

生活垃圾堆肥草坪中蚯蚓对植物生长 和抗氧化酶系的影响

多立安, 张玥含, 赵树兰

(天津师范大学化学与生命科学学院, 天津 300387)

摘要:通过在添加蚯蚓的生活垃圾堆肥基质上培植黑麦草、高羊茅和早熟禾,测定了草坪植物生物量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,研究了蚯蚓活动对3种草坪植物生长和抗氧化酶系的影响。结果表明:蚯蚓活动使黑麦草、高羊茅的地上生物量分别增加了3.53倍和12.17倍,地下生物量分别增加127.45%和148.94%,而早熟禾地上生物量减少42.37%。放入蚯蚓后,黑麦草和高羊茅的MDA含量分别减少了51.30%和87.52%,早熟禾增加了16.74倍。黑麦草、高羊茅和早熟禾的SOD和POD活性在放入蚯蚓后,分别有所下降,SOD活性分别下降了64.93%,13.38%和83.56%,POD活性分别下降41.15%,54.41%和34.09%。黑麦草CAT活性提高了5.61%,而高羊茅和早熟禾分别下降11.73%和33.23%。可见,生活垃圾堆肥草坪中蚯蚓活动对植物生长及抗氧化酶系的影响因植物种类而异。

关键词:生活垃圾堆肥;蚯蚓;草坪植物;生物量;抗氧化酶系

文章编号:1000-0933(2008)10-4765-06 中图分类号:Q143,Q945,Q958 文献标识码:A

Effects of earthworms on growth and antioxidant enzyme system of turfgrasses grown in municipal solid waste compost

DUO Li-An, ZHANG Yue-Han, ZHAO Shu-Lan

College of Chemistry and Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4765 ~ 4770.

Abstract: To investigate impact of earthworms on growth and antioxidant enzyme system of three turfgrasses, *Lolium perenne* L., *Festuca arundinacea* L. and *Poa pratensis* L., we studied the effects of earthworms on biomass, malonaldehyde (MDA) content, as well as the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) of the turfgrasses grown in municipal solid waste (MSW) compost medium by adding earthworms into the MSW medium. Our results showed that addition of earthworms into the MSW medium increased the aboveground biomass of *L. perenne* and *F. arundinacea* by 3.53 and 12.17-fold, respectively. The same treatments enhanced the underground biomass of *L. perenne* and *F. arundinacea* by 127.45% and 148.94% respectively. By contrast, the aboveground biomass of *P. pratensis* was decreased by 42.37% when the earthworms were introduced into the MSW medium. MDA content in *L. perenne* and *F. arundinacea* was reduced by 51.30% and 87.52% with addition of earthworms into the MSW medium, respectively. An increase in MDA content in *P. pratensis* by 16.74 times was found by addition of earthworms into MSW medium.

基金项目:天津市科技发展计划资助项目(043100611);国家自然科学基金资助项目(59878033)

收稿日期:2007-06-17; 修订日期:2007-12-14

作者简介:多立安(1962~),男,达斡尔族,黑龙江人,博士,教授,主要从事草业生态、生态工程及环境生态研究. E-mail: duolian_tjnu@163.com

Foundation item: The project was financially supported by Tianjin Science and Technology Development Program (No. 043100611) and the National Natural Science Foundation of China (No. 59878033)

Received date: 2007-06-17; **Accepted date:** 2007-12-14

Biography: DUO Li-An, Ph. D., Professor, mainly engaged in pratacultural ecology, ecological engineering and environmental ecology. E-mail: duolian_tjnu@163.com

Furthermore, the presence of earthworms in the MSW medium had significant effects on antioxidant enzymes of the turfgrasses. Activities of SOD in *L. perenne*, *F. arundinacea* and *P. pratensis* were decreased by 64.93%, 13.38% and 83.56%, respectively. Activities of POD in *L. perenne*, *F. arundinacea* and *P. pratensis* were increased by 41.15%, 54.41% and 34.09%, respectively. Activities of CAT in *L. perenne* were increased by 5.61% with inclusion of earthworms in the MSW medium, whereas the same treatments led to decreases in CAT activities in *F. arundinacea* and *P. pratensis* by 11.73% and 33.23%, respectively. In conclusion, the present study demonstrates that earthworms in medium can markedly affect growth and the activities of antioxidant enzymes of turfgrasses, and that the effect is species-specific.

Key Words: MSW compost; earthworm; turfgrass; biomass; antioxidant enzyme system

生活垃圾堆肥富含有机质和氮、磷、钾,是优质的有机肥料。利用垃圾堆肥进行草坪建植已有相关研究报道,垃圾堆肥的加入能明显促进黑麦草的生长,增加生物量,改善叶片的色泽和整齐度,提高了草坪的密度和质量^[1]。有研究表明,以垃圾堆肥为主体材料的组配基质进行草皮培植,植株密度、高度、根系生长情况、绿期与绿度等指标均符合草皮培植要求,综合性能指标优于土壤^[2~4]。以垃圾堆肥为基质的草坪建植体系具有重要的实际应用价值^[5]。

蚯蚓能改良土壤结构,显著增加土壤中全氮和氮、磷有效养分含量,并可提高土壤中脲酶、蔗糖酶和微生物活性,增强土壤供肥性能^[6,7]。蚯蚓活动可以促进植物生长已被大量研究所证实,Lavelle 等^[8]的研究发现在未污染土壤中蚯蚓活动能促进植物增产;也有一些研究表明,在 Cu、Cd 污染的土壤中,蚯蚓活动能显著提高黑麦草(*Lolium multiflorum*)的地上生物量^[9,10];Abdul 等^[11]的研究表明,在 3 种不同浓度的 Cd、Fe、Zn、Cu、Pb 污染土壤上蚯蚓活动增加了黑麦草产量;实验室条件下,蚯蚓的放入使 1 年生早熟禾(*Poa annua*)的地上和地下生物量增加两倍^[12];在小麦与三叶草间作的实验中,蚯蚓显著提高了小麦的生物量^[13]。上述研究所涉及的都是蚯蚓对植物生长及产量等方面的影响,而蚯蚓活动如何通过对抗氧化酶系的生理生态调控影响植物而发挥作用的机制问题,尚未见研究报道。

植物在受到逆境胁迫时会产生活性氧类物质,它们促使膜脂中不饱和脂肪酸过氧化产生丙二醛(MDA),造成膜脂的过氧化,破坏膜系统的完整性。植物体自身有一抗氧化酶系统来消除或减少活性氧带来的伤害,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是这一保护系统的主要酶^[14]。本文以生活垃圾堆肥基质培植草坪植物,通过在基质中添加蚯蚓,研究了蚯蚓活动对草坪植物生物量、MDA 含量及 3 种抗氧化酶活性的影响,目的在于探讨蚯蚓活动对垃圾堆肥草坪建植体系植物生长效应影响的内在生理生态机制,为蚯蚓进一步应用于生活垃圾堆肥基质草坪建植体系中提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

生活垃圾堆肥取自天津市小淀垃圾堆肥处理厂。草坪植物选用多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)、高羊茅(*Festuca arundinacea* L.)和草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)。供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),由天津宁河贾立明蚯蚓养殖公司提供。

1.2 试验设计

取底部有透气孔的花盆($\phi 18 \times 20$ cm),盆底垫一层纱布,以保证透气性良好和防止蚯蚓从底部钻出。每盆装入生活垃圾堆肥 2 kg,放入蚯蚓 40 条,每盆的堆肥基质表面分别播撒黑麦草、高羊茅、早熟禾草种 1.5 g,进行草坪建植;实验以不放蚯蚓的为对照,3 次重复。实验在室温条件下进行,自然光照下生长,室内的温度和相对湿度分别为 15~21℃和 34%~39%。每天喷撒适量水,以保持基质持水量为 60%。45 d 后刈割草坪植物,测定各项指标。

1.3 测定方法

1.3.1 生活垃圾堆肥基质背景测定

容重采用环刀法^[15];pH 值以水土比 5:1 混合搅匀,采用酸度计测定^[15]。有机质含量采用重铬酸钾容量

法-外加热法测定;全氮采用浓硫酸-高氯酸消煮,半微量凯式定氮法;有效磷、全钾的测定以湿法消化,消化液采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定。

1.3.2 抗氧化酶活性及丙二醛含量测定

(1)酶的提取在 4 ℃ 条件下进行,准确称取剪碎的样叶 0.5000 g 于预冷研钵中,加入酶的提取液(PBS, pH 7.8),冰浴上研磨成匀浆,在 10000 r/min 下离心 20 min,上清液用于酶的测定。SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定^[16],以每克植物鲜重抑制 NBT 光化还原 50% 为一个酶活单位;POD 活性测定采用愈创木酚法测定^[17],以每克植物鲜重每分钟氧化 1 μmol 愈创木酚为一个酶活单位;CAT 活性测定采用过氧化氢法^[18],以每克植物鲜重每分钟分解 1 μmol H₂O₂ 为一个酶活单位。

(2)丙二醛含量测定:称取叶片 1.000 g,剪碎,加入 10 ml 10% 三氯乙酸(TCA)和少量石英砂,研磨至匀浆,4 000 × g 离心 10 min。取上清液 2 ml,加入 2 ml 0.6 % 硫代巴比妥酸(TBA)溶液,沸水浴中提取 15 min,冷却后离心。上清液测定 532 和 450 nm 处的 OD 值。

1.3.3 草坪植物生物量测定

种植 45 d 后,将草坪植物紧贴基质剪下,烘干后称重,其干重作为地上生物量;把盆中的堆肥连同植物的根一起取出,清洗、烘干后称重,其干重作为地下生物量。

1.4 数据处理

采用 MICROSOFT EXCEL 2003 和 SPSS12.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 生活垃圾堆肥基质背景分析

生活垃圾堆肥的背景分析结果表明其有机质和氮素含量明显高于土壤(表 1)。丰富的有机质含量可以为植物生长提供所需营养物质。垃圾堆肥的饱和含水量也比土壤高,有利于植物对水的吸收与利用。pH 值适中,其它理化性质优于土壤,可见,生活垃圾堆肥作为基质可以满足草坪植物基本养分需要,并适合蚯蚓的生长。

表 1 生活垃圾堆肥基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of MSW compost

基质 Medium	测定指标 Indices						
	pH	有机质(%) Organic matter	全氮(%) Total N	有效磷(mg/kg) Available P	全钾(g/kg) Total K	饱和含水量 (mL/g) Saturated water content	容重(g/cm ³) Bulk density
堆肥 Compost	7.62	12.12	5.18	77.92	50.83	0.76	0.85

2.2 蚯蚓活动对草坪植物生物量的影响

在垃圾堆肥基质中放入蚯蚓后,黑麦草、高羊茅的地上生物量有显著的增加(表 2),和对照相比,分别增加了 3.53 倍和 12.17 倍;但早熟禾却相反,放入蚯蚓后地上生物量减少了 42.37%。可见基质中蚯蚓活动对黑麦草和高羊茅地上生物量的增加有显著的促进作用,并且对高羊茅的影响要大于黑麦草。另外,蚯蚓活动

表 2 蚯蚓活动对草坪植物生物量的影响(g/盆)
Table 2 Effects of earthworm on biomass of turfgrasses(g/pot DW)

生物量 Biomass	处理 Treatments	草坪植物 Turfgrasses		
		黑麦草 <i>L. perenne</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	早熟禾 <i>P. pratensis</i>
地上生物量 Aboveground biomass	放入蚯蚓 EA	1.649 ± 0.408 *	0.935 ± 0.182 *	0.034 ± 0.006
	未放蚯蚓 CK	0.364 ± 0.015	0.071 ± 0.012	0.059 ± 0.004
地下生物量 Underground biomass	放入蚯蚓 EA	0.232 ± 0.067 *	0.117 ± 0.190	—
	未放蚯蚓 CK	0.102 ± 0.009	0.047 ± 0.010	—

* $P < 0.05$; EA: 放入蚯蚓 with earthworm addition; CK: 未放蚯蚓(对照),下同 * $P < 0.05$; EA: With earthworm addition; CK: No earthworm addition (control), the same below

使黑麦草、高羊茅的地下生物量分别增加了 127.45% 和 148.94%。可见,蚯蚓活动对黑麦草和高羊茅的生物量积累有促进作用,对早熟禾生物量的影响较小。

2.3 蚯蚓活动对草坪植物 MDA 含量的影响

放入蚯蚓后,黑麦草、高羊茅的 MDA 含量明显下降(图 1),分别比对照下降了 51.30% 和 87.52%;但早熟禾相反,放入蚯蚓后,其 MDA 含量显著增加,高出对照 16.74 倍。蚯蚓活动对 3 种草坪植物的 MDA 含量产生不同的影响,使黑麦草和高羊茅的膜质过氧化物含量减少,早熟禾的膜质过氧化物积累增加。

2.4 蚯蚓活动对草坪植物抗氧化酶活性的影响

蚯蚓活动使黑麦草、高羊茅和早熟禾的 SOD 活性分别比未加蚯蚓时下降了 64.93%,13.38% 和 83.56% (表 3)。放入蚯蚓与未放入蚯蚓,高羊茅的 SOD 活性均为最高,早熟禾最低,蚯蚓活动显著降低了早熟禾的 SOD 活性。蚯蚓活动使高羊茅和早熟禾的 CAT 活性分别比对照降低了 11.73% 和 33.23%;但是,黑麦草在放入蚯蚓后,其 CAT 活性升高了 5.61%,可见,蚯蚓活动会显著降低早熟禾 CAT 活性。蚯蚓活动使黑麦草、高羊茅和早熟禾的 POD 活性分别比对照下降了 41.15%,54.41% 和 34.09%。同 SOD 活性一样,以高羊茅的 POD 活性为最高,早熟禾最低,蚯蚓活动降低了 3 种草坪植物的 POD 活性。

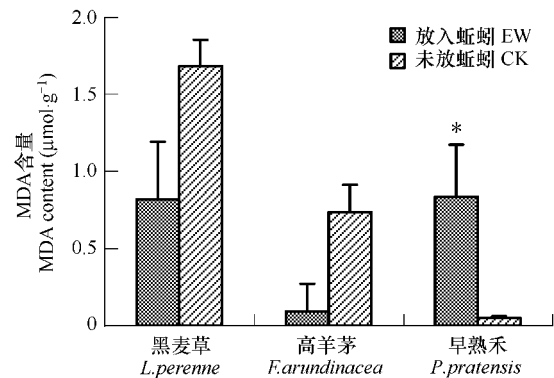


图 1 蚯蚓活动对 3 种草坪植物 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of earthworm on MDA content of turfgrasses

表 3 蚯蚓活动对草坪植物 SOD、POD、CAT 活性的影响

Table 3 Effects of earthworm on SOD、POD、CAT activities of turfgrasses

抗氧化酶 Antioxidant enzymes	处理 Treatments	黑麦草 <i>L. perenne</i>	高羊茅 <i>F. arundinacea</i>	早熟禾 <i>P. pratensis</i>
SOD	放入蚯蚓 EA	450.00 ± 50.00	1466.67 ± 466.67	200.00 ± 76.38 *
U	未放蚯蚓 CK	1283.33 ± 185.59	1733.33 ± 164.15	1216.67 ± 344.40
POD	放入蚯蚓 EA	8847.08 ± 2118.33	12340.08 ± 3194.30	5087.77 ± 374.27
U	未放蚯蚓 CK	15034.48 ± 1414.46	27068.99 ± 5402.50	7603.34 ± 96.83
CAT	放入蚯蚓 EA	148.15 ± 4.42	144.26 ± 5.74	95.83 ± 0.80 *
U	未放蚯蚓 CK	140.28 ± 6.56	163.43 ± 4.63	143.52 ± 12.59

3 讨论

基质中蚯蚓活动对植物生物量积累的促进作用已被大量研究所证实,而蚯蚓活动对植物抗氧化酶系统等深层生理生态影响的内在机制,尚无相关文献报道。本研究结果表明,蚯蚓活动对黑麦草和高羊茅的生物量都有明显的增加,这与 Wang 等^[19]、Susanne 等^[20]的研究结果相一致;但蚯蚓使早熟禾的地上生物量减少,这与多数的研究结论相矛盾,具体的机制有待于进一步研究。MDA 是膜脂过氧化的最终产物,其含量的增加被看作衡量活性氧对植物体防御系统破坏程度一个准确指标^[21]。本研究发现,黑麦草和高羊茅放入蚯蚓后,MDA 含量明显下降,说明蚯蚓活动使 2 种草坪植物能够较好地保护自身免遭活性氧自由基的伤害,减轻了垃圾堆肥对植物的逆境胁迫,与两者的生物量增加相吻合。早熟禾的 MDA 含量在放入蚯蚓后显著增加,说明蚯蚓活动增加了早熟禾叶片细胞膜的过氧化程度,可能由于蚯蚓活动诱发了堆肥基质中的某些胁迫机制,使早熟禾受到逆境胁迫加剧,从而导致 MDA 在植物体内的积累,并减少了生物量。

植物本身通过抗氧化酶保护系统来消除或减少植物生长过程中产生的活性氧带来的伤害,主要涉及的酶有 SOD、POD、CAT 等^[22]。研究发现不同的逆境胁迫下,SOD、POD、CAT 会采取不同的应答方式^[23, 24]。鲁平等^[25]的研究表明,飞机草在高温、低温、干旱胁迫下 SOD 活性增加,POD 在高温和干旱下活性升高,在低温胁迫下降低,CAT 在高温胁迫下升高,在低温和干旱胁迫下酶活性降低。于方明等^[26]的研究发现,随着重金

属 Cd^{2+} 胁迫浓度的增加, POD 及 CAT 活性增加, 而 SOD 活性呈下降趋势。本研究发现, 3 种草坪植物 SOD 与 POD 活性在放入蚯蚓后有明显降低, 结合生物量与 MDA 含量的结果可以看出, 蚯蚓活动促进了黑麦草与高羊茅的生长, 降低了 MDA 含量, SOD 与 POD 活性也随之降低; 蚯蚓活动可以减轻垃圾堆肥逆境条件对植物膜脂过氧化伤害, 提高了植物抗逆境胁迫的能力。然而, 对于早熟禾而言, MDA 含量在放入蚯蚓后有显著增加, 而 SOD 活性与 POD 活性的降低, 说明其活性受到了不同程度的抑制, 消除活性氧自由基的能力下降, 早熟禾叶片细胞膜的过氧化程度较强, 可能是由于蚯蚓活动使堆肥基质中某种胁迫机制(如重金属)加强, 使保护酶清除活性氧的能力下降, 这与植物的根际环境有关, 包括根系分泌物、酸碱性以及根际微生物等, 会对基质中重金属的有效性产生影响。黑麦草与早熟禾的 CAT 活性, 在放入蚯蚓后有所降低, 而高羊茅的 CAT 活性则有所升高, CAT 活性的提高有利于 H_2O_2 的消除, 有效地保护细胞膜结构免受损伤。可见, 堆肥中蚯蚓活动对草坪植物生长及抗氧化酶系统的影响与植物的种类有关, 关于这方面的机制问题还有待于进一步的研究。

Reference:

- [1] Fan H R, Hua L, Cai D X, *et al.* Effects of municipal waste compost and its compound fertilizers on the turf quality of ryegrass. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2694—2702.
- [2] Duo L A, Zhao S L. Study on raising medium function of environmental engineering by using life rubbish to produce carpet turf. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 12(4): 498—505.
- [3] Duo L A, Zhao S L. Medium selection and compounding of environmental eco-engineering through making use of life rubbish to produce carpet turf. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5): 767—772.
- [4] Zhao S L, Duo L A, Wang X L, *et al.* Turf established by sod with municipal solid waste compost as medium and waste material as netting. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(1): 126—131.
- [5] Duo L A, Zhao S L, Gao Y B. Probe into several ecological issue related to the establishment of urban turf system. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1065—1071.
- [6] Wang X, Hu F, Li H X, *et al.* Effects of earthworm on soil C, N on upland-rice soil under different manipulations of corn straw. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 462—466.
- [7] Edwards C A, Bohlen P J. *Biology and ecology of earthworms*. London: Chapman and Hall, 1996.
- [8] Lavelle P, Lattaud C, Trigo D, *et al.* Mutualism and biodiversity in soils. *Plant and Soil*, 1995, 170: 23—33.
- [9] Yu X Z, Cheng J M. Effect of earthworm on bio-availability of Cu and Cd in soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 922—928.
- [10] Cheng J M, Yu X Z, Huang M Z. Roles of earthworm-mycorrhiza interactions on phytoremediation of Cd contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1257—1263.
- [11] Abdul M M, Abdul R. Effet des lombriciens sur l'absorption du potassium par le ray-grass dans des sols contaminés par CINQ elements traces. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(8): 1045—1051.
- [12] Stefan S, Anne T T, Hefin J. Links between the detritivore and the herbivore system: effects of earthworms and Collembola on plant growth and aphid development. *Oecologia*, 1999, 119: 541—551.
- [13] Olaf Schmidt, Curry J P. Effects of earthworms on biomass production, nitrogen allocation and nitrogen transfer in wheat-clover intercropping model systems. *Plant and Soil*, 1999, 214: 187—198.
- [14] Kong F X, Yin D Q, Yan G A. *Environmental biology*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 68—81.
- [15] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 25—270.
- [16] Sundar D, Perianayagay B, Reddy A R. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves, *Plant Growth Regulation*, 2004, 44(2): 157—163.
- [17] Zhang Z L, Qu W Q. *The Experimental guide for plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2003. 123—276.
- [18] Maria D, Ewa S, Zbigniew K. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. *Bio Metal*, 2004, 17(4): 379—387.
- [19] Wang D D, Li H X, Wei Z G, *et al.* Effect of earthworms on the phytoremediation of zinc-polluted soil by ryegrass and Indian mustard. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43: 120—123.
- [20] Susanne W, Reinhard L, August R, *et al.* Effects of earthworms and organic litter distribution on plant performance and aphid reproduction. *Oecologia*, 2003, 137: 90—96.

- [21] Alaiz M, Hidalgo F J, Zamora R. Effect of pH and temperature on comparative antioxidant activity of nonenzymatically browned proteins produced by reactions with oxidized lipids and carbohydrates. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1999, 47: 748 – 752.
- [22] Elstner E F. Oxygen activity and oxygen toxicity. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 73 – 96.
- [23] Orendi G, Zimmermann P, Baar C, *et al.* Loss of stress-induced expression of catalase3 during leaf senescence in *Arabidopsis thaliana* is restricted to oxidative stress. *Plant Science*, 2001, 161: 301 – 314.
- [24] Xu G H, Shi G X, Liu L, *et al.* Study on the relations between the toxic effects of chromium-vion *Brasenia schreberi* Gmel. winter bud leaves and the variations of the protective enzyme system. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(6): 1034 – 1040.
- [25] Lu P, Sang W G, Ma K P. Activity of antioxidant enzymes in the invasive plant *Eupatorium odoratum* under various environmental stresses. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3578 – 3585.
- [26] Yu F M, Qiu R L, Hu P J, *et al.* Effects of different cadmium levels on the antioxidative enzymes activities of leaf in *Brassica chinensis*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 950 – 954.

参考文献:

- [1] 范海容, 华路, 蔡典雄, 等. 城市垃圾堆肥及其复合肥对黑麦草草坪质量的影响. *生态学报*, 2005, 25(10): 2694 ~ 2702.
- [3] 多立安, 赵树兰. 生活垃圾生产地毯式草皮环境生态工程基质选配研究. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 767 ~ 772.
- [4] 赵树兰, 多立安, 王修鲁, 等. 以生活垃圾堆肥为基质的废弃物铺网草皮建植研究. *西北植物学报*, 2007, 27(1): 126 ~ 131.
- [5] 多立安, 赵树兰, 高玉葆. 草坪建植体系构建中的生态问题. *生态学报*, 2007, 27(3): 1065 ~ 1071.
- [6] 王霞, 胡锋, 李辉信, 等. 秸秆不同还田方式下蚯蚓对旱作稻田土壤碳、氮的影响. *生态环境*, 2003, 12(4): 462 ~ 466.
- [9] 俞协治, 成杰民. 蚯蚓对土壤中铜、镉生物有效性的影响. *生态学报*, 2003, 23(5): 922 ~ 928.
- [10] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根在植物修复镉污染土壤中的作用. *生态学报*, 2005, 25(6): 1257 ~ 1263.
- [14] 孔繁翔, 尹大强, 严国安. *环境生物学*. 北京: 高等教育出版社, 2000. 68 ~ 81.
- [15] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000. 25 ~ 270.
- [17] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 2003. 123 ~ 276.
- [24] 徐国华, 施国新, 刘丽, 等. Cr^{6+} 对莼菜冬芽叶片急性毒害与保护酶系活性变化关系的研究. *西北植物学报*, 2000, 20(6): 1034 ~ 1040.
- [25] 鲁平, 桑卫国, 马克平. 外来入侵种飞机草在不同环境胁迫下抗氧化酶系统的变化. *生态学报*, 2006, 26(11): 3578 ~ 3585.
- [26] 于文明, 仇荣亮, 胡鹏杰, 等. 不同 Cd 水平对小白菜叶片抗氧化酶系统的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 950 ~ 954.