

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 7 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112251969

张呈祥, 陈为峰. 德国鸢尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性. 生态学报, 2013, 33(7): 2165-2172.

Zhang C X, Chen W F. Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2165-2172.

德国鸢尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性

张呈祥, 陈为峰*

(山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018)

摘要:通过盆栽研究了 Cd 胁迫下德国鸢尾的生长状况、生态效应、生理特性及吸收和富集 Cd 的能力。结果表明:德国鸢尾对小于 5 mg/kg 的 Cd 有较强的耐性,适用于城区土壤修复;Cd 浓度大于 5 mg/kg 时抑制德国鸢尾生长,降低了其生态效应。随着 Cd 浓度的增大,德国鸢尾根系活力、叶绿素含量和含水量逐渐降低,游离脯氨酸和可溶性糖含量先升高后降低,细胞膜透性逐渐升高。Cd 在德国鸢尾体内分布为根系>地上部分,随着 Cd 浓度的增大,德国鸢尾根系和地上部分 Cd 积累浓度逐渐升高、富集系数和转运系数逐渐降低;Cd 浓度为 20 mg/kg 时德国鸢尾对 Cd 的积累量最大,为 2.122 mg/plant。

关键词:德国鸢尾; Cd; 生理生态响应; 积累特性

Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd

ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng*

College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: The valuable ornamental plant *Iris germanica* L., which widely distributed in city gardens and on the road-sides in our country, is a kind of groundcover plant. It is usually applied for green and courtyard ornamentation. Using *Iris germanica* L. to remedy urban soil polluted by cadmium (Cd) can not only purify the soil but also obtain landscape and ecological benefits. The responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd were studied under five Cd concentrations (0.5, 1, 5, 10 and 20 mg/kg) with pot culture experiments. In comparison, the same setup without Cd addition was used as a control treatment. The experiment was conducted with a completely randomized design. Some morphological indexes (plant height, leaf area, tiller number, shoot biomass and root biomass), ecological indexes (net photosynthesis rate and transpiration rate) and physiological indexes (chlorophyll content, root activity, water content, contents of free proline and soluble sugar) were observed in green stage and flowering stage of *Iris germanica* L.. The distribution of Cd in *Iris germanica* L. plant was determined after harvest.

The results showed that the growth of *Iris germanica* L. was inhibited over 5 mg/kg Cd concentration, i. e., decreasing in the biomass, tiller number and leaf area. The flowering stage was prolonged under less than 10 mg/kg Cd concentration, while the extension of green stage was observed under less than 1 mg/kg Cd concentration. Cd stress reduced net photosynthesis rate and transpiration rate of *Iris germanica* L.. With increasing Cd concentration of the medium, root activity, chlorophyll and water contents all decreased, free proline and soluble sugar contents increased and then decreased, while the permeability of cell membrane ascended gradually. In the present study, the accumulator factor of Cd in *Iris germanica* L. was over 1.0, the accumulation of Cd in root of *Iris germanica* L. was greater than in shoot. Cd concentration

基金项目: 环保公益性行业科研专项资助(200809047)

收稿日期: 2011-12-25; 修订日期: 2012-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chwf@sdaa.edu.cn

in *Iris germanica* L. increased gradually with increasing Cd concentration of the medium, while accumulative factor and translocation factor decreased. The maximum accumulation of Cd in *Iris germanica* L. was 2.122 mg/plant at applied Cd level of 20 mg/kg. Cd stress suppressed cell differentiation, decreased the photosynthesis and transpiration, destroyed the internal environment of *Iris germanica* L. The damage of *Iris germanica* L. at low Cd concentration was effectively alleviated by the accumulation of both free proline and soluble sugar. It could be concluded that *Iris germanica* L. was suitable for the remediation of Cd polluted soil when Cd concentration in soil was less than 5.0 mg/kg.

Key Words: *Iris germanica* L.; Cd; physiological-ecological responses; accumulation

Cd 是一种对环境危害大且生物非必需的元素,不仅会导致土壤正常的功能失调、质量下降,而且会对植物产生毒害^[1]。城市工业和交通的日益发达使越来越多的 Cd 释放到环境中并在土壤中大量积累,城市土壤 Cd 污染的治理已相当紧迫^[2-3]。植物修复技术以其安全、廉价等众多优点成为学术界研究的热点^[4],目前已经发现的超富集植物一般生长缓慢、Cd 迁移总量相对不高且园林观赏价值一般,难以在城市地区大量应用^[5]。利用地被植物修复城市土壤 Cd 污染,不仅可以净化土壤,而且可以获得景观和生态效应。

德国鸢尾(*Iris germanica* L.)是鸢尾科鸢尾属多年生宿根花卉,是在鸢尾的基础上,经过处理的杂交矮生品种,其形态优美、花色艳丽、适应性强、管理粗放,作为城市节约型绿化的重要地被材料被广泛应用^[6]。目前对德国鸢尾的研究主要集中在分类育种^[7]、繁育^[8]及抗旱性^[9]等方面,关于 Cd 胁迫方面的研究鲜有报道。本文研究了德国鸢尾在不同浓度 Cd 胁迫下的生长状况、生态效应、生理特性、吸收和富集 Cd 的能力,旨在为德国鸢尾在城市特别是 Cd 污染地区的园林应用提供参考,探讨 Cd 对德国鸢尾的伤害机理及德国鸢尾在 Cd 污染土壤修复中的应用潜力。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试德国鸢尾由泰安恒源大地景观工程有限公司提供。供试土壤取自泰安周边地区,褐土,pH 值 7.0,有机质 10.5 g/kg,全氮 0.65 g/kg,速效钾 0.032 g/kg,速效磷 0.032 g/kg,Cd 0.083 mg/kg。Cd 添加形式为 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,分析纯。

1.2 试验方法

室外盆栽试验于 2010 年 9 月至 2011 年 6 月份在山东农业大学实验基地进行。土壤风干后过 1 cm 筛,拌入 5% 质量草炭作基肥,充分混合后装入下口直径 16.5 cm、上口直径 21 cm、高 22 cm 的塑料盆中,每盆装土 5.5 kg。试验以不使用 Cd 处理作为对照,Cd 所设浓度梯度为:0.5、1、5、10、20 mg/kg(含背景值,以 Cd^{2+} 计),每个处理 3 次重复。

按预先设置的浓度于每盆中添加 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 并混合均匀,喷施清水平衡 3 周后从苗床上小心移取长势大小均一致的德国鸢尾幼苗,用蒸馏水洗净根系泥土,去除地上部分后移植于盆中,进行正常养护管理,保持土壤含水量为其田间持水量的 60%。试验期间每月取德国鸢尾根际土壤测定 Cd 浓度,根据测定结果补充 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,使土壤 Cd 维持在试验所设浓度,避免各处理下的土壤 Cd 浓度随着试验进程下降,难以进行关联分析;同时可以更加准确地模拟城市土壤 Cd 污染特征。补充方法为将 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶于 100 mL 蒸馏水并浇灌进入盆土。

2010 年 9 月 28 日移栽后每隔 10 d 用尺子直接量取株高直至株高不再随时间增长,株高为德国鸢尾最顶端到地面的垂直高度;试验期间观测德国鸢尾花期和绿期长短,以花序完全舒展开为开花期、花序枯黄为谢花期,以叶片完全枯黄为枯黄期、春季长出新叶为返青期。

2011 年 6 月 2 日,德国鸢尾谢花期后。使用 CB1102 型光合蒸腾仪在晴朗无风的条件下不离体测定德国鸢尾同一部位成熟叶片的净光合速率和蒸腾速率,从 8:00 到 18:00 每隔 2 h 测定 1 次。晚上的暗呼吸量按白

天同化量的 20% 计^[10], 计算单位面积叶片日净同化量(P)、日固定 CO_2 量(W_{CO_2})和释放 O_2 量(W_{O_2}), 单位面积叶片日蒸腾总量(E)、蒸腾使周围空气降温量(ΔT)和绝对湿度增加量(Δa)。

2011 年 6 月 28 日测定倒 3 片功能叶叶面积(采用美国 LI-COR 公司产 LI-3000A 型便携式叶面积测定仪测定);取成熟鲜叶片测定生理指标、取根系测定根系活力,然后将德国鸢尾分为地上部分和根系两组收获,用蒸馏水冲洗干净,测定分蘖数后沥去水分,105℃ 杀青 30 min。之后在 70℃ 下烘干至衡重,分别测定地上部分和根系干重作为生物量。磨碎,过 60 目筛,测定 Cd 含量并计算富集系数、转运系数。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质按土壤农化常规分析法测定^[11]。

生理指标的测定按邹琦的方法^[12]:含水量使用烘干称重法测定;细胞膜透性使用电导法测定;叶绿素含量使用丙酮提取,721 型分光光度计测定;游离脯氨酸含量使用磺基水杨酸提取法测定;可溶性糖含量使用蒽酮比色法测定;根系活力用 TTC 法测定。

植株 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化,原子吸收分光光度计测定^[11]。

1.4 数据分析

所有测定均设置 3 次重复,使用 Microsoft Excel 计算平均值;用 SAS 数据分析软件进行标准差运算和差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。

$$P = \sum \left[\frac{(p_i + p_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times \frac{3600}{1000} \right]$$

式中, P_i 为初测点瞬时净光合速率, P_{i+1} 为下一点净光合速率。

W_{CO_2} 和 W_{O_2} 的计算按刘维东的方法^[10]。

$$E = \sum \left[\frac{(e_i + e_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times \frac{3600}{1000} \right]$$

式中, e_i 为初测点瞬时蒸腾速率, e_{i+1} 为下一点蒸腾速率。

ΔT 和 Δa 的计算按杨士弘的方法^[13]。

富集系数=植物地上部分或根系 Cd 积累浓度/土壤中 Cd 浓度^[14](式中土壤中 Cd 浓度=试验期间添加 Cd 的总量/盆土质量)。

转运系数=地上部分 Cd 积累浓度/根系 Cd 积累浓度^[15]。

积累量=植物地上部分或根系 Cd 积累浓度×地上部分或根系生物量。

2 结果与分析

2.1 Cd 对德国鸢尾生长的影响

Cd 浓度小于 5 mg/kg 时对德国鸢尾株高增长影响不大;大于 5 mg/kg 时抑制了德国鸢尾的株高增长(图 1)。Cd 浓度小于 1 mg/kg 时德国鸢尾 20 d 到 40 d 之间的株高高于对照,50 d 时的株高与对照相近。Cd 浓度为 5 mg/kg 时德国鸢尾整个生育期株高与对照相近。Cd 浓度大于 10 mg/kg 时德国鸢尾 20 d 后株高低于对照,生长受到抑制。

Cd 浓度小于 5 mg/kg 时叶面积高于对照且不同浓度 Cd 处理间差异不显著,Cd 浓度大于 5 mg/kg 时随着浓度增大叶面积迅速降低。分蘖数随着 Cd 浓度的增

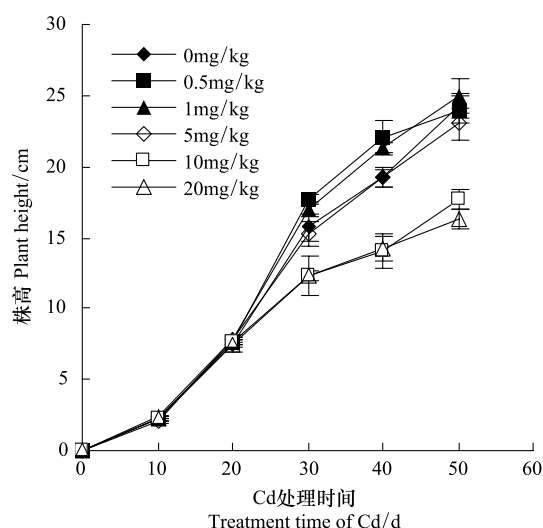


图 1 Cd 处理下德国鸢尾株高

Fig. 1 Plant height of *Iris germanica* L. under different Cd treatments

大逐渐降低但与对照差异不显著。生物量随着 Cd 浓度的增大先缓慢降低后迅速降低,Cd 浓度为 0.5 mg/kg 时与对照差异不显著,大于 10 mg/kg 时显著低于对照。Cd 浓度小于 1 mg/kg 时德国鸢尾绿期延长,小于 10 mg/kg 时花期延长,其中 Cd 浓度为 1 mg/kg 时绿期和花期均达到最大值,分别较对照延长 11 d 和 5 d。Cd 对德国鸢尾生长状况的影响呈现浓度效应:Cd 浓度小于 5 mg/kg 时影响不大,大于 10 mg/kg 时显著抑制德国鸢尾生长(表 1)。

表 1 Cd 处理下德国鸢尾的生长状况
Table 1 Growth of *Iris germanica* L. under different Cd treatments

Cd 浓度 Cd concentration /(mg/kg)	叶面积 Leaf area /(cm ²)	分蘖数 Tiller number	地上生物量 Aboveground biomass/g	根系生物量 Root biomass/g	绿期 Green stage/d	花期 Flowering stage/d
0	53.3±0.65ab	5.3±0.33a	16.9±0.7a	19.0±1.19a	258±1.76b	16±0.58b
0.5	63.1±1.72a	5.3±0.67a	16.8±1.23a	17.9±0.35a	266±0.88a	21±0.88a
1	56.6±1.13a	5.0±0.58a	16.2±0.29ab	17.8±0.35a	269±1.33a	21±0.67a
5	59.2±3.95a	4.7±0.88a	15.4±0.30ab	16.8±0.43ab	255±2.17b	21±0.88a
10	46.2±6.20bc	3.7±0.33a	14.0±0.39b	14.9±0.29b	243±2.73c	17±0.67b
20	37.7±1.30c	3.7±0.33a	11.5±0.66c	11.7±1.15c	238±1.45c	15±0.67b

表中数值为平均值±标准误差,同列数据中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

2.2 Cd 对德国鸢尾光合和蒸腾的影响

Cd 对德国鸢尾 8:00 和 18:00 的瞬时净光合速率影响不大,但降低了德国鸢尾 8:00—18:00 之间的净光合速率(图 2)。Cd 浓度为 0.5 mg/kg 时净光合速率随时间的变化与对照相近,但 12:00—16:00 间的净光合速率低于对照;Cd 浓度大于 1 mg/kg 时,净光合速率低于对照且随着浓度的增大降低;Cd 浓度大于 10 mg/kg 时,不同浓度 Cd 处理间净光合速率变化曲线相近但低于其他处理。

Cd 降低了德国鸢尾全天的蒸腾速率,随着 Cd 浓度的增大蒸腾速率降低。Cd 浓度小于 5 mg/kg 时,德国鸢尾 14:00 前的蒸腾速率变化曲线与对照相近,14:00 后的蒸腾速率低于对照;Cd 浓度大于 10 mg/kg 时,不同浓度 Cd 处理间蒸腾速率变化曲线相近但低于其他处理。

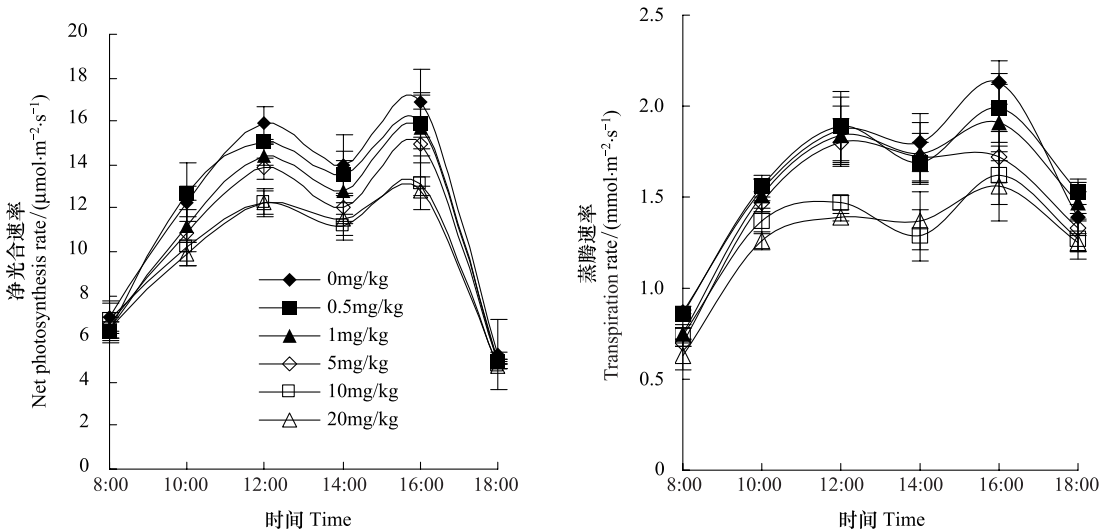


图 2 Cd 处理下德国鸢尾的净光合速率和蒸腾速率日变化

Fig. 2 Diurnal changes of net photosynthesis and transpiration rates of *Iris germanica* L. under different Cd treatments

Cd 降低了德国鸢尾的单位叶面积净同化量和蒸腾量,使德国鸢尾吸碳、释氧、降温、增湿等生态效应均低于对照(表 2)。所有浓度 Cd 处理的德国鸢尾吸碳、释氧量均明显低于对照,Cd 浓度小于 1 mg/kg 时蒸腾作用导致的周围空气降温量和绝对湿度增加量与对照差异不显著,可见低浓度 Cd 对德国鸢尾光合的抑制较蒸

腾强烈。随着 Cd 浓度的增大,德国鸢尾的生态效应逐渐降低,Cd 浓度为 20 mg/kg 时单位面积叶片日净同化量和日蒸腾总量均最低,分别为对照的 80.0% 和 77.0%,可见高浓度 Cd 对德国鸢尾光合和蒸腾的抑制程度相近。

表 2 Cd 处理下德国鸢尾的生态效应变化

Table 2 Changes of ecological benefits of <i>Iris germanica</i> L. under different Cd treatments						
Cd 浓度 Cd concentration /(mg/kg)	单位面积叶片 日净同化量 P /(μmol)	单位面积叶片 日吸碳量 W_{CO_2}/g	单位面积叶片 日释氧量 W_{O_2}/g	单位面积叶片 日蒸腾量 E/mol	单位面积叶片 日降温量 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	单位面积叶片 日增湿量 $\Delta a/(g/m^3)$
0	469.03±26.40a	16.51±0.93a	12.00±0.68a	61.03±2.25a	2.15±0.08a	1.10±0.04a
0.5	452.80±12.88ab	15.94±0.45ab	11.59±0.33ab	59.99±1.27a	2.11±0.05a	1.08±0.02a
1	430.49±7.75ab	15.15±0.27ab	11.02±0.20ab	58.46±2.43a	2.06±0.09a	1.05±0.04a
5	414.37±21.55bc	14.59±0.76bc	10.61±0.55bc	55.68±4.11ab	1.96±0.14ab	1.00±0.08ab
10	378.90±8.17c	13.34±0.29c	9.70±0.21c	48.72±2.05b	1.71±0.07bc	0.88±0.04b
20	375.25±5.82c	13.21±0.20c	9.60±0.15c	46.97±1.33b	1.65±0.05c	0.85±0.02b

表中数值为平均值±标准误差,同列数据中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

2.3 Cd 对德国鸢尾生理指标的影响

Cd 处理下德国鸢尾叶片叶绿素含量和根系活力低于对照,叶绿素 a/b 和含水量低于对照但差异不显著,细胞膜透性显著高于对照(表 3)。随着 Cd 浓度的增大,叶绿素含量逐渐降低,叶绿素 a/b、根系活力和含水量也呈逐渐降低的趋势,细胞膜透性逐渐升高,游离脯氨酸和可溶性糖含量先升高后降低。Cd 浓度为 0.5 mg/kg 时根系活力和游离脯氨酸含量与对照相近;Cd 浓度在 1 mg/kg—10 mg/kg 之间时,不同处理间叶绿素含量、根系活力、细胞膜透性和可溶性糖含量差异不显著;Cd 浓度为 5 mg/kg 时游离脯氨酸和可溶性糖含量均最高,Cd 浓度为 20 mg/kg 时叶绿素含量最低,为对照的 74.0%;细胞膜透性最大,为对照的 3.2 倍;可溶性糖含量低于对照。

表 3 Cd 处理下德国鸢尾部分生理指标的变化

Table 3 Physiological indexes of <i>Iris germanica</i> L. under different Cd treatments							
Cd 浓度 Cd concentration /(mg/kg)	叶绿素 a/b The chlorophyll a/b	叶绿素含量 The chlorophyll content/(mg/g)	根系活力 The root activity /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	细胞膜透性 The permeability of cell membrane	含水量 The water content /%	游离脯 氨酸含量 The free proline content/($\mu\text{g/g}$)	可溶性糖含量 The soluble sugar content /($\mu\text{g/g}$)
0	3.01±0.38a	2.00±0.02a	9.41±0.25a	0.15±0.03c	83.7±0.54a	144.4±3.53b	1788.4±160.93bc
0.5	2.91±0.40a	1.86±0.04ab	9.23±0.52a	0.25±0.04b	83.0±0.48a	170.8±13.37b	2079.4±237.55b
1	2.77±0.06a	1.80±0.16ab	8.10±0.16b	0.26±0.01b	80.9±0.50a	209.2±5.58a	2549.1±44.85a
5	2.69±0.33a	1.78±0.11ab	8.11±0.23b	0.27±0.03b	81.2±0.34a	213.1±8.89a	2716.4±47.53a
10	2.73±0.34a	1.62±0.32ab	7.70±0.07b	0.33±0.04b	78.6±6.01a	161.0±20.37b	2598.3±185.91a
20	2.43±0.31a	1.48±0.03b	7.40±0.2b	0.48±0.01a	77.7±3.5a	150.7±13.12b	1610.7±52.46c

表中数值为平均值±标准误差,同列数据中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

2.4 Cd 在德国鸢尾体内的积累和分布情况

德国鸢尾地上部分和根系的 Cd 积累浓度和积累量随着 Cd 浓度的增大逐渐升高,Cd 浓度相同时根系积累浓度和积累量高于地上部分(表 4)。Cd 浓度为 20 mg/kg 时德国鸢尾体内 Cd 积累量最大,为 2.122 mg/株。德国鸢尾根系和地上部分对 Cd 的富集系数均大于 1.0,随着 Cd 浓度的增大,德国鸢尾根系和地上部分对 Cd 的富集系数均逐渐降低,转运系数逐渐降低。

3 讨论

生长状况决定了地被植物的景观效益。本试验低浓度 Cd 对德国鸢尾生长影响不大,高浓度 Cd 抑制德国鸢尾生长,与周守标对菰和菖蒲的研究结果一致^[16]。Cd 胁迫会打破植物细胞内活性氧产生与清除之间的

平衡,导致膜脂过氧化和脱脂化作用从而破坏细胞膜结构^[17],使膜透性增大、内部环境的稳定性降低(表3),进而对植物体造成伤害。Cd 浓度小于 5 mg/kg 时德国鸢尾生长状况与对照相近(图1,表1),可见耐性较强、适用于土壤修复,原因是游离脯氨酸和可溶性糖等逆境保护性物质的积累缓解了低浓度 Cd 的伤害(表3)。游离脯氨酸可以清除活性氧^[18]并和可溶性糖共同调节渗透平衡^[19]。本试验 Cd 胁迫下德国鸢尾分蘖数降低的原因是 Cd 与 Ca 竞争,影响 Ca 调素的活性进而影响细胞分裂。同时 Cd 能与带负电的核酸结合,破坏核仁结构,抑制 DNase 和 RNase 活性,使细胞分化受阻^[20]。德国鸢尾不同部位对 Cd 胁迫的敏感性不同,Cd 浓度为 20 mg/kg 时地上部分和根系生物量分别为对照的 68.0% 和 61.6% (表1),可见 Cd 对德国鸢尾根系生长的抑制较地上部分强烈。Cd 浓度小于 1 mg/kg 时德国鸢尾绿期延长、小于 10 mg/kg 时花期延长(表1),可见 Cd 可以一定程度上提高德国鸢尾的景观质量。绿期延长的原因是 Cd 胁迫下细胞活性的降低和逆境保护性物质的积累增强了德国鸢尾的抗寒性,花期延长的原因可能是 Cd 引起德国鸢尾激素调节紊乱^[21]使其提前进入生殖生长阶段。

表4 Cd 在德国鸢尾体内的积累和分布情况

Table 4 Accumulation and distribution of Cd in *Iris germanica* L.

Cd 浓度 Cd concentration /(mg/kg)	Cd 积累浓度 Cd concentration /(mg/kg)		富集系数 Accumulator factor		转运系数 Translocation factor	Cd 积累量 Cd accumulation /(μg/株)	
	地上部分 Shoot	根系 Root	地上部分 Shoot	根系 Root		地上部分 Shoot	根系 Root
0	0.57±0.04f	0.71±0.02f	6.83±0.44a	8.55±0.25a	0.80±0.03a	9.62±1.02d	13.45±0.76d
0.5	2.59±0.06e	3.87±0.05e	5.19±0.12b	7.73±0.10b	0.67±0.01b	43.79±4.11d	69.31±0.52d
1	4.93±0.11d	7.56±0.18d	4.93±0.11b	7.56±0.18bc	0.65±0.06bc	79.86±3.19d	134.45±2.12d
5	20.98±0.86c	35.22±0.86c	4.20±0.17c	7.04±0.17c	0.6±0.03cd	319.89±33.80c	591.21±29.15c
10	27.78±1.14b	64.10±0.59b	3.68±0.11cd	6.41±0.06d	0.57±0.02de	404.42±1.79b	952.82±18.24b
20	63.22±0.38a	119.68±1.59a	3.16±0.02d	5.98±0.08d	0.53±0.01e	724.57±38.60a	1397.98±128.14a

表中数值为平均值±标准误差,同列数据中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

生态效应是地被植物选择与应用的重要依据。本试验 Cd 胁迫下德国鸢尾净光合速率和蒸腾速率均降低,与马新明^[22]对烤烟的研究结果一致。净光合速率的降低导致吸碳、释氧量降低,蒸腾速率的降低导致降温、增湿量降低(表2)。本试验 Cd 胁迫下德国鸢尾叶片失水使保卫细胞膨压降低^[23],引起气孔关闭、净光合速率和蒸腾速率降低。在光合作用的过程中,叶绿素 b 主要进行光能的收集,叶绿素 a 主要进行光能的转化,叶绿素 a/b 值越高,则植物对光能的利用效率越高^[24]。本试验低浓度 Cd 对光合的抑制较蒸腾强烈,可见叶绿素含量和光能利用效率降低等非气孔因素是德国鸢尾净光合速率降低的主要原因。叶绿素含量降低的主要原因是叶绿体片层中捕光 Chla/b-Pro 复合体合成受抑制,同时 Cd 抑制叶绿素合成相关酶(原叶绿素酯还原酶、 δ -氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)的活性从而阻碍叶绿素的合成^[25]。光能利用效率降低的原因是 Cd 胁迫下光合合成单位及膜结合电子传递进程被破坏,导致 PSI 和 PSII 电子传递速率降低^[26];同时电子传递速率降低使反应中心激发的电子有更多传递给氧气的机会,这可能是导致植株体内活性氧积累的原因。Cd 浓度为 20 mg/kg 时净同化量和蒸腾量降低程度相近(表2),可见高浓度 Cd 主要通过气孔因素抑制德国鸢尾的光合作用。

Cd 累积能力的大小是修复物种选择与应用的重要指标。本试验 Cd 浓度为 20 mg/kg 时德国鸢尾地上部分对 Cd 的积累浓度最大,为 63.22 mg/kg(表4),未达到超富集植物的标准^[27]。随着 Cd 浓度的增大,德国鸢尾对 Cd 的富集系数逐渐降低,原因是 Cd 与琥珀酸脱氢酶结合降低了根系呼吸作用^[28],导致根系活力降低(表3),抑制对 Cd 的吸收。德国鸢尾体内 Cd 分布格局为根系>地上部分,将有害离子积累于根部是植物阻止其对光合作用及新陈代谢活性毒害的一种策略^[29],此策略是 Cd 对德国鸢尾根系生长的抑制较地上部分强烈的原因之一。随着 Cd 浓度的增大,德国鸢尾对 Cd 的转运系数逐渐降低,Cd 在植物体内的运输是借 ATPase(adenosine triphosphate enzyme,ATP 酶)等的主动运输方式,随着 Cd 浓度的增大,ATPase 活性降低抑

制了 Cd 由根系向地上部分的转运。

由以上分析可知;Cd 胁迫抑制了德国鸢尾的细胞分化、降低了光合和蒸腾作用,破坏了内环境的稳定性,使德国鸢尾的景观质量和生态效应降低;德国鸢尾对低浓度 Cd 有较强的耐性,适用于浓度小于 5 mg/kg 的 Cd 污染土壤的修复。低浓度 Cd 可以延长德国鸢尾的绿期和花期。德国鸢尾对 Cd 的积累能力一般且主要积累在根部,随着 Cd 浓度的增大德国鸢尾对 Cd 的富集系数和转运系数逐渐降低。

致谢:感谢李永强老师、李成亮老师对室内分析和写作给予的帮助。

References:

- [1] Moya J I, Ros R, Picazo I. Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthesis Research*, 1993, 36(2): 75-80.
- [2] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, Zhang B. Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 123-126.
- [3] Li Z P, Chen Y C, Yang X C, Wei S Q. Heavy Metals Contamination of Street Dusts in Core Zone of Chongqing Municipalit. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 114-116.
- [4] Zhou Q X, Wei S H, Diao C Y. Basic principles and researching progresses in ecological remediation of contaminated soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 419-424.
- [5] Wang Q R, Cui Y S, Dong Y T. Phytoremediation-An effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 326-331.
- [6] Wang Q P. Study on Cultivars Ecological Evaluation and Fertilization and Weeding Control of Tall Bearded Iris [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007.
- [7] Huang S Z. Studies on Evaluation and Germplasm Innovation for Some Plant Resources of *Iris* L. [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004.
- [8] Guo J Y, Zhang J Z, Sun G F, Shi L. Effects of 6-BA Application on Promotion of Offset Formation in *Iris germanica*. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(2): 461-464.
- [9] Zhou Y. Studies on the Drought Resistance of 7 Iris Species [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2006.
- [10] Liu W D. Studies on Ecological Effect and Selection of Roof Greening Plants in Chengdu City [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2006.
- [11] Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] Zou Q. The Experimental Guide for Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] Yang S H. Urban Eco-environmental Science. Beijing: Science Press, 2003: 161-164.
- [14] Chamberlain A C. Fallout of lead and uptake by crops. *Atmospheric Environment*, 1983, 17(4): 693-706.
- [15] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metal lophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytologist*, 1994, 127(1): 61-68.
- [16] Zhou S B, Wang C J, Yang H J, Bi D, Li J H, Wang Y. Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 281-287.
- [17] Yan A L, Wu T T, Wang Y B, Zhang X Q. The characteristics of cadmium tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [18] Smimoff N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytologist*, 1993, 125(1): 27-58.
- [19] Chen Y, Burris J S. Role of carbohydrates in desiccation tolerance and membrane behavior in maturing maize seed. *Corp Science*, 1990, 30(5): 971-975.
- [20] Romanowska E, Wróblewska B, Drożak A, Zienkiewicz M, Siedlecka M. Effect of Pb ions on superoxide dismutase and catalase activities in leaves of pea plants grown in high and low irradiance. *Biologia Plantarum*, 2008, 52(1): 80-86.
- [21] Wu K, Wu Z H, Tai F J, Han Y, Xie B E, Yuan Z L. Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4517-4524.
- [22] Ma X M, Li C M, Tian Z Q, Yuan Z L. Effects of Cd pollution on photosynthetic characteristics, yield and quality of tobacco leaves. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4039-4044.
- [23] Cai H X, Wu F Z, Yang W Q. Effects of drought stress on the photosynthesis of *Salix paraqulesia* and *Hippophae rhamnoides* seedlings. *Acta*

Ecologica Sinica, 2011, 31(9): 2430-2436.

- [24] Huff A. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogen peroxide. *Phytochemistry*, 1982, 21(2): 261-265.
- [25] Somashekaraiah B V, Padamajae K, Prasad A R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgarize*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation. *Plant Physiology*, 1992, 85(1): 85-89.
- [26] Biehler K, Migge A, Fock H P. The role of malate dehydrogenase in dissipating excess energy under water stress in two wheat species. *Photosynthetica*, 1996, 32(3): 431-438.
- [27] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, 1(2): 81-126.
- [28] Bernal M P, McGrath S P. Effects of PH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *allyssum murale* and *raphanus sativus* L. *Plant and Soil*, 1994, 116(1): 83-92.
- [29] Zurayk R, Sukkariyah B, Baalbaki R. Common hydrophytes as bioindicators of nickel, chromium and cadmium pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 127(1/4): 373-388.

参考文献:

- [2] 卢琰, 龚子同, 张甘霖, 张波. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123-126.
- [3] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 魏世强. 重庆市主城区街道地表物中重金属的污染特征. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 114-116.
- [4] 周启星, 魏树和, 刁春燕. 污染土壤生态修复基本原理及研究进展. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 419-424.
- [5] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复-重金属污染土壤整治有效途径. *生态学报*, 2001, 21(2): 326-331.
- [6] 王清萍. 高型有髯鸢尾品种生态评价及其施肥、除草技术研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [7] 黄苏珍. 鸢尾属(*Iris* L.) 部分植物资源评价及种质创新研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
- [8] 郭晋燕, 张金政, 孙国峰, 石雷. 喷施 6-BA 促进德国鸢尾根茎芽的萌发. *园艺学报*, 2007, 34(2): 461-464.
- [9] 周源. 七种鸢尾的抗旱性研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2006.
- [10] 刘维东. 成都市屋顶绿化植物的选择及其生态效益研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2006.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 杨士弘. 城市生态环境学. 北京: 科学出版社, 2003: 161-164.
- [16] 周守标, 王春景, 杨海军, 毕德, 李金花, 王影. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. *生态学报*, 2007, 27(1): 281-287.
- [17] 燕傲蕾, 吴亭亭, 王友保, 张旭情. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性. *生态学报*, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [21] 吴坤, 吴中红, 邵付菊, 韩莹, 谢宝恩, 袁祖丽. 镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响. *生态学报*, 2011, 31(16): 4517-4524.
- [22] 马新明, 李春明, 田志强, 袁祖丽. 镉污染对烤烟光合特性、产量及其品质的影响. *生态学报*, 2006, 26(12): 4039-4044.
- [23] 蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤. 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响. *生态学报*, 2011, 31(9): 2430-2436.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyong, et al (2314)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元