

# 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响<sup>①</sup>

崔立强<sup>1,2</sup>, 吴龙华<sup>1</sup>, 李娜<sup>1</sup>, 李思亮<sup>1</sup>, 李恋卿<sup>2</sup>, 潘根兴<sup>2</sup>, 骆永明<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008;

2 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

**摘要:** 利用盆栽试验研究了水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响。结果表明: 在 70% 土壤最大田间持水量 (70% WHC) 处理下, 伴矿景天生长最好, 其地上部鲜重显著高于其他处理; 70% WHC 处理伴矿景天对重金属吸收能力最强, 其茎中 Zn 的浓度显著高于其他处理, 茎中 Cd 的浓度分别比 35% WHC、100% WHC、淹水处理高 27.1%、29.0%、63.1%; 叶中的 Zn 浓度表现出与茎中相同趋势, 叶中 Cd 的浓度与茎中不同, 以 100% WHC 处理最高。70% WHC 处理下, 植物提取 Zn、Cd 的效率最高, 其修复效率均显著高于其他处理。这些结果表明, 土壤水分状况在土壤重金属污染伴矿景天植物提取修复中起着重要作用。

**关键词:** 伴矿景天; 水分特征; 生长; 重金属; 吸收性

**中图分类号:** X53

植物修复技术应用范围广, 成本低, 修复后土壤有机质含量增加, 土壤肥力提高, 更适合农作物生长<sup>[1]</sup>。但植物修复技术也有很多限制因素, 如土壤重金属的生物有效性低, 重金属从根系向地上部的转运能力差; 大多数超积累植物生长速率慢、生物量小, 修复周期长, 污染物修复的普适性差, 对土壤的结构、水分、盐度、气候等条件有一定的要求<sup>[2]</sup>。

为克服植物修复的限制因素, 国内外开展了大量的相关研究, 如添加 EDTA、EDDS、DTPA、柠檬酸、丙二酸、组氨酸等螯合剂提高土壤重金属的生物有效性, 并促进修复植物对重金属的吸收<sup>[3-5]</sup>; 加强水肥管理, 有利于增加修复植物的生物量, 因而可增加植物提取重金属的量。孙琴等<sup>[6]</sup>的研究表明, 适当增加 P 用量, 能显著促进东南景天的生长, 提高其干物质产量, 同时促进了东南景天对 Zn 的吸收和 Zn 向地上部分的运输和积累; 李文学等<sup>[7]</sup>的研究发现, 增加超积累植物蜈蚣草的收获次数, 其对 As 的吸收速率并没有降低, 从而可通过增加收获次数提高蜈蚣草的修复效率。

国内外在土壤含水量对修复植物生长和金属吸收性方面报道很少, Angle 等<sup>[8]</sup>在 *Thlaspi caerulescens*, *Alyssum murale*, *Berkheya coddii* 上研究表明, 虽然这

量越高, 生物量越大 (至少土壤含水量到 80% WHC), 植物重金属积累能力越强。伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 是生长于我国浙江铅锌矿地区的一种景天科植物新种, 具有超富集 Zn 和 Cd 的特性<sup>[9]</sup>, 且耐荫, 耐旱。土壤水分条件对伴矿景天的生长以及重金属吸收性有何影响, 这方面鲜有研究。因此, 本文拟以 Zn、Cd 超富集植物伴矿景天为研究对象, 在此方面做一探索, 为修复植物生长的合理水分调控提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物

供试伴矿景天幼苗采自浙江淳安, 将野外植株移至温室生长, 通过扦插的方式培育新植株, 选择大小一致、长势良好的幼苗, 备用。

### 1.2 供试土壤

供试土壤为采自浙江杭州郊区的湿润黏化富铁土, 过 2 mm 筛, 备用。土壤 pH (H<sub>2</sub>O) 为 7.98, 有机 C 含量为 21.3 g/kg, 阳离子交换量 (CEC) 为 12.0 cmol/kg, 全量 N、P、K 分别为 2.01、0.59 和 20.2 g/kg; 碱解 N、Olsen-P 和 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 提取态 K 分别为 77.1、8.82 和 48.7 mg/kg; 全量 Zn、Cd 浓度为 1489

①基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA061001), 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目 (CXTD-Z2005-4) 资助。

\* 通讯作者 (ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 崔立强 (1982—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染植物修复研究。E-mail: lqcui@issas.ac.cn

3 种植物原始环境土壤的含水量很低, 但是土壤含水量和 2.12 mg/kg。

### 1.3 试验设计与实施

盆栽试验共设4个处理,分别为:①土壤含水量为最大田间持水量的35%(35%WHC);②土壤含水量为最大田间持水量的70%(70%WHC);③饱和水分处理(100%WHC);④保持土面有2cm的水层,模拟水稻田间水分,定期落干(晒田)。处理1至处理3,土壤装入有托盘花盆中,每盆1.4kg;对淹水处理,采用底部无孔的塑料花盆。试验每处理4次重复,随机排列;选择长势一致的伴矿景天苗植入盆中,每盆4株。试验于2007年7月30日开始,每天浇水3次,水分控制采用称重浇水法。试验开始后45天进行追肥,每盆施分析纯尿素、磷酸二氢钾各1g,以水溶液的形式施入伴矿景天根部周围。

试验在121天后结束,收获植物地上部分。收获前,测定光合速率;取植物叶片测定丙二醛、脯氨酸、叶绿素含量。收获时,用不锈钢剪刀自靠近土面处,将地上部分全部剪下,称其鲜重并记录,然后用自来水冲洗干净,再用蒸馏水洗两次,在105℃杀青30min,再在70℃烘干至恒重,称量并记录;最后用不锈钢粉碎机磨碎,备用。

### 1.4 测定项目及方法

光合指标的测定:用Li-6400(Li-Cor Inc.,美国)便携式光合作用测定系统,选择晴朗的天气于上午9:30—11:30进行。每株均选择相同部位的叶片测定叶片净光合速率(Pn)。每处理4次重复,每重复测定3株,取平均值。测定时间为2007年6月19日。

土壤理化性状包括有机质、pH值、碱解N、有效P、速效K等的测定采用常规分析方法<sup>[10]</sup>。伴矿景天中的重金属含量采用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>(3:2,v/v)消煮,火焰原子吸收分光光度计(Varian SpectraAA 220FS)测定。收获植株前一天剪取相同部位的成熟叶片,采用比色

法<sup>[11]</sup>测定叶绿素含量;用水合茚三酮法<sup>[11]</sup>测定脯氨酸含量;用硫代巴比妥酸显色法<sup>[11]</sup>测定丙二醛(MDA)含量。

### 1.5 数据整理与统计

试验结果用Excel和SPSS 13.0统计软件LSD法进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水分特征对伴矿景天生长的影响

水分是影响植物生长的重要因素,直接影响植物的生长发育。不同处理对伴矿景天鲜重、干重和含水率的影响结果如表1。在70%WHC处理时,伴矿景天生物量最大。35%WHC、100%WHC和淹水处理的鲜重分别比70%WHC处理低38.0%、82.9%和87.4%;对应的35%WHC、100%WHC和淹水处理的干重分别比70%WHC处理低28.5%、82.4%、87.1%;鲜重和干重表现出相同的变化趋势,即土壤含水量高于或者低于70%WHC时,生物量下降,干物质积累量也下降。由此可见,伴矿景天在70%WHC处理时生长最好,当受到水分胁迫时,无论鲜重还是干重都会受到明显的影响,且表现为淹水胁迫甚于干旱胁迫,淹水处理时,伴矿景天几乎停滞生长,地上部生物量甚至较移栽前更小。尚辛亥等<sup>[12]</sup>的研究也表明,土壤水分在70%WHC时,高山红景天生长最好,水分过低和过高均不利于高山红景天的生长;而且,土壤水分过多也不利于高山红景天地下部分生长,本试验结果与其相似。

从伴矿景天地上部含水率看,70%WHC处理含水率最高,而35%WHC、100%WHC、淹水处理比70%WHC处理分别降低了6.2%、5.6%和5.1%,表明70%WHC处理最适宜伴矿景天的生长。

表1 水分特征对伴矿景天生物量和含水率的影响

Table 1 Effects of different soil moistures on plant biomass and water ratio of *Sedum plumbizincicola*

处理	鲜重 (g/盆)	茎干重 (g/盆)	叶干重 (g/盆)	总干重 (g/盆)	含水率 (%)
35%WHC	87.7 ± 4.6 b	1.23 ± 0.08 ab	7.46 ± 0.70 a	8.68 ± 0.71 a	90.1 ± 0.4 b
70%WHC	141 ± 50 a	1.95 ± 1.06 a	10.2 ± 3.5 a	12.1 ± 4.5 a	96.0 ± 2.0 a
100%WHC	24.1 ± 14.4 c	0.47 ± 0.16 bc	1.66 ± 0.91 b	2.14 ± 1.07 b	90.7 ± 1.1 b
淹水	17.8 ± 4.1 c	0.21 ± 0.06 c	1.36 ± 0.26 b	1.57 ± 0.31 b	91.1 ± 0.8 b

注:表中同一列字母不同表示处理之间差异显著(p<0.05),含水率=(鲜重-干重)/鲜重。

在长期水分胁迫下,植物光合系统机能下降,光合速率下降,导致光合物质生产能力降低,库器官同

化和建成能力锐减,造成性状恶化<sup>[13]</sup>。Mielke等<sup>[14]</sup>研究一种热带耐淹树种凡(AmeFicana)受淹水后的光合

速率和叶绿素荧光时,发现 63 天淹水后,其光合能力下降到对照的 52.9%,而气孔导度下降到对照的 31.7%,即水分含量直接影响了植物的生理机能。本试验中,叶绿素含量和光合速率表现出相同的趋势,即在 35%WHC 处理,伴矿景天的叶绿素含量最高(表 2),

光合能力最强,这与王建伟等<sup>[15]</sup>、王磊等<sup>[16]</sup>在金银花和番茄上的报道结果类似,而与李林锋等<sup>[17]</sup>、蔡锡安等<sup>[18]</sup>在桉树和单性木兰上的报道结果正好相反。这可能是由于较高的叶绿素含量有利于伴矿景天在土壤干旱条件下保持一定的光合速率。

表 2 水分特征对伴矿景天叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of different soil moistures on plant leaf chlorophyll content and photosynthetic rate of *Sedum plumbizincicola*

处理	叶绿素 a (g/kg)	叶绿素 b (g/kg)	总叶绿素 (g/kg)	叶绿素 a/b	光合速率 ( $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )
35%WHC	0.35 ± 0.08 a	0.16 ± 0.03 a	0.51 ± 0.09 a	2.34 ± 0.68 a	9.81 ± 3.93 a
70%WHC	0.33 ± 0.03 a	0.12 ± 0.01 a	0.45 ± 0.04 a	2.64 ± 0.16 a	9.01 ± 1.72 a
100%WHC	0.11 ± 0.04 b	0.07 ± 0.01 b	0.18 ± 0.06 b	1.54 ± 0.35 b	4.36 ± 2.11 b
淹水	0.06 ± 0.05 b	0.04 ± 0.02 b	0.10 ± 0.07 b	1.35 ± 0.37 b	5.34 ± 2.73 b

注:表中同一列字母不同表示处理之间差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

丙二醛是膜脂过氧化作用的最终产物之一,细胞内丙二醛的含量是膜系统受害的标志之一<sup>[19]</sup>。丙二醛的产生量随胁迫强度的提高而增加,标志着细胞膜系统受破坏加重。丙二醛降低膜系统稳定性,引起膜透性增强,并在细胞内累积,从而促进叶绿素降解,光合速率下降等衰老进程<sup>[20]</sup>。因此,伴矿景天在受到水分胁迫时,表现出不同程度的受害症状,如植株矮小,叶片较小,严重时叶片呈鲜暗红色。本试验中,丙二醛含量以 100%WHC 和淹水处理显著高于 35%WHC 和 70%WHC 处理 ( $p < 0.05$ ) (表 3)。

表 3 水分特征对伴矿景天丙二醛和脯氨酸含量的影响

Table 3 Effects of different soil moistures on MDA and proline contents of *Sedum plumbizincicola*

处理	丙二醛 (mg/kg)	脯氨酸 (mg/kg)
35%WHC	0.55 ± 0.18 b	99.8 ± 13.7 a
70%WHC	0.32 ± 0.10 b	96.7 ± 10.4 a
100%WHC	1.73 ± 1.07 a	87.3 ± 11.4 a
淹水	2.07 ± 1.00 a	123 ± 51 a

脯氨酸是植物蛋白质的组分之一,并以游离状态广泛存在于植物体中。脯氨酸具有很高的水溶性,游离脯氨酸含量的增高能够降低叶片的渗透势,防止细胞脱水,可以保护细胞膜系统,维护细胞内膜结构,是酶和亚细胞结构的保护剂,另外还能解除蛋白质分解初期产生NH造成的毒害,防止其他有毒氨基酸的积累。近年来的研究发现,在受到不同环境胁迫时,植物体内常有游离脯氨酸的积累,并且其积累量与逆境水平和植物对这种逆境的抗性有关,因而,测定植物

体内游离脯氨酸含量在一定程度上可以了解植株遭受逆境的情况及植物对逆境的抵抗能力<sup>[21]</sup>。

本试验脯氨酸含量各个处理之间均未达到显著水平。但是干旱和涝渍的脯氨酸含量最高,并且淹水处理高于干旱处理,说明伴矿景天对水分胁迫有很强的抵抗能力(表 3)。

## 2.2 水分特征对伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度以及修复效率的影响

35%WHC 和 70%WHC 处理伴矿景天茎中 Zn、Cd 浓度比叶中高,且修复效率也高(图 1、图 2、图 3),而又以 70%WHC 处理为最高。70%WHC 处理茎中 Cd 的浓度分别比 35%WHC、100%WHC 和淹水处理高 27.1%、29.0% 和 63.1%;而茎中 Zn 的浓度则分别比 35%WHC、100%WHC 和淹水处理的高 21.8%、30.7% 和 41.5%,差异显著 ( $p < 0.05$ )。70%WHC 处理 Zn 的修复效率比 35%WHC、100%WHC 和淹水处理高 49.3%、84.1% 和 92.3%;Cd 的修复效率比 35%WHC、100%WHC 和淹水处理高 42.0%、78.6% 和 90.9%,各处理间 Zn、Cd 修复效率的差异显著 ( $p < 0.05$ )。

在污染土壤中,淹水(厌氧)条件下植物对土壤中重金属的吸收较非淹水条件下的低<sup>[22]</sup>,一方面由于淹水不利于一般植物生长(水生植物除外),另一方面淹水时土壤氧化还原电位较低,大多数金属的溶解度降低<sup>[23]</sup>。Ye 等<sup>[24]</sup>发现在 Pb、Zn 尾矿的土壤中,与干旱条件相比,淹水条件下 *P. australis* 的生物量降低,但对 Pb、Zn、Cu 的吸收量明显增加。Angle 等<sup>[8]</sup>利用 Ni 超富集植物修复 Ni 污染土壤时发现,在低湿度(土壤含水量为田间持水量的 30% ~ 40%)条件下,超富集植物的生长明显受到抑制,植物体内重金属浓度随着

土壤湿度的增大呈增加的趋势，并且植物修复效率的提高也非常明显，两种超富集植物的最高修复效率都出现在土壤水分为田间持水量 80% 的处理条件下，分别为 30% 水分处理的 37 和 77 倍。本文研究也表明 70%WHC 水分条件下，最适宜伴矿景天生长。

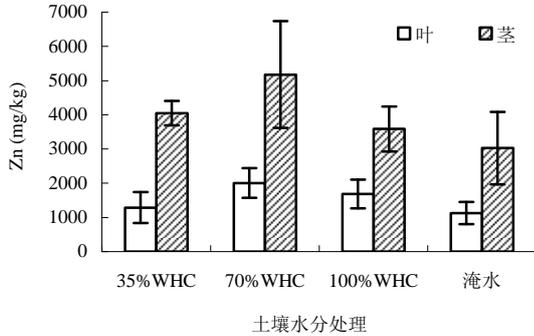


图 1 水分特征对伴矿景天茎和叶中 Zn 浓度的影响

Fig.1 Effects of different soil moistures on Zn concentrations of *Sedum plumbizincicola* leaf and stem

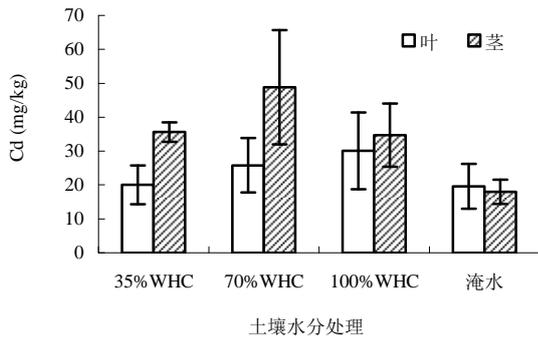


图 2 水分特征对伴矿景天中茎和叶 Cd 浓度的影响

Fig.2 Effects of different soil moistures on Cd concentrations of *Sedum plumbizincicola* leaf and stem

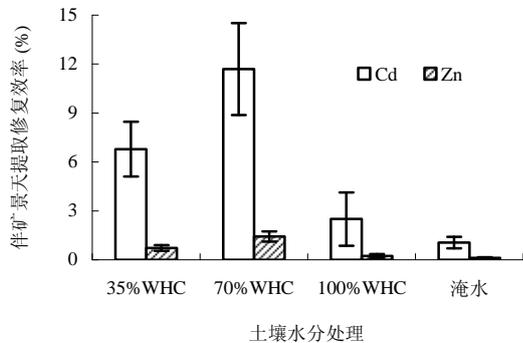


图 3 水分特征对伴矿景天 Zn、Cd 修复效率的影响 (修复效率 = 修复植物地上部某种重金属总量/未修复前土壤中该重金属总量)

Fig.3 Effects of different soil moistures on Zn and Cd phytoextraction efficiency of *Sedum plumbizincicola*

### 3 结论

伴矿景天的生长和 Zn、Cd 吸收性与土壤水分含量有密切的关系。在 70%WHC 处理下，伴矿景天生物量最大，获得的干物质最多，这与光合速率较高，叶绿素含量高有关；在淹水处理下，因为受到水分胁迫，伴矿景天丙二醛、脯氨酸含量最高。在 70%WHC 处理下，伴矿景天吸收 Zn、Cd 的能力最强，而且对 Zn、Cd 污染土壤修复效率也最高，其他处理明显下降。本试验 35%WHC 处理时，无论是生物量，还是重金属的吸收量都不是最大的，但是仅次于 70%WHC 处理，表明伴矿景天有一定的耐旱性。水分管理是伴矿景天修复重金属污染土壤中重要农艺措施，优化土壤水分管理技术能够大幅度提高重金属污染土壤的植物修复效率。

### 参考文献:

- [1] 孙约兵, 周启星, 郭观林. 植物修复重金属污染土壤的强化措施. 环境工程学报, 2007, 1(3): 103-110
- [2] Sas-Nowosielska A, Kucharski R, Malkowski E. Feasibility studies for phytoremediation of metal-contaminated soil. Soil Biology, 2005, 5: 161-177
- [3] Huang RW, Chen JJ, Berti NR. U uptake in *B. chinensis* in relation to exudation of citric acid. Environmental Science & Technology, 1998, 32: 2004-2008
- [4] Evangelou MWH, Daghan H, Schaeffer A. The influence of humic acids on the phytoextraction of cadmium from soil. Chemosphere, 2004, 57: 207-213
- [5] 张敬锁, 张福锁. 有机酸对活化土壤中镉和小麦吸收镉的影响. 土壤学报, 1999, 36 (1): 61-66
- [6] 孙琴, 倪吾钟, 杨肖娥, 丁士明. 磷对超积累植物—东南景天生长和积累锌的影响. 环境科学学报, 2003, 23 (6): 818-824
- [7] 李文学, 陈同斌, 刘颖茹. 刈割对蜈蚣草的砷吸收和植物修复效率的影响. 生态学报, 2005, 25(3): 538-542
- [8] Angle JS, Baker AJM, Whiting SN, Chaney RL. Soil moisture effects on uptake of metals by *Thlaspi*, *Alyssum* and *Berkheya*. Plant and Soil 2003, 256: 325-332
- [9] 吴龙华, 周守标, 毕德, 郭新弧, 秦卫华, 王辉, 王春景, 骆永明. 中国景天科植物一新种——伴矿景天. 土壤, 2006, 38(5): 632-633
- [10] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983
- [11] 赵世杰. 植物生理学试验指导. 北京: 中国农业科技出版社, 1998
- [12] 尚辛亥, 王洋, 阎秀峰. 土壤水分对高山红景天生长和红景天

- 武含量的影响. 植物生理学通讯, 2003, 39(4): 335-336
- [13] 徐世昌, 崔钦. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响. 作物学报, 1995, 21(3): 356-363
- [14] Mielke MS, Almeida AF, Gomes FP, Aguidar MAG, Mangabeira PAO. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth responses of *Genipa Americana* seedlings to soil flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50: 221-231
- [15] 王建伟, 周凌云. 土壤水分变化对金银花叶片生理生态特征的影响. 土壤, 2007, 39(3): 479-482
- [16] 王磊, 任树梅, 毕勇刚, 刘洪禄, 吴文勇. 土壤水分及有机肥料对番茄叶片光合特性及叶绿素含量影响的试验研究. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 66-68
- [17] 李林锋, 刘新田. 干旱胁迫对桉树幼苗的生长和某些生理生态特性的影响. 西北林学院学报, 2003, 19(1): 14-17
- [18] 蔡锡安, 孙谷畴, 赵平, 曾小平. 土壤水分对单性木兰幼苗光合特性的影响. 热带亚热带植物学报. 2004, 12(3): 207-212
- [19] 王爱国. 丙二醛作为植物膜脂过氧化指标的探讨. 植物生理学通讯, 1986, 22(2): 55-57
- [20] 侯建设, 李中华, 席屿芳. 水分胁迫对冷藏韭菜叶片衰老和活性氧代谢的影响. 储存与运输, 2005, 31(5): 143-146
- [21] 曲复宁, 王云山, 张敏, 康黎芳, 闫继耀. 高温胁迫对仙客来根系活力和叶片生化指标的影响. 华北农学报, 2002, 17(1): 127-131
- [22] Gambrell RP, Patrick WH. Fe, Cu, Zn and Cd availability in a sludge amended soil under controlled pH and redox potential conditions. In: Bnayahu BY, Barrow NJ, Jhuda G, Inorganic Contaminants in the Vadose Zone. Berlin: Springer Verlag, 1989: 125-141
- [23] Rieuwerts JS, Thornton I, Farago ME, Ashmore MR. Factors influencing metal bioavailability in soil: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 1998, 10(2): 61-75
- [24] Ye ZH, Wong MH, Baker AJM, Willis AJ. Comparison of Biomass and Metal Uptake between Two Populations of *Phragmites australis* Grown in Flooded and Dry Conditions. *Annals of Botany*, 1998, 82: 83-87

## Effects of Soil Moisture on Growth and Uptake of Heavy Metals of *Sedum plumbizincicola*

CUI Li-qiang<sup>1,2</sup>, WU Long-hua<sup>1</sup>, LI Na<sup>1</sup>, LI Si-liang<sup>1</sup>, LI Lian-qing<sup>2</sup>, PAN Gen-xing<sup>2</sup>, LUO Yong-ming<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** A pot experiment was carried out to study the effects of soil moisture on the growth and heavy metals uptake of *Sedum plumbizincicola* under different water holding capacities (WHC). The results showed that *Sedum plumbizincicola* grew best under the treatment of 70% of WHC, its aboveground plant fresh weight was significantly higher than those of other treatments, its heavy metal uptaking amount was also the highest, and Zn concentration in stem was significantly higher than those of others treatments. Cd concentration in stem under 70% of WHC were 27.1%, 29.0% and 63.1% higher compared to 35% WHC, 100% WHC and water logging treatments respectively; Zn concentration in leaf showed the same trend as the stem, however, Cd concentration in leaf didn't show the same trend as the stem, which showed the highest Cd concentration under 100% of WHC. The phytoextraction efficiency of Zn and Cd were the highest under 70% of WHC. These above results showed that soil moisture plays an important role for the heavy metal phytoextraction by *Sedum plumbizincicola*.

**Key words:** *Sedum plumbizincicola*, Soil moisture, Growth, Heavy metal, Uptake