

不同植物对铅锌矿废弃地矿渣抗侵蚀性的影响

董亚辉^{1,2}, 戴全厚¹, 邓伊晗¹, 江莉莉²

(1. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 以废弃铅锌矿矿渣为同一基质, 选择苗期光皮桦(*Betula luminifera* H. Winkl)、醉鱼草(*Buddleja lindleyana* Fort.)、芦竹(*Arundo donax* Linn.)及五节芒[*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum et Laut.]进行露天盆栽试验, 并以生长200 d后的4种植物根系及矿渣为研究对象, 分析比较了4种植物的根系特征及其对矿渣紧实度、抗冲抗蚀性的影响。结果显示, 4种植物的地下生物量大小为芦竹>醉鱼草>五节芒>苗期光皮桦, 并且芦竹的根系总量明显大于其他3种植物; 4种植物对矿渣的抗蚀性和抗冲性均有明显增强效应, 芦竹对矿渣抗冲抗蚀性的增强效果最明显, 其中芦竹对矿渣抗蚀增强系数达0.98, 对矿渣抗冲性增强值为26.63。矿渣受侵蚀减缓率与植物根系生物量成显著正相关关系。

关键词: 铅锌矿矿渣; 植物根系; 抗冲性和抗蚀性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0064-05

中图分类号: X53

Effects of Different Plants on Slag Erosion Resistance of Lead/Zinc Mine Land

DONG Ya-hui^{1,2}, DAI Quan-hou¹, DENG Yi-han¹, JIANG Li-li²

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. The Second Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: On the same lead/zinc mine slag, the four plants of seedling stage light birch, buddleia, bamboo reed and *Miscanthus floridulus* were selected for an outdoor pot experiment. By taking the four plants roots after 200 days growth and slag as the research object, root system features and their effects on slag anti-scourability, anti-erodibility and compatibility were studied. Results showed that the underground biomasses of the four plants were in the order of bamboo reed > buddleia > *Miscanthus floridulus* > seedling stage light birch. Root volume of bamboo reed was significantly greater than other three plants. The four plants had obvious enhancement effect on slag anti-scourability and anti-erodibility. Bamboo reed showed the most significant effect, with the enhancement coefficient of 0.98 for slag anti-erodibility and the enhancement value of 26.63 for slag anti-scourability. A significant positive correlation was found for the relationship between the root biomass of the plants and the decreased rate of slag erosion.

Keywords: lead/zinc mine slag; plant root system; anti-scourability and anti-erodibility

矿产资源的开采给人类提供了巨大财富的同时, 也给矿区带来了一系列生态环境问题。矿山占地的原因主要是露天采场及各类矿渣、工业垃圾等的堆置。一般一座大型矿山平均占地达 $1.80 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ [1]。众所周知, 由于自然和人为因素, 在重金属矿山的开采至废弃过程中, 一方面极易造成严重的环境污染问题, 另一方面, 对自然地貌的严重干扰, 尤其矿渣的随意堆放, 造成严重的水土流失问题, 进而形成以废弃地遗留物扩散流失而带来的扩散污染问题。

前人对植物修复铅锌矿废弃地矿渣的研究, 主要

集中在超富集植物的选择、矿区植物重金属特性的研究等方面 [2], 而针对矿渣上生长植物的水土保持功能研究鲜有报道, 本文借用前人研究土壤抗冲抗蚀的方法 [3], 以栽植不同植物的矿渣为研究对象, 研究了不同植物对矿渣的综合固渣能力, 旨在为重金属矿山废弃地修复植物选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验容器为直径 20 cm, 高 24 cm 规格的塑料培养钵。供试植物是在铅锌矿废弃地适生植物调查的基

收稿日期: 2012-12-05

修回日期: 2012-12-12

资助项目: 贵州省科技厅社发攻关项目“铅锌矿矿山废弃地植被恢复技术研发与示范”(黔科合 SZ 字[2009] 3003)

作者简介: 董亚辉(1985—), 男(汉族), 河北省高邑县人, 硕士, 研究方向为水土保持与生态恢复重建。E-mail: gddyhshb@126.com。

通信作者: 戴全厚(1969—), 男(汉族), 陕西省长武县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com。

础上选定的,分别为光皮桦(*Betula lumini fera* H. Winkl)、醉鱼草(*Buddleja lindleyana* Fort.)、芦竹(*Arundo donax* Linn.)及五节芒[*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum et Laut]。其中光皮桦和醉鱼草为野生 1 年生幼苗,在贵阳清镇市及花溪区周边采集,采集中选择地径及苗高基本一致的幼苗;芦

竹和五节芒为幼芽,于花溪河周边采集,均为野生。每种植物设计 15 个重复,分别挂牌,同时在植株野外采样点选择相同大小的植株作为对照。

盆栽试验基质为六盘水市嘉联废弃铅锌矿矿渣,用蛇皮袋运回,未作处理直接装盆,每盆 10 kg。矿渣的基本性质如表 1 所示。

表 1 矿渣的基本化学性质

元素	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Fe/ (mg·kg ⁻¹)	Pd/ (mg·kg ⁻¹)	Cr/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机 质/%	pH 值
含量	1 253.75	6 550.00	570.00	203.31	8 812.02	8 682.00	4.88	44.35	2.61	61.30	13.57	7.32

测定试验容器矿渣中生长 200 d 后的光皮桦、醉鱼草、五节芒及芦竹整盆矿渣的整株拉拔力,矿渣盆的紧实度及各种植物下的矿渣抗冲抗蚀性,以同期装盆但未种植植物的矿渣盆作为对照。

1.2 试验方法

(1) 植株整株拉拔试验。土壤植株抗拉性试验采用自制的拉力测定装置,先将花盆带植物垂直放置于有 10 cm 水深的水盆中,待花盆内土壤吸水达到饱和状态后,空去多余的水,用特定的根夹夹住植物的茎底端,通过滑轮与水桶连接,向空桶内缓慢加水作为拉力源,记录根系拉断时水和水桶的质量,然后测出滑轮的摩擦系数,将水和水桶的质量换算成拉力,即得出根系的抗拉强度^[4]。

(2) 矿渣紧实度测定。待花盆内矿渣吸水达到饱和状态后,用紧实度计(具有弹簧游标,并附有各种型号的弹簧与探头)测定花盆中间(约 8 cm)矿渣的紧实程度^[5]。本研究采用直径 10 mm 圆柱探头,根据探头入土深度、探头类型、弹簧的粗细,查“土壤紧实度换算表”即可得到矿渣紧实度的数值。

(3) 矿渣抗冲试验。矿渣抗冲性指标的获取采用改进的原状土冲刷法,水槽宽 20 cm,长 150 cm。具体操作方法是,将植株整盆竖直放置于有 10 cm 水深的水盆中,浸泡至花盆上部有明显水分渗出而达到饱和,以便保证冲刷时直接产生径流,将达到饱和的矿渣柱空去多余的重力水,用电子天平称重,然后将花盆塑料壁沿直径剪开至底部,去掉上半部盆壁,下半部带花盆壁用纸箱盒固定,后横放水槽的末端,使水流最大限度地冲刷矿渣柱的上侧面。试验过程中冲刷坡度保持一致,约为 15°,用溢流装置保持水流速度恒定在 8.5 L/min,冲刷时间为 5 min,5 min 内冲完的以具体冲完的时间计算。用电子天平称量抗冲后含饱和水矿渣柱的重量(含根系),计算出冲刷走的含饱和水的矿渣重,据此进一步计算出抗冲系数,即每冲掉 1 g 含饱和水的矿渣重所需的水量(L),用 C

(L/g)表示。以同期装盆但没有栽植植物的矿渣盆作为对照。

计算根系对矿渣抗冲性影响的指标为土壤抗冲性增强值,用 E(enhancement value of antiscouribility)表示,计算公式为:

$$E=\triangle C/C_0=(C_i-C_0)/C_0 \quad (1)$$

式中:E——土壤抗冲性增强值;C_i——含栽植植物根系矿渣的抗冲系数;C₀——空白对照矿渣的抗冲系数; $\triangle C$ ——由于某种植物根系存在而使矿渣抗冲系数增加的值。那么,E 值就是由于矿渣中根系的存在而使矿渣抗冲性增加的倍数,它能很好地反映某种植物根系对矿渣的抗冲性增强效应^[6]。

(4) 矿渣抗蚀试验。矿渣抗蚀性指标的获取采用改进的静水抗崩解装置。具体方法是将含植株及对照矿渣盆整盆竖直放置于有 10 cm 水深的水盆中,待矿渣盆吸水饱和,沿花盆直径剪开,去掉整个盆壁,用电子天平称重,然后将整盆垂直放在孔径为 2 cm 的铁网网板上,用铁丝圈支架固定以防止倒塌而不影响崩解,置入静水中进行崩解实验,时间以 30 min 为限,30 min 内崩解完的则以具体的崩解时间计算。称量崩解前后含饱和水的矿渣重量(崩解后的矿渣重量也包括崩解掉的根重),计算崩解掉的含饱和水的矿渣重,崩解速率用单位时间崩解的含饱和水的矿渣重来衡量,用 V(g/min)表示。

衡量根系对矿渣抗蚀性的影响,使用矿渣抗蚀性增强系数(coefficient of enhancement antierodibility)来计算,用 C_e表示,计算公式为:

$$C_e=\triangle V/V_0=(V_0-V_i)/V_0 \quad (2)$$

式中:C_e——由于根系的存在而使矿渣崩解速率减缓的系数,也就是根系对矿渣抗蚀性的增强系数;V₀——对照盆矿渣的崩解速率;V_i——含某种植物根矿渣的崩解速率; $\triangle V$ ——由于根系存在而使矿渣崩解速率的减缓值。C_e值的范围在 0~1,其值越接近于 1,增强效应越显著^[6]。

2 结果与分析

2.1 不同植物地下根系分布特点及生物量

罗汝英^[7]将林木根系分为三种类型:主直根型、散生根型和水平根型,按照这种根系分类方法,五节芒和芦竹均为禾本科植物,根的生长为散生根型,醉鱼草的根系偏向于散生根型,光皮桦的根系为主直根型。在盆栽中表现为,芦竹及五节芒的根几乎布满整盆,根系沿着盆壁形成桶状,在盆栽核心部分反而较少;醉鱼草的根系在盆栽中表现为明显的区域性,在整个栽植盆中,一定的位置完全布满根系,而在其他部分根系分别明显减少;光皮桦根系偏向于直根生长,由于侧根还没有发育,其在盆栽中多为苗木向下部垂直生长,在盆栽中的核心根系集中分布,而在盆壁周围明显减少。

考虑到植物不同根径的根会对矿渣不同的作用,对植物的根系按根径分为 $>1\text{ mm}$ 的中细根及 1 mm 以下的极细根两大类,由表 2 可知,4 种植物的地下生物量大小为芦竹 $>$ 醉鱼草 $>$ 五节芒 $>$ 光皮桦。而且芦竹的根系总量明显大于其他 3 种植物,4 种植物根系中根径 $>1\text{ mm}$ 与 $<1\text{ mm}$ 的根的生物量比分别为 $1:1.21, 1:2.36, 1:6.88, 1:2.28$ 。

表 2 不同植物根系生物量及根密度

植物名称	干重/g			根密度/ ($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)
	根径 $>1\text{ mm}$	根径 $<1\text{ mm}$	总量	
光皮桦	6.25	14.25	20.50	4.36
醉鱼草	11.50	27.17	38.67	8.23
五节芒	4.17	28.67	32.83	6.99
芦竹	42.50	51.83	94.33	20.07

2.2 不同植物在矿渣上的整株抗拉拔特征

4 种植物的整株抗拉拔力大小为:芦竹 $>$ 五节芒 $>$ 醉鱼草 $>$ 光皮桦,其中芦竹的抗拉优势明显,为 203.77 N ,为五节芒 138.30 N 的约 2 倍,醉鱼草与苗期光皮桦的整株抗拉拔能力相近,分别为 73.12 和 70.58 N 。

将 4 种植株的抗拉拔力,分别与其地上、地下及总生物量指标进行拟合,拟合结果显示,植株的整株抗拉拔性与植株的生物量密切相关。其中,与植株的总生物量关系最为显著,相关系数达 0.95 以上,除此以外,植株的抗拉能力与植株根系生物量呈正相关关系,尤其与根径 $>1\text{ mm}$ 的根系生物量关系密切,相关性达 0.89 ,为显著正相关。与根径 $<1\text{ mm}$ 的根系生物量相关性为 0.85 ,也为显著正相关,分别与地上地下生物量相关性稍低,均为正相关。

2.3 不同植物对矿渣紧实度的影响

从图 1 可知,4 种盆栽植物的中心矿渣紧实度大

小为:苗期光皮桦 $>$ 醉鱼草 $>$ 无节芒 $>$ 芦竹 $>$ 空白。矿渣上种植植物后,由于根系的固结、缠绕,使原本颗粒较多,黏性极差的矿渣逐渐结合在一起,矿渣的紧实度明显增加。

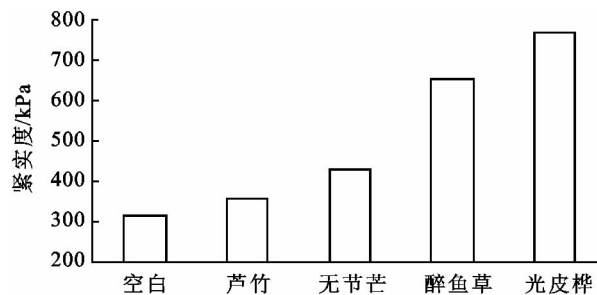


图 1 种植不同植物的矿渣紧实度

土壤紧实度与植株的拟合关系显示,矿渣紧实度与根系生物量为负相关,相关性显著($R^2=0.76$)。出现这种情况,笔者认为因植物生长在固定体积容器中,根系生物量不同,导致根密度分布不同所致。光皮桦及醉鱼草根生物量要远小于芦竹及五节芒,这 2 种植物的根系在盆栽矿渣中的生长远没有达到饱和,更多地表现为对矿渣的固结、牢笼,更偏向于根系对土壤的加筋作用。而芦竹及五节芒的根系生物量过高,在盆栽中的根密度达到 $6.99, 20.07\text{ g/dm}^3$,这样高的根密度是外界环境限制所致(盆栽容器固定)。

2.4 不同植物对矿渣抗蚀性的影响

由表 3 可见,4 种植物对矿渣的抗蚀性均有明显增强效应,醉鱼草、五节芒及芦竹对矿渣抗蚀增强系数均在 0.95 及以上,最高的芦竹达到 0.98 ,醉鱼草对矿渣抗蚀性增强效果稍低,增强系数为 0.67 。整体上 4 种植物对矿渣抗蚀性增强系数差异性不显著,尤其醉鱼草、五节芒及芦竹之间差异不明显。从崩解结果来看,在矿渣上种植植物以后,能够明显减少矿渣被悬浮崩解的数量。在没有种植植物的矿渣,极易被悬浮崩解,可以说是遇水即散,在 30 min 内,有 $3\ 955\text{ g}$ 矿渣随水崩解,而种植植物后,矿渣的崩解量明显降低,其中芦竹的降低量最为明显,只有 95 g ,为空白对照盆的近 $1/40$,植物盆中,减少量最少的为光皮桦,其冲出量约为对照盆的 $1/3$ 。矿渣上栽植植物后,较之空白对照矿渣,其在静水中的崩解速率大大降低。

将植物对矿渣抗蚀性增强系数分别与植物根系总干重、根径 $>1\text{ mm}$ 及根径 $<1\text{ mm}$ 的根系生物量进行相关性分析,结果显示,矿渣受侵蚀减缓率与植株根系总重、根径 $<1\text{ mm}$ 及根径 $>1\text{ mm}$ 根系生物量呈正相关关系,其中矿渣受侵蚀减缓率与植株根径 $<1\text{ mm}$ 根系生物量呈极显著相关,决定系数 $R^2=0.951$;与植株

根径 $>1\text{ mm}$ 及根系总生物量相关显著性有所降低,决定系数 R^2 分别为0.767和0.864,为正相关。这说明随着根系的增多,矿渣在水中的崩解速率会降低。这同吴淑安等^[8]的研究结果一致,他们发现有植物根系的土壤,其崩解速率远比少根系或缺根系的土壤慢。

表 3 种植不同植物的矿渣静水崩解情况

植 物 名 称	30 min 矿渣崩解结果		矿渣抗蚀性 增强系数
	崩解量/g	崩解速率/(g·min ⁻¹)	
光皮桦	1 308	43.60	0.67
醉鱼草	205	6.83	0.95
五节芒	163	5.43	0.96
芦 竹	95	3.17	0.98
空 白	3 955	131.83	—

2.5 不同植物对矿渣抗冲性的影响

4种植物对矿渣的抗冲性均有明显的增强效应,但是不同物种对矿渣的抗冲性增强效应不同(表4)。总体上看,芦竹对矿渣抗冲性的增强效果最明显,为26.63,其次为醉鱼草的14.27及五节芒的4.0,增强效果最弱的为光皮桦的1.46。4种植物对矿渣抗冲性增强效应差异性极显著($p<0.05$)。反映到冲刷结果上,矿渣上栽植植物,其根系的缠绕固结使矿渣被水流冲刷出的量明显减小,空白矿渣盆在5 min内,冲出2 901 g,种植植物后,冲刷出矿渣量明显减少,减少量最多的为芦竹与醉鱼草,减少量在2 700 g以上,减少量最少的光皮桦,减少量也在1 700 g以上。矿渣在自然环境中多以粗颗粒状、随意堆砌的人为堆积体形态出现,易于被冲刷,尤其在暴雨下,矿渣上往往出现明显的沟蚀现象。可以看出,单纯花盆中堆砌200 d的矿渣,冲走每1 g矿渣仅需要0.01 L的径流,而只要有植物生长,冲走每1 g矿渣所需要的水量会成倍地增加。

表 4 种植不同植物的矿渣冲刷情况

冲刷值	5 min 矿渣冲刷结果		矿渣抗冲性 增强值
	冲出量/g	冲刷速率/(L·g ⁻¹)	
光皮桦	1 180	0.04	1.46
醉鱼草	190	0.22	14.27
五节芒	580	0.07	4.00
芦 竹	105	0.40	26.63
空 白	2 901	0.01	—

将植物对矿渣抗冲性增强值与植物根系生物量进行拟合分析,结果显示,4种植物对矿渣抗冲性增强值与植物根系总生物量呈显著正相关,决定系数 $R^2=0.898$,同时分别把根直径 $>1\text{ mm}$ 及根径 $<1\text{ mm}$ 的根生物量与植物对矿渣抗冲性增强值进行拟合,结果显示,两者均与矿渣抗冲性增强值呈显著

正相关,决定系数分别为0.833及0.877 5。总体上与前人^[9-11]研究结果基本一致。

3 讨论

根系与基质(大多数为土壤)紧实度的相关研究对土壤紧实度对植物生长的影响进行了分析,譬如,在紧实土壤中根系生长速度减慢,根型变粗,紧实度高有利于根系对营养及水分的吸收^[12]。有研究表明,部分植物在生长的一定时期,土壤紧实度会随着植物根系生物量的增加而增大,主要考虑到在固定体积内,根系的增加对土壤本身的挤压^[13]。而过高的根密度,会增加根系的凋谢死亡^[12],也就是增加了根系的死根量,从而增加矿渣有机质含量,使心土熟化,降低矿渣的坚实度和容重。所以在盆栽容器中,由于不同植物根生长特性及容器体积的限定,当植物根系达到一定密度的时候,会表现出基质紧实度随根系生物量增加而增加或降低的现象。结合铅锌矿废弃地中矿渣随意堆放且堆放面积、厚度大的现实,笔者认为,芦竹及五节芒的栽植,更多地会表现出对矿渣紧实度的增加上。

本试验未对植物根系严格分级,但是植物根系对矿渣抗侵蚀性的增强效果却与植物的总根系生物量成正相关。笔者认为,这一方面是因为矿渣本身的特性,即疏散性,只要有根系的存在,就会对矿渣进行缠绕固结,增加其整体性,尤其在盆栽试验中;另一方面,本次栽植的植物,未出现较粗大的根系($d>2\text{ mm}$),且根径 $<1\text{ mm}$ 的根生物量要远高于根径 $>1\text{ mm}$ 的根生物量,按照通用的根系分级法,均属于细根的范畴。有研究表明,土壤抗冲性强化值与 $<1\text{ mm}$ 径级的须根密度关系最为密切^[14],因此针对本次抗冲试验可以认为,在矿渣抗冲贡献率上,植物 $<1\text{ mm}$ 的根系发挥主要作用,这与前人研究土壤的结果相一致。

植物根系的存在,会增强土壤抗侵蚀能力,前人已做了较多的研究,本次试验的基质选为铅锌矿废弃地上的矿渣,由于矿渣与土壤有明显的物理性状上的差异,植物根系对矿渣抗侵蚀能力的增强效果更趋于直接和明显。因此,有必要在自然状态下的铅锌矿废弃地矿渣上进行不同适生植物的生态修复示范,并设立水土保持监测配套设施,进行铅锌矿废弃地水土流失监测,以期为今后铅锌矿废弃地生态修复全面的效益评价提供数据支持。

4 结论

(1)盆栽4种植物的根系生物量大小表现为芦竹 $>$ 五节芒 $>$ 醉鱼草 $>$ 苗期光皮桦,且主要集中在根径 $<1\text{ mm}$ 的根系上。

(2) 植株的抗拉拔能力大小为芦竹>五节芒>醉鱼草>苗期光皮桦。植株的整株抗拉拔性,与根系生物量密切相关。4 种盆栽植物的中心矿渣紧实度大小为苗期光皮桦>醉鱼草>芒草>芦竹>空白。矿渣紧实度与根系生物量之间为负相关,相关性显著。

(3) 4 种植物对矿渣的抗蚀性均有明显增强效应,醉鱼草、五节芒及芦竹对矿渣抗蚀增强系数均在 0.95 及以上,矿渣受侵蚀减缓率与植株根系总重、根径<1 mm 及根径>1 mm 根系生物量呈正相关关系。

(4) 4 种植物对矿渣的抗冲性均有明显的增强效应,但是不同物种对矿渣的抗冲性增强效应不同。芦竹对矿渣抗冲性的增强效果最明显,增强效果最弱的为苗期光皮桦。4 种植物对矿渣抗冲性增强效应差异性极显著($p<0.05$)。植物对矿渣抗冲性增强值与植物根系生物量呈显著正相关。

[参 考 文 献]

- [1] 吴烈善,彭省临. 金属矿山生态环境问题及其防治对策[J]. 南方国土资源,2004(11):118-120.
- [2] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报,2005,25(5):1146-1151.
- [3] 赵新宇,赵岭,王立刚. 阿伦河流域水土保持林土壤抗蚀性研究[J]. 防护林科技,2000(3):21-23.
- [4] 付兴涛,张丽萍,喻理飞,等. 植物苗期根系抗侵蚀特性试验研究:以构树和顶坛花椒为例[J]. 水土保持学报,2008,22(33):5-9.
- [5] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: model documentation[C]// Technical Bulletin No. 1768. Washington D C: US Department of Agriculture, 1990:235.
- [6] 徐少君,曾波. 三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J]. 水土保持学报,2008,22(6):13-18.
- [7] 罗汝英. 森林土壤学[M]. 北京:北京科学出版社,1983,367-370.
- [8] 吴淑安,蔡强国. 土壤表土中植物根系影响其抗蚀性的模拟降雨试验研究:以张家口试验区为例[J]. 干旱区资源与环境,1999,13(3):35-42.
- [9] 戴全厚,张力,刘艳军. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 水土保持通报,1998,18(6):8-11.
- [10] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [11] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报,1998,4(1):93-96.
- [12] 刘晚苟,山仑,邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯,2001,37(3):254-260.
- [13] 张小全,吴可红. 森林细根生产与周转研究[J]. 林业科学,2001,37(3):126-135.
- [14] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报,1993,7(3):11-18.
- [12] 吴小丹,蔡立湘,鲁艳红,等. 长期不同施肥制度对红壤性水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 土壤肥料科学,2008,24(12):283-288.
- [13] 倪进治,徐建民,谢正苗,等. 不同有机肥料对土壤生物活性有机质组分的动态影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(4):374-378.
- [14] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报,2006,43(5):723-729.
- [15] 蔡太义,黄耀威,黄会娟,等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1962-1968.
- [16] 沈宏,曹志洪,王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 自然资源学报,1999,14(3):20-210.
- [17] 汪吉东,张永春,俞美香,等. 不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及 pH 值的影响[J]. 江苏农业学报,2007,23(6):573-578.
- [18] 邱莉萍,张兴昌,程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学,2009,29(1):84-89.
- [19] 徐明岗,于荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.
- [20] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报,2003,23(4):787-796.

(上接第 14 页)

- [5] Dalai R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland(IV): Loss of organic carbon from different density fractions[J]. Australian Journal of Soil Research, 1986,24(2):301-309.
- [6] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7):1459-1466.
- [7] Logninow W, Wisniewski W, Strony W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20(1):47-52.
- [8] 肖胜生,董云社,齐玉春,等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(10):1138-1148.
- [9] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学,2005,41(1):10-13.
- [10] 薛蕙,刘国彬,潘彦平,等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1458-1464.
- [11] Martin H, Markus R. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. Nature, 2008,451(7176):289-292.