹ 和 80.6 nmol·mol⁻¹.

1.3 指标测定

于 7 月下旬 (生长旺期) 和 9 月中旬 (生长末期), 采用 Li-6400 便携式光合仪 (美国 LI-COR 公司) 测定叶片饱和光合速率. 具体测定方法为: 晴天 09:00~11:30, 每个亚处理选取 2 株中部叶位 (从顶端数第 6~8 片) 的叶片测定 3 次. 测定时设定光强

1 200 μmol·(m²·s)⁻¹, CO₂ 浓度为 400 μmol·mol⁻¹, 相对湿度 50%~60%. 测量完光合速率后, 每个亚处理取 2 盆植物分叶片、茎、根、根际土收获. 根洗净后分为细根 (直径 < 2 mm) 和粗根 (直径 ≥ 2 mm). 将叶片和细根在 105℃ 下杀青 15 min 后, 在 65℃ 下烘至恒重, 称量生物量; 随后用球磨仪 (GT200, Beijing Grinder Instrument Co., Ltd., China) 磨成粉末, 进行非结构性碳水化合物组分含量测定.

可溶性糖的测定: 分别将磨好的叶片和细根粉末称取 0.5 g 于 200 mL 锥形瓶中, 加入 50 mL 超纯水, 高压蒸煮 (105℃) 2 h, 冷却至室温, 用冷冻离心机 (温度 4℃, 转速 13 000 g) 离心 10 min, 取上清液即为可溶性糖提取液. 使用高效液相色谱 (Waters HPLC2695, Milford, MA, USA) 测定可溶性糖.

淀粉的测定: 称取 0.05 g 叶片和 0.5 g 细根样品, 加入 1 mL 蒸馏水和 5 mL 80% 乙醇溶液, 置于涡旋振荡器中混匀静置, 13 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 弃上清液, 重复 2 次. 于沉淀物中加入 1 mL 蒸馏水和 6 mL 52% 高氯酸溶液, 置于涡旋振荡器涡旋 10 min, 13 000 r·min⁻¹ 下离心 10 min, 重复 2 次, 将上清液转入 25 mL 容量瓶, 用蒸馏水定容至 25 mL. 将该溶液进行过滤, 滤液转入 50 mL 容量瓶, 并用蒸馏水定容, 得到淀粉提取液. 采用高氯酸水解-蒽酮比色法进行测定. 总非结构性碳水化合物为可溶性糖和淀粉的加和.

土壤含水量采用烘干称重法进行测定. 土壤 pH 利用 pH 酸度计 (METTLER TOLEDO AG 8603) 按照 2.5:1 的水土比例电位法测定; 土壤有效氮 (土壤铵态氮和硝态氮) 采用 KCl 浸提-连续流动分析仪 (AA3) 法测定.

1.4 数据分析

本实验数据采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 采用 Shapiro-Wilk (W 检验) 发现数据符合正态分布 ($P > 0.05$). 文中数据为平均值 ± 标准差 (Mean ± SD). Pearson 线性相关分析被测指标之间的相关性. 采用 Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) 检验法和 Student-t 检验法分析被测指标在不同亚处理之间的差异; 一般线性模型 (General Linear Model) 将 O₃、干旱、加氮和采样时间进行多因素方差分析, 检验主效应及交互效应的显著性 ($P < 0.05$). 运用 Sigmaplot 12.0 软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 臭氧、干旱和氮添加对杨树叶片非结构性碳水化合物组分的影响

O₃ 处理显著增加杨树叶片可溶性糖 (5.6%,

$P=0.030$, 表 1 和图 3)。干旱处理和氮添加对叶片可溶性糖影响均不显著 ($P>0.05$, 表 1)。O₃ 与干旱 ($P=0.009$)、O₃ 与采样时间 ($P=0.001$) 对叶片可溶性糖的影响均有显著交互作用: 相比 7 月, 在 9 月灌溉下 O₃ 处理显著增加叶片可溶性糖 (23%, 图 3), 而在干旱胁迫下 O₃ 的影响不显著 ($P>0.05$, 图 3)。O₃、氮添加与采样时间对叶片可溶性糖的影响有显著交互作用 ($P=0.042$, 表 1): 在氮添加下 O₃ 处理在 7 月显著增加叶片可溶性糖 (9.5%), 而在 9 月这种影响并不显著 ($P>0.05$, 图 3)。

O₃ 处理显著降低叶片淀粉 (-26.0%, $P=0.007$, 表 1 和图 3)。干旱处理显著降低叶片淀粉 (-50.0%, $P=0.001$, 表 1 和图 3)。氮添加对叶片淀粉无显著影响 ($P>0.05$, 表 1)。随着生长时间的延长 (从生长旺期 7 月到生长末期 9 月), 淀粉显

著增加 45.3% ($P<0.001$, 表 1 和图 3)。O₃ 与干旱对叶片淀粉的影响有显著交互作用 ($P=0.049$, 表 1), 灌溉下 O₃ 显著降低淀粉 (-26%); 而在干旱胁迫下 O₃ 的影响不显著 ($P>0.05$, 图 3)。O₃ 与采样时间对叶片淀粉的影响有显著交互作用 ($P=0.005$, 表 1), 在生长旺期 (7 月) O₃ 处理对淀粉的影响不显著, 但到生长末期 (9 月), O₃ 处理显著降低淀粉 (-36.4%, 图 3)。

O₃ 处理显著降低叶片总非结构性碳水化合物 (-12.0%, $P=0.028$, 表 1 和图 3)。干旱处理显著降低叶片总非结构性碳水化合物 (-11.6%, $P=0.005$, 表 1 和图 3)。氮添加对叶片总非结构性碳水化合物无显著影响 ($P>0.05$, 表 1)。随着处理时间的延长, 从生长旺期 (7 月) 到生长末期 (9 月) 叶片总非结构性碳水化合物显著增加 10.8% ($P<0.001$, 表 1)。

表 1 升高臭氧浓度、干旱处理、加氮、采样时间及其交互作用对杨树叶片和细根可溶性糖、淀粉和总非结构性碳水化合物 (NSC) 的方差分析结果 (P 值)¹⁾

Table 1 The P values for the main effects and interactions of O₃, N, drought, and sampling time on soluble sugar, starch, and total non-structural carbohydrates in the leaves and fine roots of poplar

项目	叶片			细根		
	可溶性糖	淀粉	总 NSC	可溶性糖	淀粉	总 NSC
臭氧	0.030	0.007	0.028	0.766	0.049	0.632
干旱	0.103	0.001	0.005	0.007	0.142	0.004
加氮	0.415	0.201	0.328	0.828	0.460	0.576
采样时间	0.143	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.532
臭氧 × 干旱	0.009	0.049	0.308	0.009	0.627	0.012
臭氧 × 加氮	0.181	0.922	0.777	0.902	0.507	0.622
臭氧 × 采样时间	0.001	0.005	0.052	0.178	0.384	0.584
干旱 × 加氮	0.527	0.922	0.858	0.374	0.445	0.750
干旱 × 采样时间	0.287	0.652	0.998	0.026	0.159	0.275
加氮 × 采样时间	0.201	0.852	0.706	0.712	0.234	0.744
臭氧 × 干旱 × 加氮	0.588	0.325	0.129	0.395	0.176	0.424
臭氧 × 干旱 × 采样时间	0.461	0.274	0.331	0.213	0.511	0.163
臭氧 × 加氮 × 采样时间	0.042	0.794	0.888	0.396	0.443	0.731
干旱 × 加氮 × 采样时间	0.870	0.958	0.897	0.295	0.496	0.233
臭氧 × 干旱 × 加氮 × 采样时间	0.207	0.271	0.221	0.107	0.058	0.104

1) 黑体字表示 $P<0.05$

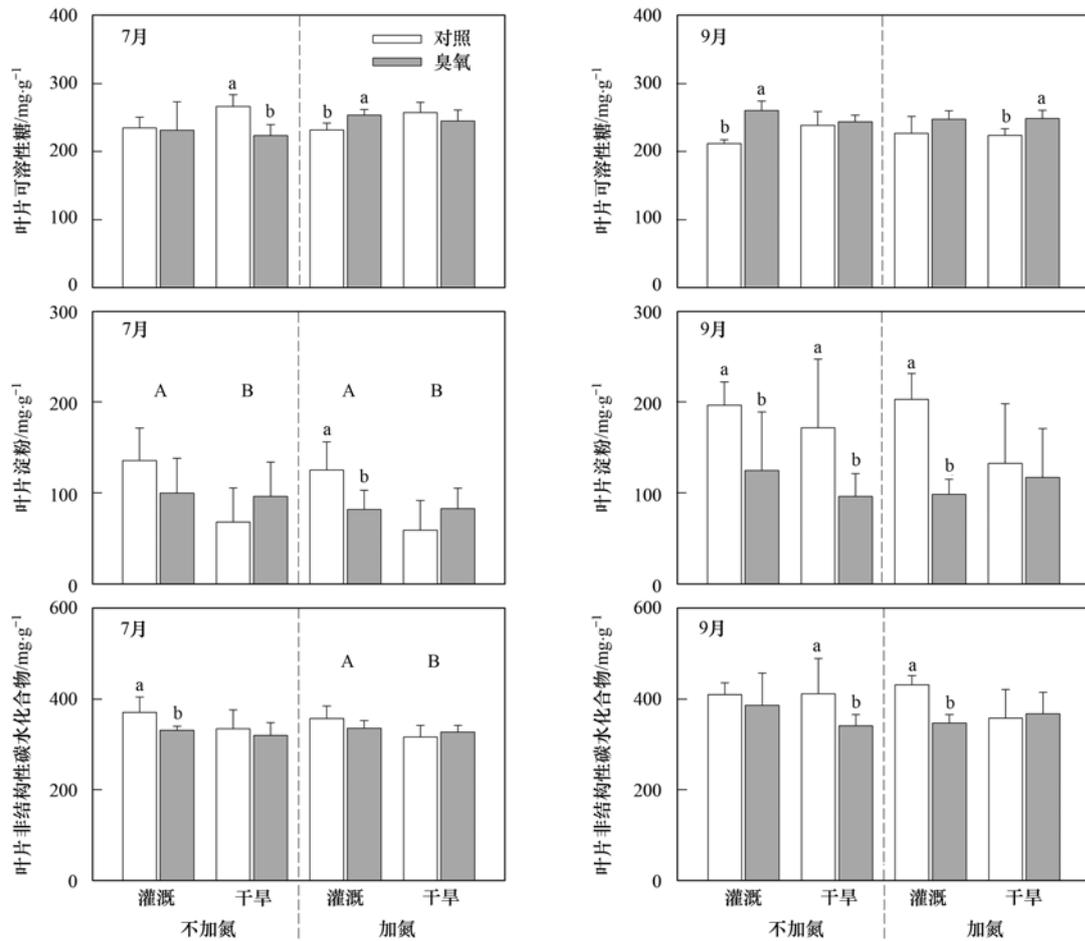
2.2 臭氧、干旱和氮添加对杨树细根非结构性碳水化合物组分的影响

干旱处理显著增加杨树细根可溶性糖 (6.9%, $P=0.007$, 表 1 和图 4)。O₃ 处理和氮添加对细根可溶性糖的影响均不显著 ($P>0.05$, 表 1)。随着处理时间的延长, 从生长旺期 (7 月) 到生长末期 (9 月) 细根可溶性糖显著降低 9.8% ($P<0.001$, 表 1)。O₃ 与干旱对细根可溶性糖有显著交互作用 ($P=0.009$, 表 1): 灌溉下 O₃ 处理显著降低可溶性糖 (-22.1%), 而在干旱胁迫下 O₃ 处理显著增加可溶性糖 (13.3%, 图 4)。干旱与采样时间对细根可溶性糖有显著交互作用 ($P=0.026$, 表 1): 干旱胁

迫在 7 月显著降低可溶性糖 (-16.2%), 随着处理时间的延长, 到 9 月干旱胁迫对细根可溶性糖的影响不显著 ($P>0.05$, 图 4)。

O₃ 处理显著增加杨树细根淀粉 (15.6%, $P=0.049$, 表 1 和图 4)。干旱处理和氮添加对细根淀粉影响均不显著 ($P>0.05$, 表 1)。随着处理时间的延长, 从生长旺期 (7 月) 到生长末期 (9 月) 细根可溶性糖显著增加 37.4% ($P<0.001$, 表 1)。

干旱处理显著增加杨树细根总非结构性碳水化合物 (7.5%, $P=0.004$, 表 1 和图 4)。O₃ 处理和氮添加对细根总非结构性碳水化合物无显著影响 ($P>0.05$, 表 1)。O₃ 与干旱对细根总非结构性碳水



不同小写字母表示在相同水分处理下臭氧胁迫的显著性差异,不同大写字母表示灌溉和干旱的显著性差异 ($P < 0.05$)

图3 臭氧浓度升高、干旱胁迫和氮添加对杨树叶片可溶性糖、淀粉和总非结构性碳水化合物在两个采样时间(7月和9月)的影响

Fig. 3 Effects of elevated ozone, N addition, and drought on the leaf soluble sugar, leaf starch, and leaf total non-structural carbohydrate content of hybrid poplar saplings over the time (July and September)

化合物有显著交互作用 ($P = 0.012$, 表1); 灌溉下 O_3 处理对细根总非结构性碳水化合物影响不显著, 而在干旱胁迫下 O_3 处理显著增加细根总非结构性碳水化合物 (19.1%, 图4)。

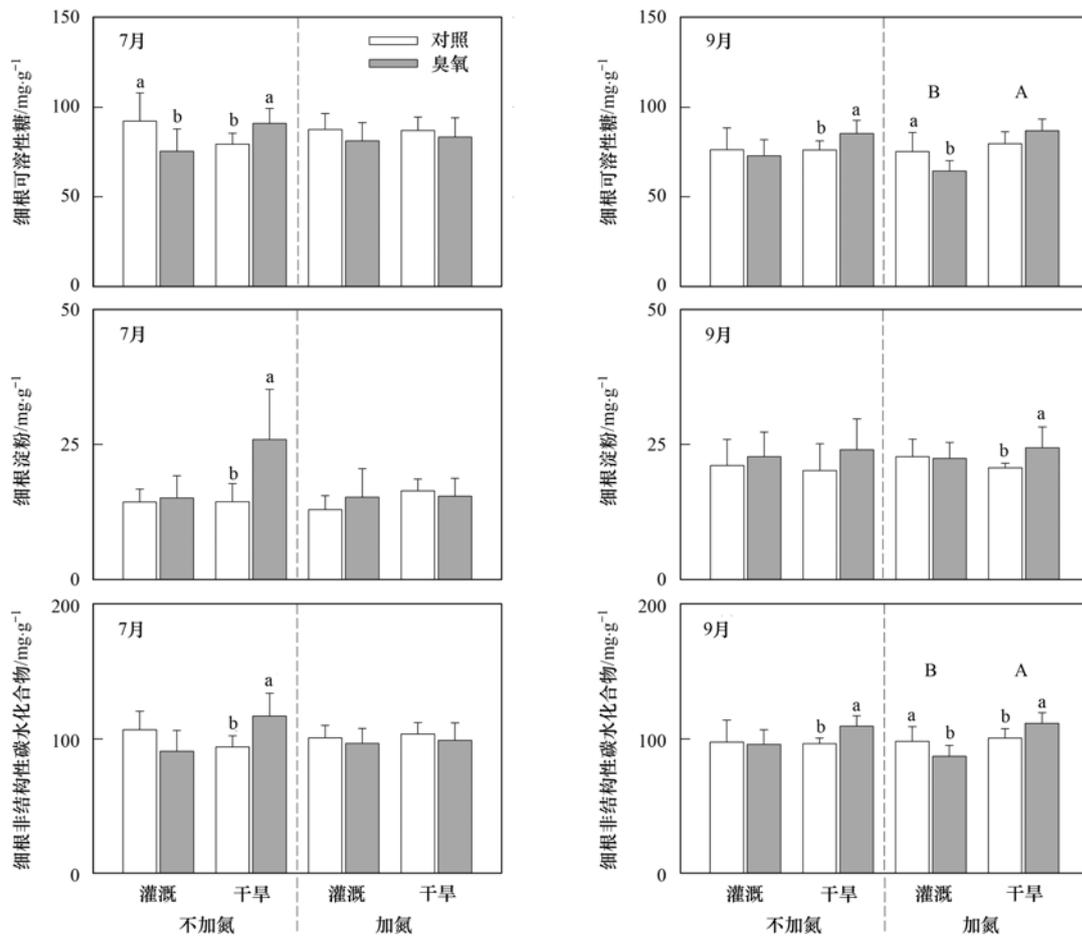
2.3 杨树叶片和细根非结构性碳水化合物组分对胁迫因子数量的响应

随着胁迫因子数量的增加, 杨树叶片和细根可溶性糖在7月和9月的变化均无显著差异 ($P > 0.05$, 图5)。叶片淀粉随着胁迫因子数量的增加有降低趋势, 在9月达到显著水平; 当有3个因子共同胁迫时(臭氧+干旱+不加氮), 叶片淀粉比无胁迫因子(对照空气+灌溉+加氮)显著降低52.7% (图5); 细根淀粉随着胁迫因子数量的增加有增加趋势, 在7月达到显著水平; 当有3个因子共同胁迫时, 细根淀粉比无胁迫因子显著增加99.2% (图5)。总非结构性碳水化合物的变化趋势与淀粉一致: 随着胁迫因子数量的增加, 叶片总非结构性碳水化合物有降低趋势, 细根总非结构性碳水化合物有增加趋势, 并在两个时期均达到显著水平 (图5);

叶片和细根总非结构性碳水化合物在有3个因子共同胁迫时分别平均显著降低15.7%和增加13.9% (图5)。

2.4 叶片和细根非结构性碳水化合物组分与生物和环境因子的关系

杨树叶片和细根的可溶性糖、淀粉、总非结构性碳水化合物含量与光合速率、叶生物量、细根生物量、土壤含水量、土壤pH和有效氮含量的相关性分析表明(表2): 光合速率显著影响叶片和细根的总非结构性碳水化合物及其组分(可溶性糖和淀粉)(其中对于叶片可溶性糖边缘显著 $P = 0.058$); 土壤含水量显著影响叶片淀粉、叶片总非结构性碳水化合物、细根可溶性糖和细根总非结构性碳水化合物 ($P < 0.05$, 表2); 土壤pH显著影响细根可溶性糖 ($r = 0.458$, $P < 0.05$); 土壤有效氮显著影响叶片淀粉、叶片总非结构性碳水化合物和细根淀粉 ($P < 0.05$, 表2)。叶片生物量与叶片可溶性糖、叶片淀粉、叶片总非结构性碳水化合物和光合速率显著相关 ($P < 0.05$, 表2); 细根生物量与叶片淀粉、叶



不同小写字母表示在相同水分处理下臭氧胁迫的显著性差异,不同大写字母表示灌溉和干旱的显著性差异 ($P < 0.05$)

图4 臭氧浓度升高、干旱胁迫和氮添加对杨树细根可溶性糖、淀粉和总非结构性碳水化合物在两个采样时间(7月和9月)的影响

Fig. 4 Effects of elevated ozone, N addition, and drought on the soluble sugar, leaf starch, and leaf total non-structural carbohydrate content in fine roots of hybrid poplar saplings over the time (July and September)

表2 叶片和细根的非结构性碳水化合物(NSC)及其组分与光合速率、生物量和土壤理化性质的相关性¹⁾

Table 2 Level of correlation coefficient (r) and significance (P) of Pearson correlations between the soluble sugar, starch and total non-structural carbohydrates in leaves and fine roots of poplar with photosynthetic rate, biomass, and edaphic variables among the three environmental stressors across the two-sampling times

	叶淀粉	叶总NSC	细根可溶性糖	细根淀粉	细根总NSC	光合速率	叶生物量	细根生物量	土壤含水量	土壤pH	土壤有效氮
叶可溶性糖	0.666**	0.383	0.080	0.221	0.198	0.058	0.558*	0.322	0.237	0.232	0.289
叶淀粉		0.944***	0.256	0.312	0.071	0.482*	0.774***	0.817***	0.489*	0.393	-0.626**
叶总NSC			0.352	0.289	0.175	0.571**	0.713**	0.869***	0.500*	0.384	-0.647**
细根可溶性糖				0.195	0.841***	0.640**	0.260	0.522*	-0.576*	0.458*	0.249
细根淀粉					0.367	0.711**	0.092	0.253	-0.057	0.117	-0.551*
细根总NSC						0.414*	0.196	0.355	-0.577**	-0.370	-0.068
光合速率							0.554*	0.651**	0.364	-0.486	0.627**
叶生物量								0.810***	0.506*	0.485*	-0.266
细根生物量									0.582**	0.656**	-0.492*
土壤含水量										0.709**	0.108
土壤pH											0.040

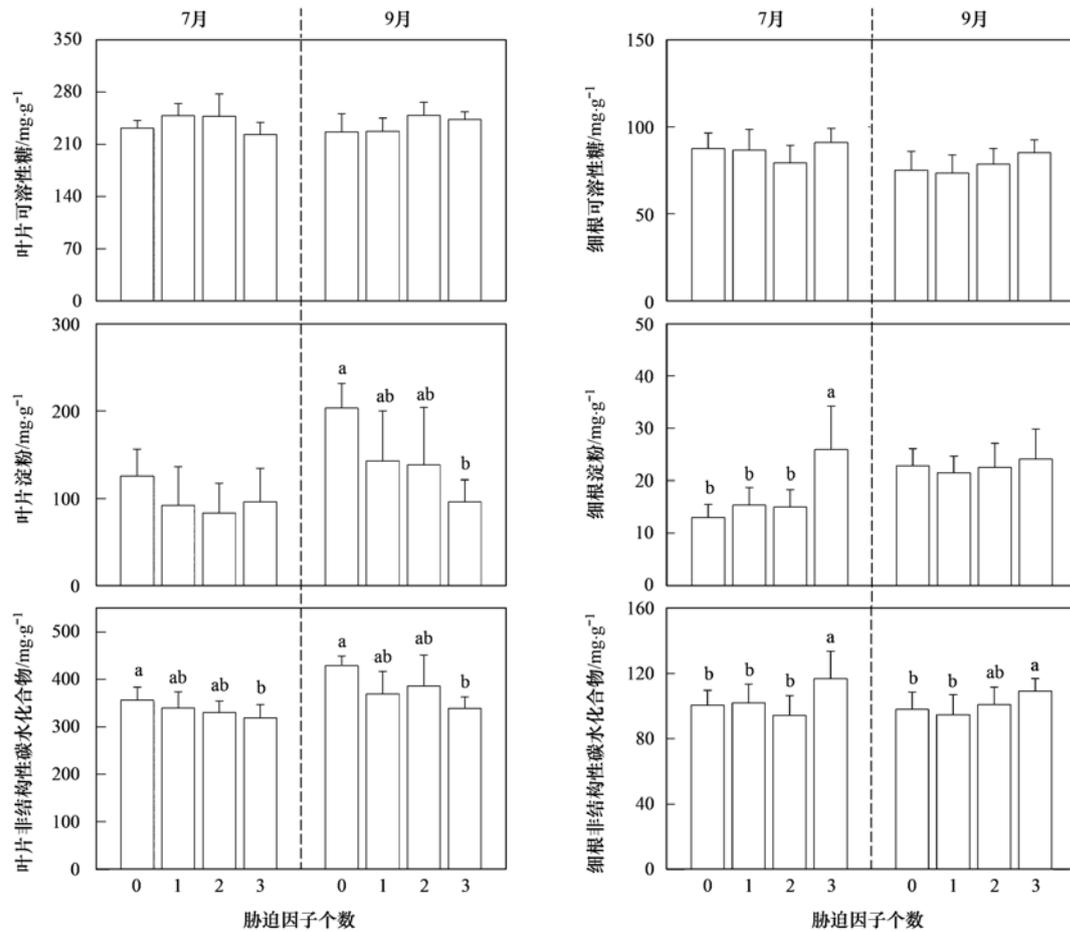
1) ***表示 $P < 0.001$, **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$

片总非结构性碳水化合物、细根可溶性糖、光合速率和叶片生物量显著相关($P < 0.05$, 表2)。

3 讨论

环境对植物光合作用和生理状况的影响能直接

快速地反映在非结构性碳水化合物(NSC)的变化上^[13]。NSC库反映了植物生长过程中碳同化和碳需求的平衡状态,当植物组织中NSC含量降低时表明碳的供应不足,而当NSC含量增加时表明碳过剩^[34]。NSC中的主要组分可溶性糖是植物忍受环



0 表示无胁迫因子(对照空气+灌溉+加氮), 1 表示有 1 个胁迫因子(灌溉+加氮+臭氧、对照空气+灌溉+不加氮、对照空气+加氮+干旱), 2 表示有 2 个共同胁迫因子(对照空气+干旱+不加氮、灌溉+臭氧+不加氮、臭氧+干旱+加氮), 3 表示同时有 3 个胁迫因子(臭氧+干旱+不加氮)

图 5 杨树叶片和细根的可溶性糖、淀粉和总非结构性碳水化合物在 7 月和 9 月对环境胁迫因子数量的响应

Fig. 5 Soluble sugar, starch, and total carbohydrate content of leaves and fine roots of hybrid poplar saplings in relation to treatment and number of stressors over time (July and September)

境胁迫的重要渗透调节物质,而淀粉是植物主要的长期能量贮存物质.环境胁迫下可促进植物体内的淀粉转化为可溶性糖,调节细胞的渗透势,维持一定的膨压,抵御并适应胁迫环境;而当可溶性糖积累到一定水平时,又可向淀粉形式转化储藏^[20].大量研究显示 O_3 胁迫破坏光合作用系统、抑制植物生长从而降低生物量^[35].本实验结果表明, O_3 胁迫显著增加杨树叶片中可溶性糖含量,却降低了淀粉和总 NSC 的含量; O_3 胁迫显著增加了细根淀粉含量.这个结果与 O_3 胁迫将增加叶片中 NSC 含量的假设并不一致.然而与闽楠(*Phoebe bournei*)、楠木(*Phoebe zhenan*)、宜昌润楠(*Machilus ichangensis*)和红豆杉(*Taxus wallichiana*)的研究结果一致^[24, 36].杨树叶片碳水化合物代谢对 O_3 胁迫的响应表现为可溶性糖含量增加,可能的原因在于可溶性糖是植物适应环境的信号物质^[37].一方面, O_3 胁迫下植物体内光合同化产物供应不足,从而抑制植物将碳水化合物

合成结构性物质,导致植物生长受到显著限制^[35];但与此同时叶片仍在同化光合产物,导致可溶性糖在植物体内的大量累积,从而调节渗透压来抵抗 O_3 胁迫.另一方面, O_3 胁迫下可溶性糖向淀粉形式转化储藏的路径被中断,而植物体内储存的淀粉也要被大量消耗用以抵御氧化胁迫,从而导致淀粉含量降低.随着 O_3 胁迫的持续,叶片抗氧化系统再也无法修复氧化损伤时,叶片同化光合产物的能力丧失,表现为叶片 NSC 含量的降低.

干旱胁迫显著降低了杨树叶片淀粉和总 NSC 含量,却显著增加了细根可溶性糖和总 NSC 的含量,这与干旱将增加细根中的 NSC 含量的假设一致.研究发现干旱下调了兴安落叶松(*Larix gmelinii*)叶片淀粉的合成能力,并促使淀粉进行水解保证其基本的生长发育过程^[38].干旱胁迫下的植物将更多的 C 从地上转移到地下存储,维持根的存活以待环境好转后重新生长,这符合最优分配假

说^[29, 30]. Hoch^[39]的研究发现干旱胁迫更多是抑制新组织的形成从而抑制植物生长,而非对 C 供应过程的抑制. 这表明干旱胁迫下植物细根 NSC 的增加并不是用来抵抗干旱胁迫,而是由于植物体内水分亏缺,影响了植物合成结构性物质的次生代谢过程^[12]. 然而也有研究发现干旱胁迫导致美国可食松(*Pinus edulis*)死亡的过程中,细根淀粉含量在持续下降^[40]. 这可能与实验持续时间、干旱胁迫程度、树龄以及树种对干旱的敏感性有关.

氮添加对杨树叶片和细根总非结构性碳水化合物及其组分(可溶性糖和淀粉)均无显著影响. 这可能与杨树盆栽实验设置的浓度较低有关. 氮添加量 [$\sim 50 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 平均到每盆中整个实验期间共施加 0.445g 尿素,这个量对于高 N 需求的杨树可能远远不够,表现在本课题组其他实验中对杨树叶片化学属性(如 N 含量和木质素)也无显著影响^[41]. Thomas 等^[23]对云杉(*Picea abies*)幼树的研究发现氮添加增加了细根可溶性糖和淀粉含量,并且只有在高 N 水平 [$80 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 能缓解 O₃ 胁迫对叶和根淀粉含量降低的影响. 在今后研究中,需要设置多梯度的氮添加量实验来观察杨树叶片和细根响应.

本研究结果表明随着环境胁迫因子数量的增加,叶片和细根非结构性化合物的变化方向相反:叶片 NSC 趋向减少,而细根(O₃ 氧化、干旱和 N 缺乏) NSC 趋向增加. 这说明杨树叶片和细根 NSC 对胁迫环境的响应存在差异,这与树木应对胁迫的驯化适应策略一致,处于胁迫环境中的树木会改变其同化物的分配关系来最大限度保存根系的存活^[42]. 根据源-汇平衡模型^[27],NSC 水平影响基因调控,并提供了碳分配到各个库的信号. Li 等^[5]的研究发现随着环境胁迫因子数量的增加,杨树叶片和细根生物量显著降低,而根冠比显著增加,说明胁迫因子越多,植物越倾向于将更多生物量分配到根部. 由于光合速率、NSC 与生物量存在非常显著的正相关关系(表 2),因此可以推论,在环境胁迫因子增加的情况下,植物有可能将叶片(源)光合作用合成的 NSC 转移到根部(汇)暂时储存起来,并且将抑制碳水化合物合成结构性物质以抵御胁迫环境.

4 结论

(1) O₃ 胁迫显著增加杨树叶片可溶性糖含量和降低淀粉和总 NSC,对细根的总 NSC 影响不显著;干旱胁迫降低叶片淀粉和总 NSC,增加细根可溶性糖和总 NSC;氮添加对叶片和细根总 NSC 及其组分无显著影响.

(2) 随着环境胁迫因子(O₃ 氧化、干旱和 N 缺乏)的增加,叶片 NSC 呈降低趋势,细根 NSC 呈增加趋势,表明杨树将叶片中的 NSC 转移到根部储藏可能是应对多因子胁迫的一种策略.

(3) 杨树叶片和细根 NSC 与光合速率、叶生物量和细根生物量存在显著正相关关系,为揭示在未来 O₃ 污染、干旱和 N 沉降的环境下树木 C 动态及其分配提供了科学依据.

参考文献:

- [1] Li M, Liu H, Geng G N, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. National Science Review, 2017, 4(6): 834-866.
- [2] Xu W, Luo X S, Pan Y P, et al. Quantifying atmospheric nitrogen deposition through a nationwide monitoring network across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(21): 12345-12360.
- [3] Feng Z Z, De Marco A, Anav A, et al. Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China [J]. Environment International, 2019, 131, doi: 10.1016/j.envint.2019.104966.
- [4] 高峰, 李品, 冯兆忠. 臭氧与干旱对植物复合影响的研究进展 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(2): 252-268.
Gao F, Li P, Feng Z Z. Interactive effects of ozone and drought stress on plants: a review [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(2): 252-268.
- [5] Li P, Zhou H M, Xu Y S, et al. The effects of elevated ozone on the accumulation and allocation of poplar biomass depend strongly on water and nitrogen availability [J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 929-936.
- [6] Mills G, Harmens H, Wagg S, et al. Ozone impacts on vegetation in a nitrogen enriched and changing climate [J]. Environmental Pollution, 2016, 208: 898-908.
- [7] Mills G, Sharps K, Simpson D, et al. Closing the global ozone yield gap: quantification and cobenefits for multistress tolerance [J]. Global Change Biology, 2018, 24(10): 4869-4893.
- [8] Adams H D, Zeppel M J B, Anderegg W R L, et al. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality [J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(9): 1285-1291.
- [9] Dickman L T, McDowell N G, Sevanto S, et al. Carbohydrate dynamics and mortality in a piñon-juniper woodland under three future precipitation scenarios [J]. Plant, Cell & Environment, 2015, 38(4): 729-739.
- [10] Hartmann H, Trumbore S. Understanding the roles of nonstructural carbohydrates in forest trees - from what we can measure to what we want to know [J]. New Phytologist, 2016, 211(2): 386-403.
- [11] 潘庆民, 韩兴国, 白永飞, 等. 植物非结构性贮藏碳水化合物的生理生态学研究进展 [J]. 植物学通报, 2002, 19(1): 30-38.
Pan Q M, Han X G, Bai Y F, et al. Advances in physiology and ecology studies on stored non-structure carbohydrates in plants [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002, 19(1): 30-38.
- [12] 郑云普, 王贺新, 娄鑫, 等. 木本植物非结构性碳水化合物变化及其影响因子研究进展 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1188-1196.
Zheng Y P, Wang H X, Lou X, et al. Changes of non-structural carbohydrates and its impact factors in trees: a review [J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(4): 1188-1196.
- [13] Hartmann H, Adams H D, Hammond W M, *et al.* Identifying differences in carbohydrate dynamics of seedlings and mature trees to improve carbon allocation in models for trees and forests[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, **152**: 7-18.
- [14] Martínez-Vilalta J, Sala A, Asensio D, *et al.* Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: a global synthesis [J]. Ecological Monographs, 2016, **86**(4): 495-516.
- [15] Kobe R K, Iyer M, Walters M B. Optimal partitioning theory revisited: nonstructural carbohydrates dominate root mass responses to nitrogen[J]. Ecology, 2010, **91**(1): 166-179.
- [16] 周慧敏, 李品, 冯兆忠, 等. 地表臭氧浓度升高与干旱交互作用对杨树非结构性碳水化合物积累和叶根分配的短期影响[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(4): 296-304.
Zhou H M, Li P, Feng Z Z, *et al.* Short-term effects of combined elevated ozone and limited irrigation on accumulation and allocation of non-structural carbohydrates in leaves and roots of poplar sapling[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, **43**(4): 296-304.
- [17] 于丽敏, 王传宽, 王兴昌. 三种温带树种非结构性碳水化合物的分配[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(12): 1245-1255.
Yu L M, Wang C K, Wang X C. Allocation of nonstructural carbohydrates for three temperate tree species in Northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, **35**(12): 1245-1255.
- [18] 王凯, 林婷婷, 吕林有, 等. 水分胁迫对杨树幼苗非结构性碳水化合物分配的影响[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(1): 3283-3290.
Wang K, Lin T T, Lv L Y, *et al.* Effects of water stress on non-structural carbohydrates distribution in poplar seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(1): 3283-3290.
- [19] Galvez D A, Landhauser S M, Tyree M T. Low root reserve accumulation during drought may lead to winter mortality in poplar seedlings[J]. New Phytologist, 2013, **198**(1): 139-148.
- [20] Klein T, Hoch G, Yakir D, *et al.* Drought stress, growth and nonstructural carbohydrate dynamics of pine trees in a semi-arid forest[J]. Tree Physiology, 2014, **34**(9): 981-992.
- [21] O'Brien M J, Leuzinger S, Philipson C D, *et al.* Drought survival of tropical tree seedlings enhanced by non-structural carbohydrate levels[J]. Nature Climate Change, 2014, **4**(8): 710-714.
- [22] 杨斌, 彭长辉, 张贤, 等. 干旱胁迫对刺槐幼苗叶片氮含量、光合速率及非结构性碳水化合物的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(6): 1261-1269.
Yang B, Peng C H, Zhang X, *et al.* Effects of drought stress on leaf nitrogen content, rate of photosynthesis, and non-structural carbohydrates in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, **25**(6): 1261-1269.
- [23] Thomas V F D, Braun S, Flückiger W. Effects of simultaneous ozone exposure and nitrogen loads on carbohydrate concentrations, biomass, and growth of young spruce trees (*Picea abies*) [J]. Environmental Pollution, 2005, **137**(3): 507-516.
- [24] Chen Z, Cao J X, Yu H, *et al.* Effects of elevated ozone levels on photosynthesis, biomass and non-structural carbohydrates of *Phoebe bournei* and *Phoebe zhennan* in subtropical China [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.01764.
- [25] Rastetter E B, Shaver G R. A model of multiple-element limitation for acclimating vegetation [J]. Ecology, 1992, **73**(4): 1157-1174.
- [26] Bloom A J, Chapin III F S, Mooney H A. Resource limitation in plants- an economic analogy[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1985, **16**: 363-392.
- [27] Andersen C P. Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone[J]. New Phytologist, 2003, **157**(2): 213-228.
- [28] Grantz D A, Gunn S, Vu H B. O₃ impacts on plant development: a meta-analysis of root/shoot allocation and growth [J]. Plant, Cell & Environment, 2006, **29**(7): 1193-1209.
- [29] Gedroc J J, McConnaughay K D M, Coleman J S. Plasticity in root/shoot partitioning: optimal, ontogenetic, or both? [J]. Functional Ecology, 1996, **10**(1): 44-50.
- [30] Li W B, Jin C J, Guan D X, *et al.* The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: a meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **82**: 112-118.
- [31] Feng Z Z, Shang B, Gao F, *et al.* Current ambient and elevated ozone effects on poplar: a global meta-analysis and response relationships[J]. Science of the Total Environment, 2019, **654**: 832-840.
- [32] Chapin III F S, McFarland J, McGuire A D, *et al.* The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences[J]. Journal of Ecology, 2009, **97**(5): 840-850.
- [33] Shang B, Yuan X Y, Li P, *et al.* Effects of elevated ozone and water deficit on poplar saplings: Changes in carbon and nitrogen stocks and their allocation to different organs[J]. Forest Ecology and Management, 2019, **441**: 89-98.
- [34] Körner C. Carbon limitation in trees [J]. Journal of Ecology, 2003, **91**(1): 4-17.
- [35] Li P, Feng Z Z, Catalayud V, *et al.* A meta-analysis on growth, physiological, and biochemical responses of woody species to ground-level ozone highlights the role of plant functional types [J]. Plant, Cell & Environment, 2017, **40**(10): 2369-2380.
- [36] Cao J, Chen Z, Yu H, *et al.* Differential responses in non-structural carbohydrates of *Machilus ichangensis* rehd. et wils. and *Taxus wallichiana* zucc. var. *chinensis* (Pilg.) florin seedlings to elevated ozone[J]. Forests, 2017, **8**(9), doi: 10.3390/f8090323.
- [37] Gibson S I. Plant sugar-response pathways. Part of a complex regulatory web [J]. Plant Physiology, 2000, **124**(4): 1532-1539.
- [38] 杜尧, 韩轶, 王传宽. 干旱对兴安落叶松枝叶非结构性碳水化合物化合物的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6090-6100.
Du Y, Han Y, Wang C K. The influence of drought on non-structural carbohydrates in the needles and twigs of *Larix gmelinii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(21): 6090-6100.
- [39] Hoch G. Cell wall hemicelluloses as mobile carbon stores in non-reproductive plant tissues [J]. Functional Ecology, 2007, **21**(5): 823-834.
- [40] Adams H D, Germino M J, Breshears D D, *et al.* Nonstructural leaf carbohydrate dynamics of *Pinus edulis* during drought-induced tree mortality reveal role for carbon metabolism in mortality mechanism [J]. New Phytologist, 2013, **197**(4): 1142-1151.
- [41] Li Z Z, Yang J, Shang B, *et al.* Water stress rather than N addition mitigates impacts of elevated O₃ on foliar chemical profiles in poplar saplings[J]. Science of the Total Environment, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135935.
- [42] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. New Phytologist, 2012, **193**(1): 30-50.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshui Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshui	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)