

十字花科与豆科作物对微囊藻毒素耐受性差异的比较

刘碧波^{1,2} 吴焯¹ 刘剑彤^{2*}

(1 河南工程学院资源与环境工程系, 河南郑州 451191; 2. 中国科学院水生生物研究所, 湖北武汉 430072)

摘要 [目的]研究十字花科与豆科作物对微囊藻毒素(MC)耐受性的差异。[方法]以十字花科作物典型作物油菜、小白菜、甘蓝与豆科典型作物黄豆、豌豆、蚕豆为材料,检测它们在不同浓度MC暴露条件下的生长发育情况,检测指标包括发芽率、株高、叶绿素等。[结果]十字花科作物中油菜与小白菜受MC影响较大,甘蓝受影响较小,而豆科作物普遍受影响不大。[结论]豆科作物比十字花科作物对MC耐受性更强,在受微囊藻毒素污染地区可以优先种植豆科作物。

关键词 微囊藻毒素; 豆科; 十字花科; 耐受性; 差异

中图分类号 S481+.8 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2012)03-01641-04

Comparison on the Tolerance of Cruciferous Crops and Leguminous Crops to Microcystin

LIU Bi-bo et al (Henan Institute of Engineering, Zhengzhou, Henan 451191)

Abstract [Objective] To study the differences in the tolerance of leguminous crops and cruciferous crops to microcystin (MC). [Method] The cruciferous typical crops—oilseed rapes, pakchois, cabbages and leguminous typical crops—soybeans, peas and broad beans were selected as the materials to test the effects of MC of different concentrations on the germination, growth and development of leguminous crops and cruciferous crops. The measuring indicators included germination rate, plant height, chlorophyll, etc. [Result] The MC had great effects on the oilseed rape and pakchois of cruciferous crops, and smaller effects on cabbage, while the leguminous crops were generally not affected. [Conclusion] Leguminous crops are more tolerant to MC than cruciferous crops and more preferential in MC polluted regions.

Key words Microcystin; Cruciferous crops; Leguminous crops; Tolerance; Difference

微囊藻毒素(microcystin, MC)是一种公认的肝毒素和促癌剂^[1],水体中MC主要是通过藻细胞破裂后释放出来的^[2],长期食用会对人的肝脏造成损伤,极端情况下会危及到人的生命^[3-4]。同时,由富营养化湖泊中的藻类释放的MC,可能随着农业灌溉用水进入农田,从而对农业生产和食品安全造成威胁^[5]。研究表明不同作物对于微囊藻毒素的耐受性间有差异,如马铃薯、菠菜和小麦较敏感,在MC-LR为5 μg/L时种子萌发、根和幼苗生长、光合作用和酶活性即受到明显抑制^[6-7];而甘蓝型油菜和水稻则表现出较强的耐受性,在质量浓度为24 μg/L的多种微囊藻毒素存在下,种子萌发和酶活性几乎不受影响^[8]。在MC-LR为10 μg/L时,家独行菜的根、叶和鲜重显著减少^[9],而花茎甘蓝只表现出轻微的生长抑制^[10]。在含多种微囊藻毒素的湖水灌溉下,生菜表现出明显的生长抑制,而三叶草则未出现这种现象^[11]。

虽然微囊藻毒素对陆生植物存在毒害作用已经被普遍确认,但Liu等的研究认为低质量浓度(<10 μg/L)的MC-RR能促进油菜和小白菜的生长,而高质量浓度(>100 μg/L)的MC-RR才会抑制其生长,且抑制作用与植株暴露的时期和持续时间密切相关^[5]。虽然世界各国科学家对此进行了大量的研究,但至今未有任何研究可以说明为什么不同作物对微囊藻毒素耐受性和抗性存在如此大的差异。而

解决这一问题将为寻求有效对策控制微囊藻毒素对农作物的危害,降低人类健康风险提供强有力的理论支持。从分类学角度来看,重要农作物如水稻、小麦、大麦、燕麦、黑麦、玉米、高粱、甘蔗等均属禾本科;大豆、花生、豌豆、蚕豆、豇豆、苜蓿、紫云英等则属豆科;其他如白菜、甘蓝、萝卜、油菜等属十字花科;葱、蒜、韭菜等属于葱科等。尽管植物分类的依据主要在于植物的形态特征,但分类学上相近的植物在代谢上也会存在一定的相似度,微囊藻毒素对不同科植物的影响是否存在一些差异?笔者以十字花科和豆科典型作物黄豆、豌豆、蚕豆、油菜、小白菜和甘蓝为研究对象,探讨了受试作物对MC耐受性的差异。

1 材料与与方法

1.1 材料 所有受试种子均购自河南豫研种子科技有限公司;干藻粉由中国科学院水生生物研究所滇池工作站提供, -20℃冷藏备用;培养液使用日本园试配方,所用药品纯度均为分析纯。

1.2 方法

1.2.1 MC的提取。为模拟野外情况,试验中使用的是MC初提液,其中MC-RR含量最高,文中浓度标示都是指MC-RR浓度。称取一定量的干藻粉,按20 ml/g的比例加入75%甲醇作为提取液^[12],室温下置于搅拌器上搅拌1 h,取出后3 000 r/min离心10 min,取上清液。按此步骤重复提取2次,将3次提取的上清液合并,旋转蒸发除去甲醇,测定浓度后保存(主要MC异构体是MC-RR)待用^[5]。

1.2.2 萌发试验。萌发试验主要参考Chen等的方法^[8]。MC-RR浓度梯度为0、1、10、100、1 000 μg/L。对照组使用蒸馏水。所有萌发试验都在培养皿(直径90 mm)中进行,在培养皿底部有4层纱布。将30 ml不同浓度的MC溶液加入到培养皿中使纱布湿润,种子置于纱布上,每天加入15 ml相应

基金项目 河南省科技攻关项目(No. 092102110105);河南工程学院博士基金资助项目(No. D09010);国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2009ZX07104-005-03、2009ZX07102-003-004、2008ZX07101-007.);中科院水生生物研究所开放性实验室项目(No. 2009FBZ09)。

作者简介 刘碧波(1978-),男,湖北仙桃人,讲师,从事水体污染控制修复技术与环境毒理学研究, E-mail: liubb2008@126.com。
* 通讯作者,研究员,硕士,从事水体生态修复研究。

收稿日期 2011-10-44

浓度的 MC 溶液,使纱布一直保持湿润,直至试验结束。试验温度维持在 25 ℃左右,光照时间为 12 h/d。所有试验均设置 3 组平行,试验期间每天观测种子发芽率和株高并且在试验结束(7 d 后)测定。

1.2.3 不同灌溉时间条件下 MC 对农作物生长发育的影响。根据 MC 在农田中的残留时间^[5],设定灌溉周期为 7 d。灌溉时间为萌发前、萌发结束、萌发结束后 5 d。在设定时间内使用 1 000 μg/L MC-RR 溶液对不同试验组进行灌溉,其他时段以及对照使用蒸馏水进行灌溉。所有试验均设置 3 组平行,20 d 后对各试验组的株高和叶绿素进行测定。

1.2.4 MC 分析及 HPLC 系统。半制备型 HPLC 系统为 Waters 600 型高效液相色谱仪,由控制器、四元梯度泵组成的输液系统和 2487 双波长紫外/可见检测器组成,分析柱为 BDS Hypersil C₁₈(4.6 mm×250 mm);柱温 25 ℃;流动相为甲醇:水(含 0.05% TFA) = 62:38;流动相流速为 1 ml/min;进样量为 20 μl^[12]。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 MC 对农作物发芽率的影响 试验表明,MC 对不同农作物影响并不一致,虽然最终的发芽率差别不大,但是在萌发试验前 2 d,油菜和小白菜在 MC 存在条件下发芽率低于对照组,表现为萌发受抑制,而甘蓝在 MC 存在条件

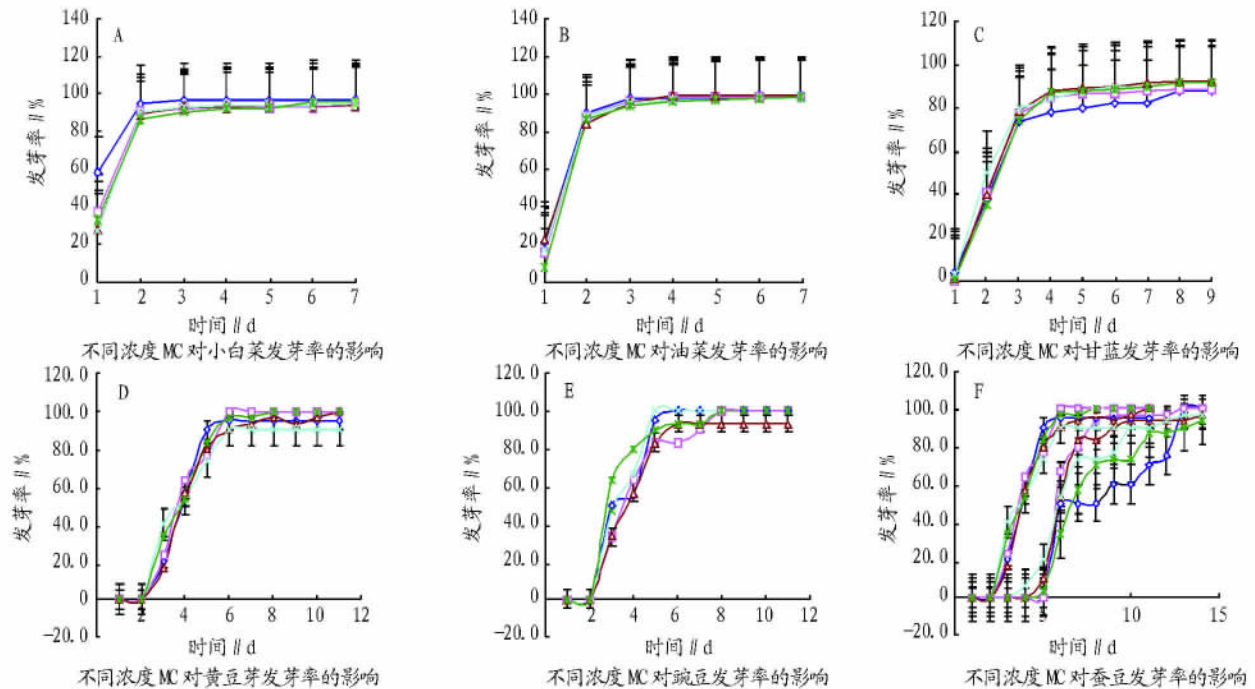
下发芽率反而高于对照组,说明其萌发过程未受到抑制。而豆科作物的发芽率一直高于对照组,说明 MC 对其萌发不但无抑制作用反而有促进作用。

小白菜的发芽率变化(图 1A)情况表明,在不同浓度的 MC-RR 存在下,小白菜的萌发均受到不同程度的抑制,在生长前期(第 1~2 天)对照组发芽率明显高于染毒组,抑制作用明显;第 3 天起,对照组发芽率逐步稳定,染毒组发芽率继续上升;最后,除 1 000 μg/L 组外,其他各染毒组与对照组发芽率并无明显差别,说明只有浓度达到 1 000 μg/L 之后才会导致小白菜整体发芽率的下降。

从油菜的发芽率变化(图 1B)中也可以发现,各组之间的发芽率相差不大。不同浓度的 MC 仅仅只是在萌发前 2 d 表现出了抑制作用,后期各组发芽率基本相同,无明显抑制或促进作用。

甘蓝的萌发速度明显慢于小白菜和油菜(图 1C),且长势较弱,用了 9 d 的时间才基本完成萌发过程。虽然最终的发芽率并不高,但整个萌发过程中不同浓度 MC 都表现出了促进作用。

而对于 MC 对豆科作物发芽率的影响(图 1D、E、F),3 种作物在 MC 存在条件下都产生萌发促进作用,未出现任何抑制现象。



注 “◇”.对照 “□”.1 μg/L MC; △.10 μg/L MC; * .1 000 μg/L MC。

图 1 不同浓度 MC 对农作物发芽率的影响

2.2 不同浓度 MC-RR 对农作物的株高的影响 对于在不同浓度条件下生长的小白菜、油菜、甘蓝、黄豆、豌豆和蚕豆株高分别进行 T 检验(显著水平 0.05),比较不同浓度对它们生长状况的影响。结果显示小白菜试验组中,对照组株高与 1 和 10 μg/L 2 组有显著差异,其他各组之间不存在显著性差异。油菜试验组中,1 000 μg/L 与对照组、1 μg/L 组和 10 μg/L 组之间都存在显著差异,100 μg/L 组与 1 μg/L 组和

10 μg/L 之间也存在显著差异,其他各组之间无显著差异,在株高上反映出了高浓度抑制低浓度促进的作用。在甘蓝组试验中,1 000 μg/L 组与对照组无显著差异,而与其他各组都有显著差异,1 μg/L 组与对照组、100 μg/L 组和 1 000 μg/L 组都有显著差异,而 10 μg/L 组与 100 μg/L 组有显著差异,也显示出了低浓度促进高浓度抑制的作用。黄豆组试验中对照组只与 100 μg/L 组有显著差异,而 1 μg/L 组与 10 μg/L

组、100 $\mu\text{g/L}$ 组和 1 000 $\mu\text{g/L}$ 组都有显著差异,表明 MC 除 1 $\mu\text{g/L}$ 组外,其他各浓度都对黄豆的株高有抑制作用。豌豆组试验中仅有 1 000 $\mu\text{g/L}$ 组与其他各组之间有显著差异,结合株高数据,表明只有 1 000 $\mu\text{g/L}$ 组株高受到显著抑制。蚕豆组试验中各组之间均无显著差异,表明 MC 对蚕豆的株高无显著影响。

2.3 不同灌溉时间条件下 MC-RR 对农作物生长发育的影响 研究表明,在萌发前和萌发结束时染毒,对各组中小白菜和油菜正常植株数量产生了明显影响,而萌发后 5 d 再染毒则不会对小白菜和油菜植株正常数量产生大的影响;而甘蓝在萌发前和萌发结束之后 5 d 时染毒,正常植株的数量明显减少,而萌发结束染毒组的健康植株数量变动不大;对于豆科作物而言,染毒时间对其植株成活无显著影响。

T 测验表明,无论何时染毒,小白菜的株高都会受到显著影响,而且各染毒组之间并无显著差异;甘蓝组试验表明萌发前染毒与其他各组之间株高存在显著差异;油菜组试验中只有对照组与萌发结束 5 d 后染毒之间株高有显著差异,其他均无显著差异;豆科作物在此试验中只有蚕豆表现出了对照组和萌发前、萌发结束染毒,及萌发结束和萌发结束后 5 d 染毒株高有显著差异,其他各组都无显著差异。

从叶绿素检测结果看(图 2),豌豆叶绿素的最高值出现在萌发结束后 5 d 的试验组,且仅有这一组叶绿素含量比对照高;黄豆叶绿素的最高值出现在萌发结束组,同样也是只有这一组叶绿素高于对照组;蚕豆的叶绿素含量最高值出现在萌发结束后 5 d,而且所有染毒组叶绿素含量都高于对照组;小白菜和油菜叶绿素的最高值均出现在萌发前,并且也只有这一组叶绿素高于对照组;甘蓝叶绿素最高值出现在萌发结束后 5 d,也是唯一高于对照组的试验组。叶绿素变化情况表明萌发结束后 5 d 再染毒对蚕豆、豌豆和甘蓝的光合作用没有影响,反而有促进作用;小白菜和油菜则是在萌发前染毒对光合作用有促进作用,萌发结束后和萌发结束后 5 d 染毒对光合作用有抑制作用;豌豆只有在萌发结束时染毒才能有促进作用。

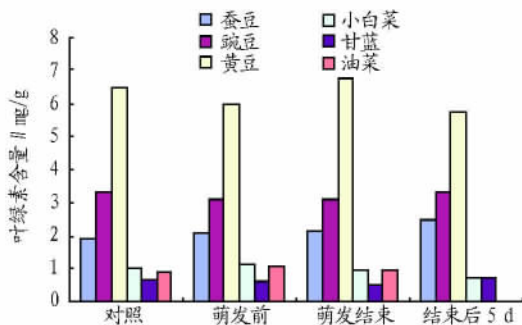


图 2 不同灌溉时期条件下 MC 对农作物叶绿素含量的影响

3 结论与讨论

该试验表明 6 种受试作物对微囊藻毒素耐受性存在差异,小白菜和油菜耐受性最差,萌发试验前期受抑制,但在株高上出现低浓度促进、高浓度抑制的作用;不同时期染毒试

验中,MC 对小白菜的主要影响体现在显著减少其正常存活植株数量,株高受到显著抑制,但萌发结束时开始染毒对其光合作用有促进作用。其次是甘蓝,在萌发试验中甘蓝就未受到抑制,反而使表现出了一定的促进作用;而在不同时期染毒试验中萌发前和萌发结束后 5 d 染毒都对其正常植株数量产生了显著影响,萌发前染毒组的株高也受到显著抑制,而萌发前和萌发结束染毒都会导致植株体内叶绿素含量降低。豆科植物表现出了比十字花科植物更强的耐受性,在 2 个试验中 MC 都没有对豆科植物的萌发和成活产生影响,而只是对株高和叶绿素含量产生了一定影响。

试验中微囊藻毒素对植物种子萌发的抑制作用,一般认为是蛋白磷酸酶抑制作用。但也有研究认为可能是氧化胁迫作用。Pflugmacher^[13] 等的研究表明,MC 诱导了水生植物 *Ceratophyllum demersum* 的氧化胁迫。Chen 等^[8] 的研究也表明,水稻和油菜经 MC 处理后 2 种抗氧化酶发生了变化。Yin 等^[14] 的研究证实,一定浓度 MC-RR 会对拟南芥和烟草悬浮细胞的抗氧化系统产生胁迫作用。Chen 等^[8] 报道,水稻和油菜经微囊藻毒素初提物处理后,生长被抑制,2 种抗氧化酶 SOD 和 POD 发生了变化。

而植株株高的变化同样可以认为是氧化损伤导致的根系活力下降,进而无法正常吸收营养物质所致^[6]。叶绿素含量的变化说明 MC 对叶绿素的合成和分解有影响,具体的机制尚不清楚,可能的情况是 MC 与植物叶绿素合成过程的某种酶产生了结合,导致该酶部分失去活性或是活性降低。

虽然抗氧化系统受损是微囊藻毒素致毒机理中比较广泛接受的一种解释,但它无法解释为何豆科植物对微囊藻毒素耐受性较强,而十字花科植物,尤其是小白菜和油菜,耐受性较差。这种差异产生的根本原因可能需要从微囊藻毒素在 2 个不同科植物体内的代谢途径上来理解,但是目前尚未找到相关的文献报道。

经试验首次从植物分类学的角度对分类学上的 2 个不同科的典型农作物对微囊藻毒素的耐受性进行了研究,在受试的 6 种农作物中,小白菜和油菜对 MC 最为敏感,耐受性最差,其次是甘蓝,豆科作物比十字花科作物耐受性更强。由此可知,在受微囊藻毒素污染农业区应该优先选择耐受性更强的豆科作物,或是耐受性较强的甘蓝,避免种植耐受性较差的小白菜和油菜。为更全面地评价微囊藻毒素对农作物的危害,还需要通过长期毒理试验来考察微囊藻毒素对农作物的慢性毒性和在农作物体内的代谢和累积过程。

参考文献

- [1] CARMICHAEL W. Cyanobacteria secondary metabolites: the cyanotoxins [J]. *J Appl Bacteriol* 1992 72: 445-459.
- [2] WATANABE M F, TSUJI K, WATANABE Y, et al. Release of heptapeptide toxin (microcystin) during the decomposition process of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Nat Toxins* 1992 1: 48-53.
- [3] POURIA S, ANDRABE A, BARBOSA J, et al. Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil [J]. *The Lancet* 1998 352: 21-26.
- [4] JOCHIMISEN E M, CARMICHAEL W W, CARDO D M, et al. Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil [J]. *New Engng J Med* 1998 338(13): 873-878.
- [5] LIU B B, GONG Y, XIAO B D, et al. A laboratory study on risk assessment

- of microcystin-RR in cropland[J]. Journal of Environmental Management, 2008 86: 566-574.
- [6] MCELHINEY J, LAWTON L A, LEIFERT C. Investigations into the inhibitory effects of microcystins on plant growth, and the toxicity of plant tissues following exposure[J]. Toxicon 2001 39: 1411-1420.
- [7] PFLUGMACHCR S, HOFMANN J, HIBNER B. Effects on growth and physiological parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in soft and irrigated with cyanobacterial toxin contaminated water[J]. Environmental Toxicology & Chemistry 2007 26(12): 2710-2716.
- [8] CHEN J, SONG L, DAI J et al. Effects of microcystins on the growth and the activity of superoxide dismutase and peroxidase of rape (*Brassica napus* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Toxicon 2004 43(4): 393-400.
- [9] GEHRINGER M M. Microcystin-LR and okadaic acid-induced cellular effects: a dualistic response[J]. FEBS Letters 2004 557(1/3): 1-8.
- [10] SUVIJÄRVENPÄÄ, CATHARINA LUNDBERG-NIINISTÖ, LISA SPOO F et al. Effects of microcystins on broccoli and mustard, and analysis of accumulated toxin by liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Toxicon 2007 49(6): 865-874.
- [11] CRUSH J R, BRIGGS L R, SPROSEN J M et al. Effect of irrigation with lake water containing microcystins on microcystin content and growth of ryegrass[J]. Clover, Rape, and Lettuce Environ Toxicol 2008 23: 246-252.
- [12] CHEN X G, XIAO B D, LIU J T et al. Kinetics of the oxidation of MCRR by potassium permanganate[J]. Toxicon 2005 45: 911-917.
- [13] PFLUGMACHER S. Promotion of oxidative stress in the aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* during biotransformation of the cyanobacterial toxin microcystin-LR[J]. Aquatic Toxicology 2004 70: 169-178.
- [14] YIN L, HUANG J, LI D et al. Microcystin-RR-induced accumulation of reactive oxygen species and alteration of antioxidant systems in tobacco BY-2 cells[J]. Toxicon 2005 42: 507-512.

(上接第1606页)

效应^[29]。冲刷效应具体反映了雨水径流对接纳水体的污染。随着降雨强度和降雨量的增加,原本屋顶中的大颗粒污染物经过雨水冲刷也会随着径流流出,因而造成了雨水污染物的浓度增高,意味着接纳水体中污染物数量的增加,水体污染加重。基于屋顶绿化对雨水径流污染物的净化作用,降低甚至消除屋面径流初期的冲刷效应,可降低水体污染。

3 总结

屋顶绿化是提高城市绿化率的有效手段,在人们对生活质量的要求不断提高的背景下,屋顶绿化也逐渐出现在各种建筑顶部,其通过隔热功能,可在夏季降低室内温度,冬季阻止热量外流,节约城市能耗;提高城市的绿化率,消除城市“热岛效应”,改善生态环境。屋顶花园还可在降雨时吸纳存储一定的降雨量,减轻雨水管的排水压力,其土壤与植物在物理、化学和生物的综合作用下,能够净化屋面雨水水质,提高屋面雨水资源的利用率。

参考文献

- [1] 任莅棣, 雷芸. 建筑环境空间绿化工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 8-9.
- [2] 李建龙. 城市生态绿化工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 456.
- [3] 近藤三雄. 城市绿化技术集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 18-20.
- [4] 严平, 杨书运, 王相文, 等. 合肥城市热岛强度及绿化效应[J]. 合肥工业大学学报, 2000 23(3): 348-352.
- [5] 秦培亮. 寒冷地区屋顶绿化的设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [6] 徐峰, 封蕾, 郭子一. 屋顶花园设计与施工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [7] CASTLETON H F, STOVIN V, BECK S B M et al. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit[J]. Energy and Buildings, 2010 42: 1582-1591.
- [8] 刘梦飞. 城市绿化覆盖率与气温的关系[J]. 城市规划, 1988 3: 59-60.
- [9] 唐鸣放, 杨真静, 李莉. 自然状态草地式屋顶绿化隔热特性分析[J]. 暖通空调, 2007 37(3): 1-4.
- [10] 唐鸣放, 白雪莲. 城市屋面绿化生态热效应[J]. 城市环境与城市生态, 2000 13(4): 9-10.
- [11] LIU K, MINOR J. Performance evaluation of an extensive green roof[C]. Washington, D. C.: Greening Rooftops for Sustainable Communities 2005: 1-11.
- [12] HE H, JIM C Y. Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem[J]. Ecological Modelling 2010 221: 2949-2958.
- [13] TEEMUSK A, JULO MANDER. Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems[J]. Energy and Buildings 2010, 36: 91-95.
- [14] WOLF D, LUNDHOLM J T. Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability[J]. Ecological Engineering, 2008 33: 179-186.
- [15] YANG J, YU Q, GONG P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. Atmospheric Environment 2008 42: 7266-7273.
- [16] 渥尔纳·皮特·库斯特. 德国屋顶花园绿化[J]. 中国园林, 2005 4: 71-75.
- [17] MENTENS J, RAES D, HERMY M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? [J]. Landscape and Urban Planning 2006 77: 217-226.
- [18] 刘葆华. 屋顶绿化的环境与节能效益研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [19] HILTEN R N, THOMAS MARK LAWRENCE, EARNEST WILLIAM TOLLNER. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D[J]. Journal of Hydrology 2008 358: 288-293.
- [20] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005 25(12): 3225-3230.
- [21] 王彪, 李田, 孟莹莹, 等. 屋面径流中营养物质的分布形态研究[J]. 环境科学, 2008 29(11): 3035-3042.
- [22] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门屋面径流特征初步研究[J]. 环境科学学报, 2006 26(7): 1076-1081.
- [23] 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. 中国给水排水, 2001 17(6): 57-61.
- [24] 殷捷. 城市屋面径流污染特性及其利用探讨[J]. 安徽农业科学, 2007, 25(17): 5244-5245.
- [25] 车武, 欧岚, 刘红, 等. 屋面雨水土壤层渗透净化研究[J]. 给水排水, 2001 27(9): 38-41.
- [26] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review[J]. Ecological Engineering 2010, 36: 351-360.
- [27] 李贺, 张秋菊, 李田. 屋面径流污染物的出流类型与水质特性研究[J]. 中国给水排水, 2009 25(9): 90-93.
- [28] 王和意, 刘敏, 刘华林, 等. 城市降雨屋面径流污染分析和控制[J]. 长江流域资源与环境, 2005 14(3): 367-371.
- [29] DELETIC A. The first flush load of urban surface runoff [J]. Water Research 1998 32: 2462-2470.