

复合重金属胁迫对高羊茅生长发育的影响

付鸿博¹,于斯嘉²,孙 晶¹,张冬雪¹,范爱国¹

(1. 黑龙江省农业科学院 浆果研究所,黑龙江 绥棱 152204;2. 吉林省东辽县平岗农业技术推广站,吉林 东辽 136600)

摘要:草坪植物作为重要的园林地被植物,在园林绿化中应用广泛,目前是应用面积最大的一类草本植物,同时,草本植物通常是水土保持及恢复的先锋植物。为使重金属污染区得到有效治理,选取高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)作为研究对象,在重金属胁迫下进行栽培试验,对地上部分的生物量以及叶片叶绿素含量进行研究。结果表明:随着处理浓度的升高镉单一胁迫和复合胁迫对高羊茅地上干重的抑制作用明显,而锌单一胁迫表现为促进作用但效果不明显;所有处理浓度中镉单一胁迫下高羊茅的地上干重都明显小于锌单一胁迫,镉对高羊茅地上干重的影响明显高于锌;复合胁迫中,因浓度的变化镉和锌对高羊茅叶绿素含量和地上干重的作用也发生变化;三种胁迫下都是浓度在 50 mg·L⁻¹ 时高羊茅叶绿素含量达到最大值;对于高羊茅叶绿素含量的影响镉、锌复合起到了协同作用。

关键词:高羊茅;复合胁迫;浓度;叶绿素;干重

中图分类号:S543⁺.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2016)12-0110-05 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2016.12.0110

土壤重金属污染近些年在世界范围内已成为一个日趋严峻的问题,土壤重金属污染虽然是以某一种重金属元素污染为主,但因释放到环境中的重金属途径较多、种类也较多,因此土壤中重金属污染表现为复合形式也较为常见^[1-3],而复合重金属又会出现协同、加和、拮抗等作用^[4],对于研究治理土壤重金属复合污染已经成为急需解决的问题^[2]。镉是对人类有剧毒的污染元素,锌是微量营养元素但同时又是污染元素,镉和锌在植物体中具有交互作用^[5-7]。高羊茅植株高大、粗壮。成坪速度快,耐粗放管理,具有广泛的生态适应性,

收稿日期:2016-12-01
第一作者简介:付鸿博(1987-),男,吉林省通化市人,硕士,研究实习员,从事果树研究。E-mail:113311168@qq.com。

Physiological Responses of Fourteen *Lolium perenne* Specieses of Seeding Stage to Drought Stress

PANG Ding-ming¹, LIANG Dan-ni¹, WEI Xiao-yan¹, LAN Jian^{1,2,3}

(1. Grassland Institute of Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract: In order to screen the *Lolium multiflorum* L., varieties with drought resistance ability, the effects of chlorophyll (Chl), superoxide dismutase (SOD), malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) physiological biochemical indexes on drought stress of 14 *Lolium multiflorum* L. were studied. The comprehensive evaluation of drought tolerance was carried out by using the membership function, which provided scientific basis for the establishment of turf in arid area. The results showed that the chlorophyll (Chl) content and superoxide dismutase (SOD) activity increased first and then decreased, and the content of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) increased during the drought stress. The order of drought tolerance was: Raytheon 4>Goalkeeper>Qimeng>Quanshun>Caddysand>Pickwick>Accent>Tianma>Jinpaimeidali>Fairway>Debeijipin>Tornado>Doctor>Newspeed2.

Keywords: *Lolium multiflorum* L.; seedling stage; physiological and biochemical index

耐热性强,夏季不休眠,是一种应用广泛且性状优良的草坪植物,同时高羊茅对重金属具有一定的耐受能力^[8-10]。采用盆栽试验研究单一污染和复合污染对高羊茅叶绿素及地上部分生长情况的影响,用来判断高羊茅对镉、锌污染的响应。

1 材料与方法

1.1 材料

植物材料为高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)。

试验所用仪器有鼓风干燥箱、紫外可见分光光度计、分析天平,药品及其它材料有外源污染物分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,栽培试验选用园土、草炭(2:1)配制的培养土。

1.2 方法

试验设镉、锌单一、钙和锌复合重金属污染土壤以及对照 3 种处理。对照组即用不加外源污染物的培养土,单一重金属胁迫即在培养土中加入单一的 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 和单一的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,复合重金属胁迫即在培养土中同时加入 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。试验分为 9 个不同浓度处理,分别为对照组、5、10、50、100、200、300、450、600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每个处理做 3 次重复试验。

1.2.1 重金属胁迫对高羊茅叶绿素含量的影响

叶绿素含量采用丙酮法进行测定。取样量 1 g 左右,叶片用蒸馏水反复冲洗干净后用滤纸吸干水分,与少量石英砂置于研钵,加入丙酮研磨成匀浆,过滤后用丙酮定容,将叶绿素提取液倒入光径 1 cm 的比色皿中,用紫外分光光度计在波长 645 和 663 nm 下进行比色测定,以丙酮做空白对照组。

Cr 总叶绿素的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) = $8.02\text{OD}_{663} + 20.21\text{OD}_{645}$

1.2.2 重金属胁迫对高羊茅生长量的影响 土壤采用园土和草炭(V:V=2:1)的混合物,土壤经过晾晒、锤碎及过筛混匀,盆规格为 20 cm×15 cm×20 cm(上径×下径×高度)的塑料盆,每盆土重 1.5 kg,混入不同浓度的重金属,搅拌均匀。每盆播种 100 粒草坪种子。塑料盆下敷水盘,播种后每隔一天补充 150 mL 淡水。120 d 后全部收获,收取地上茎叶部分,用自来水反复冲洗干净,清除粘附在植物上的泥土和杂物等,随后去离子水再反复冲洗干净,置于鼓风干燥箱内,先在

105 ℃下杀青 15 min,然后在 70 ℃下于烘箱中 24 h 烘至恒重,测定地上部分干重。

1.2.3 统计分析 所有试验数据运用 Microsoft Office Excel 2003 软件进行处理,The SAS System for Windows V8 软件的 ANOVA 过程进行差异显著性分析和 *t* 检验(LSD)。

2 结果与分析

2.1 不同浓度重金属胁迫对高羊茅地上部分干重的影响

从表 1 可知,随着处理浓度的不断增加,镉单一胁迫、锌单一胁迫及复合胁迫对高羊茅地上干重的影响变化不同。其中:镉胁迫下随着浓度的不断升高,高羊茅地上干重呈下降的趋势并均小于对照组,各个浓度下的镉胁迫均对高羊茅植株生长起到了抑制的作用,浓度在 10~600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与对照组有显著性差异($P < 0.05$),并且当浓度达到 600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时差异最显著($P < 0.05$),在这个浓度下镉胁迫对高羊茅植株生长的抑制最为明显;锌胁迫下随着浓度的不断升高,高羊茅地上干重总体呈现上升的趋势但是变化幅度不大,在各个浓度下的高羊茅的地上干重虽然都大于对照组

表 1 不同浓度重金属胁迫下高羊茅地上干重
Table 1 Dry weight on the ground of *Festuca arundinacea* Schreb. under different heavy metal concentrations

浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Concentration	干重/g Dry weight		
	镉 Cadmium	锌 Zinc	复合 Combined
0	6.11±1.50 a	6.11±1.50 a	6.11±1.50 a
5	5.12±0.17 ab	6.61±0.12 a	5.45±0.19 ab
10	4.64±0.68 bc	6.17±0.16 a	5.09±1.19 abc
50	3.75±0.92 cd	6.31±0.35 a	5.01±0.71 abc
100	3.61±0.40 cd	6.24±0.81 a	4.98±0.49 abc
200	3.33±0.55 de	6.60±0.55 a	4.78±0.57 abc
300	3.38±0.80 d	6.28±0.15 a	4.60±1.33 abc
450	2.10±0.05 ef	6.43±1.83 a	4.25±0.37 bc
600	1.79±0.32 f	6.84±1.78 a	3.62±0.78 c

表中的数值为平均数±标准差(n=3),同一列中不同的小写字母表示处理间差异显著(*t* 检验, $P < 0.05$)。下同。

The value in the table is the average ± standard deviation(n=3), in the same column different lowercases mean significant difference between treatments (*t* test, $P < 0.05$). The same below.

但与对照组均无显著性差异($P<0.05$), 锌胁迫对高羊茅植株生长虽有一定的促进作用但影响很小; 在镉、锌复合胁迫下随着浓度的不断升高, 高羊茅地上干重呈下降的趋势并低于对照组, 各个浓度都对高羊茅植株生长起到了一定的抑制作用, 浓度在 $5\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时与对照组无显著性差异($P<0.05$), 虽然在这个浓度范围内有一定的抑制作用, 但抑制效果并不明显, 浓度在 450 和 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时与对照组出现了显著性差异($P<0.05$), 在这两个浓度下对高羊茅地上植株生长抑制的作用明显。

2.2 不同浓度重金属对高羊茅叶绿素含量的影响

从表 2 看出, 随着处理浓度的不断增加, 镉单一胁迫、锌单一胁迫及复合胁迫对高羊茅叶绿素的影响变化不同。其中: 镉胁迫下随着浓度的不断升高, 高羊茅叶绿素是先升高后下降的变化趋势, 浓度在 $5\sim100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理中的高羊茅的叶绿素含量要大于对照组, 并且浓度在 $0\sim50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 随着浓度升高叶绿素含量不断升高, 浓度在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到了峰值并且与对照组有显著性差异($P<0.05$), 在这个浓度下促进的作用较为明显, 到达峰值后, 随着镉浓度的持续升高, 叶绿素含量开始回落并逐渐下降, 浓度到 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以后叶绿素含量低于对照组; 锌胁迫下随着浓度的不断升高高羊茅叶绿素总体变化与镉胁迫略有相同, 浓度在 $5\sim50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随着浓度升高叶绿素含量不断升高, 并且也是在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 到达峰值, 随着浓度的再不断升高叶绿素含量出现一个平稳的下降趋势, 在所有浓度处理中与对照组均无显著性差异($P<0.05$); 在镉、锌复合胁迫下随着浓度的升高叶绿素含量也是先升后降的变化趋势, 并且也是在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 到达峰值, 随着浓度进一步升高开始下降, 但是复合胁迫下浓度在 $200\sim600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与对照组有显著性差异($P<0.05$)。

2.3 不同重金属胁迫对高羊茅地上部分干重的影响

通过图 1 可以看出, 各个浓度下高羊茅在镉单一胁迫的地上部分干重均小于锌单一胁迫, 因此高羊茅受到镉的影响更为明显, 与锌相比镉对高羊茅的毒性也较强。同时在各个浓度下高羊茅在复合胁迫下的地上干重均大于镉胁迫小于锌

胁迫。

表 2 高羊茅在不同浓度重金属胁迫下叶绿素总量的变化趋势

浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Concentration	叶绿素含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Chlorophyll content		
	镉 Cadmium	锌 Zinc	复合 Combined
0	$8.58\pm1.59\text{ bcd}$	$8.58\pm1.59\text{ abc}$	$8.58\pm1.59\text{ ab}$
5	$9.75\pm2.12\text{ abc}$	$7.12\pm1.17\text{ bc}$	$7.07\pm1.73\text{ bc}$
10	$10.46\pm2.59\text{ ab}$	$9.76\pm2.91\text{ ab}$	$8.91\pm1.16\text{ ab}$
50	$12.27\pm3.22\text{ a}$	$11.13\pm1.52\text{ a}$	$9.60\pm0.82\text{ a}$
100	$9.55\pm1.53\text{ abc}$	$7.67\pm1.70\text{ bc}$	$7.13\pm1.04\text{ bc}$
200	$7.30\pm0.95\text{ bcd}$	$6.89\pm2.55\text{ bc}$	$5.98\pm1.50\text{ c}$
300	$6.45\pm2.59\text{ cd}$	$5.77\pm1.04\text{ c}$	$5.48\pm2.03\text{ c}$
450	$6.02\pm0.35\text{ d}$	$6.75\pm1.97\text{ bc}$	$5.53\pm1.42\text{ c}$
600	$5.93\pm1.12\text{ d}$	$7.08\pm0.73\text{ bc}$	$5.87\pm0.76\text{ c}$

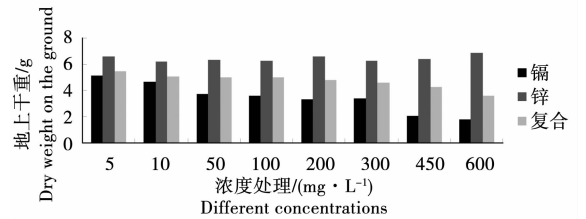


图 1 不同重金属胁迫对高羊茅地上干重的影响
Fig. 1 The effect of different heavy metal stress on dry weight on the ground

2.4 不同重金属胁迫对高羊茅叶绿素含量的影响

通过图 2 可以看出, 在 $5\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 高羊茅在镉单一胁迫下叶绿素的含量要高于锌单一胁迫, 锌胁迫在这个浓度范围内对高羊茅叶绿素影响要大于镉胁迫; 浓度在 450 和 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的时候, 高羊茅在镉胁迫下叶绿素的含量要低于锌胁迫, 因此镉胁迫在这两个浓度下对高羊茅叶绿素的影响要大于锌胁迫。浓度在 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时复合胁迫下高羊茅的叶绿素含量略高于镉单一胁迫并低于锌单一胁迫, 在其余浓度下, 复合胁迫高羊茅叶绿素含量均低于镉和锌单一胁迫。

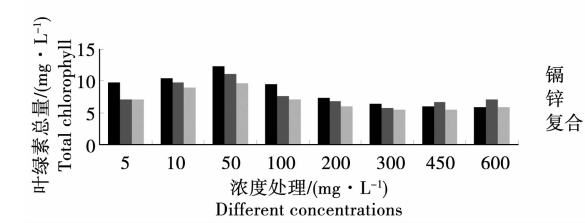


图2 不同重金属胁迫对高羊茅叶绿素含量的影响
Fig. 2 The effect of different heavy metal stress on chlorophyll

2.5 镉、锌在复合重金属胁迫中对高羊茅地上干重的作用

通过图3可以看出,高羊茅在复合重金属胁迫下,与镉单一胁迫相比,随着浓度的不断升高地上干重变化幅度比较明显,从浓度5 mg·L⁻¹时的6.45%一直到600 mg·L⁻¹时的102.23%,与锌单一胁迫相比较,随着浓度的不断升高地上干重变化也是出现了上升的趋势,但是幅度较小,从浓度5 mg·L⁻¹时的17.55%一直到600 mg·L⁻¹时的47.08%,因此随着复合胁迫浓度的不断升高,其中重金属镉因浓度变化对高羊茅地上干重影响变化较明显,而重金属锌因浓度变化对高羊茅地上干重影响变化不明显。浓度为5和10 mg·L⁻¹时,与复合重金属胁迫相比高羊茅地上部分干重受镉影响的变化幅度要小于锌影响的变化幅度,在这两个浓度下,镉在复合重金属胁迫中对高羊茅地上干重的作用要大于锌,浓度在50~600 mg·L⁻¹,与复合重金属胁迫相比高羊茅地上部分干重受锌影响的变化幅度要小于镉影响的变化幅度,在这个浓度范围内,锌在复合重金属胁迫中对高羊茅地上干重的作用要大于镉。

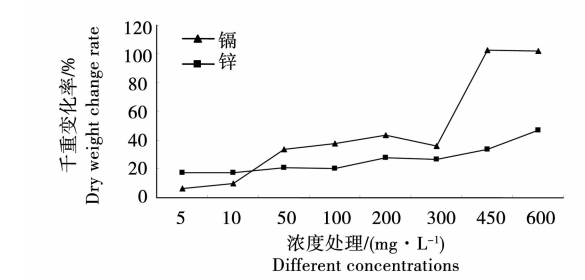


图3 镉、锌在复合重金属胁迫中对高羊茅地上干重的作用
Fig. 3 The effect of cadmium and zinc on dry weight on the ground in the combined stress of heavy metal

2.6 镉、锌在复合重金属胁迫中对高羊茅叶绿素含量的作用

通过图4可以看出,高羊茅在复合重金属胁迫下,与镉单一胁迫相比,随着浓度的不断升高叶

绿素含量变化幅度下降较明显,从浓度5 mg·L⁻¹时的27.49%一直到600 mg·L⁻¹时的1.01%,与锌单一胁迫相比较,随着浓度的不断升高叶绿素含量呈上升的趋势,从浓度5 mg·L⁻¹时的0.70%一直到600 mg·L⁻¹时的17.09%,镉和锌在复合重金属胁迫中随着浓度的不断上升,变化都较为明显,但变化方向相反。浓度在5~300 mg·L⁻¹范围内,与复合重金属胁迫相比高羊茅叶绿素含量受镉影响的变化幅度要小于镉影响的变化幅度,在这个浓度范围内,锌在复合重金属胁迫中对高羊茅叶绿素的作用要大于镉,浓度在450和600 mg·L⁻¹时,与复合重金属胁迫相比高羊茅叶绿素含量受镉影响的变化幅度要小于锌影响的变化幅度,在这两个浓度下,镉在复合重金属胁迫中对高羊茅地上干重的作用要大于锌。

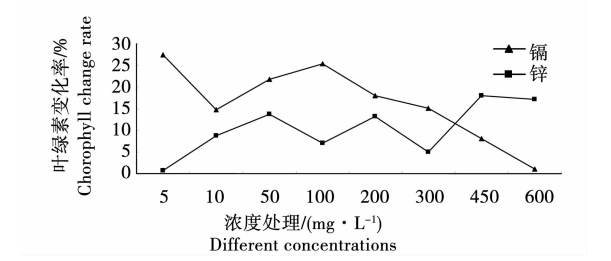


图4 镉、锌在复合重金属胁迫中对高羊茅叶绿素的作用
Fig. 4 The effect of cadmium and zinc on chlorophyll in the combined stress of heavy metal

3 结论与讨论

3.1 重金属胁迫对高羊茅叶绿素含量的影响

镉、锌单一胁迫及复合胁迫均是浓度在50 mg·L⁻¹时,高羊茅叶绿素含量达到了最大值,镉单一胁迫浓度在50 mg·L⁻¹时与对照组有显著性差异,这个浓度下的镉是最有利于高羊茅叶绿素的形成,而锌单一胁迫各浓度下均与对照组无显著性差异,锌对于高羊茅叶绿素的形成无明显作用,镉、锌复合胁迫浓度在200~600 mg·L⁻¹时,高羊茅叶绿素含量明显低于对照组,同时复合胁迫在各个浓度下高羊茅叶绿素含量均低于镉、锌单一胁迫,说明镉和锌在高羊茅植株体内起到了协同作用,两者相互作用后明显的抑制了高羊茅叶绿素的形成,在复合胁迫中,中低浓度下对高羊茅叶绿素含量的影响锌的作用要大于镉,但是当浓度持续上升,镉的作用越来越明显。

3.2 重金属胁迫对高羊茅生长量的影响

随着处理浓度的不断升高,镉单一胁迫对高

羊茅地上干重影响较为明显,浓度越高地上干重越小,抑制生长的效果越明显,浓度在 450 和 600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时抑制最为明显,锌单一胁迫各浓度下地上干重均大于对照组,表现为促进生长的效果,但是效果并不明显,与对照组无显著性差异,通过以上可以看出镉的毒性较强,而锌也表现出了具有营养元素的特征,还没有达到产生毒性的浓度。同时各个浓度下高羊茅在镉单一胁迫下的地上干重均小于锌单一胁迫,这进一步说明了镉的毒性较强,并且毒性要强于锌。复合胁迫下高羊茅地上干重也是随着浓度的升高而不断下降,在所有浓度中复合胁迫下地上干重要大于镉单一胁迫小于锌单一胁迫,说明锌能够中和镉的一部分毒性,镉也能使锌的毒性增强。在复合胁迫下,低浓度下对高羊茅地上干重的影响镉的作用要大于锌,随着浓度的升高,锌的作用越来越明显。

参考文献:

[1] 曹心德,魏晓欣,代革联,等. 土壤重金属复合污染及其化

学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报,2011(7): 1441-1453.

[2] 王丹. 重金属铜、铬(VI)复合污染对小白菜的生物毒性效应[D]. 西安:西北农林科技大学,2012.

[3] 何勇田,熊先哲. 复合污染研究进展[J]. 环境科学, 1994(6):79-83,96.

[4] 徐卫红,王宏信,王正银,等. 重金属富集植物黑麦草对镉、铜复合污染的响应[J]. 中国农学通报,2006(6):365-368.

[5] 周启星,吴燕玉,熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复合污染和生态效应[J]. 应用生态学报,1994(4):438-441.

[6] 朱波,青长乐,牟树森. 紫色土 Zn、Cd 复合污染生态效应研究[J]. 应用生态学报,1997(6):639-644.

[7] Abdel-sablur M F, Mortvedt J J, Kelsoe J J. Cadmium-Zinc interactions in plants and extractable cadmium and Zinc fractions in soil[J]. Soil Science, 1998, 145(6):424-431

[8] 孙吉雄. 草坪学[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2008:87.

[9] 杨卓,王伟,李博文,等. 高羊茅和黑麦草对污染土壤 Cd, Pb, Zn 的富集特征[J]. 水土保持学报,2008(2):83-87.

[10] 赵树兰,多立安. Cu^{2+} 与 Zn^{2+} 递进胁迫下高羊茅的初期生长效应及生态阈限研究[J]. 生态学报,2002(7): 1098-1105.

Combined Heavy Metal Stress Effect on the Growth of *Festuca arundinacea* Schreb.

FU Hong-bo¹, YU Si-jia², SUN Jing¹, ZHANG Dong-xue¹, FAN Ai-guo¹

(1. Berries Research Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Suiling, Heilongjiang 150024; 2. Pinggang Agricultural Technology Extending Stations of Jilin Province, Dongliao, Jilin 136600)

Abstract: Turf plant as an important cover plant of garden, is widely used in landscape at present which is the largest herbaceous plant from the aspect of application area in landscaping. At the same time, they are pioneer plants in conservation and restoration. In order to governance the heavy metal pollution areas, taking *Festuca arundinacea* Schreb. as object, the cultivation experiments on the biomass above ground was conducted and leaf chlorophyll content under the stress of heavy metal was studied. The results showed that with the increasing of the concentration of cadmium single stress and combined stress had obvious restraining effect of the dry weight on the ground, and zinc single stress performance for promoting effect, but the effect is not obvious; All cadmium concentrations of dry weight on the ground under the single stress was smaller than the zinc single stress, cadmium effects on dry weight on the ground was significantly higher than that of zinc; In combined stress, the change of the cadmium and zinc concentration affect the chlorophyll content and dry weight on the ground; Under the three kinds of stress, concentration at 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the chlorophyll of *Festuca arundinacea* Schreb. reached maximum; For the effect of chlorophyll content of cadmium and zinc combined stress it had played a synergy.

Keywords: *Festuca arundinacea* Schreb.; combined stress; concentration; chlorophyll; dry weight