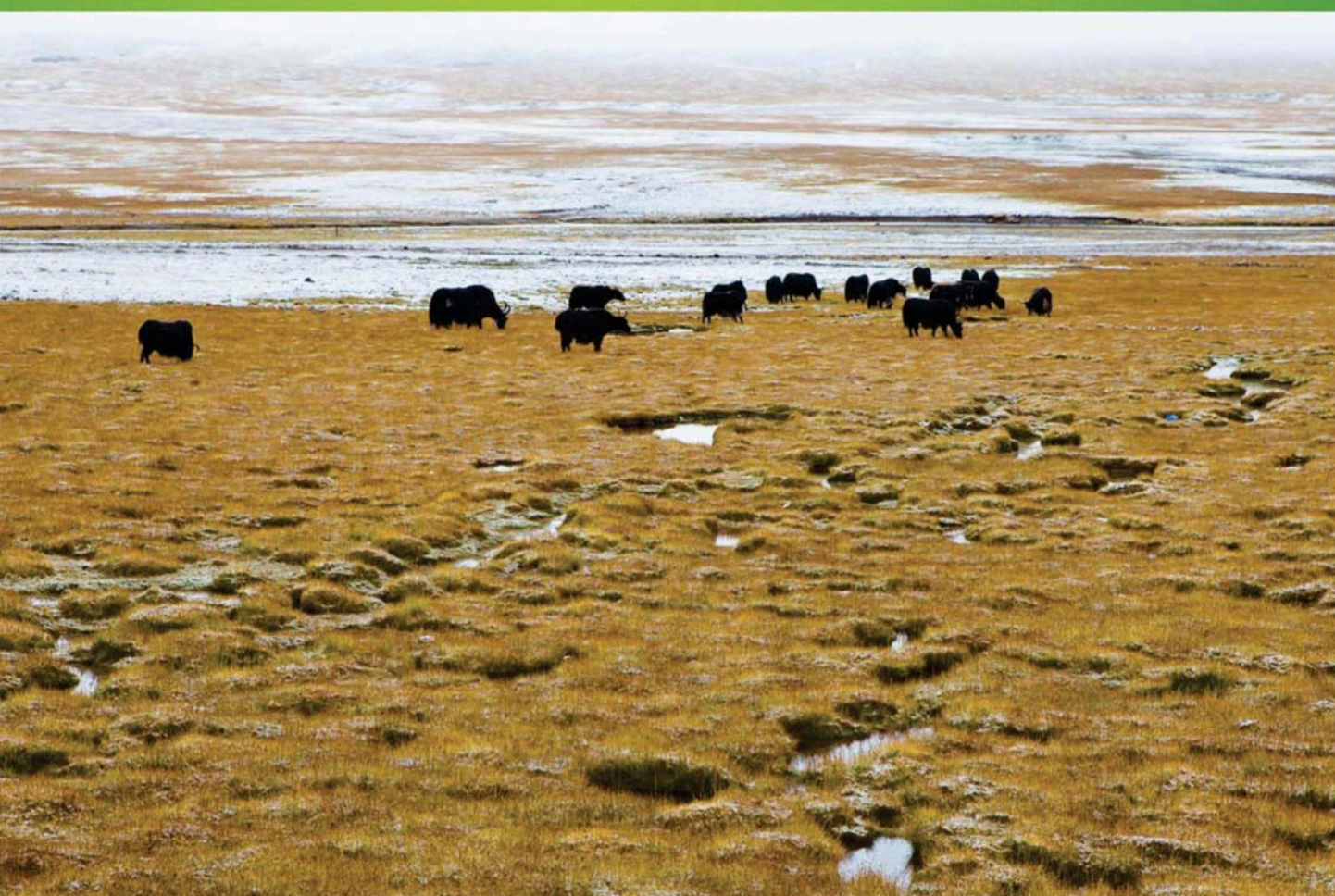


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第16期 Vol.33 No.16 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 16 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 物种分布模型理论研究进展..... 李国庆,刘长成,刘玉国,等 (4827)
- 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展..... 金姝兰,黄益宗 (4836)
- 藤壶金星幼虫附着变态机制..... 饶小珍,林 岗,许友勤 (4846)
- 群居动物中的共同决策..... 王程亮,王晓卫,齐晓光,等 (4857)

个体与基础生态

- 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响..... 包云轩,黄金颖,谢晓金,等 (4864)
- 两种海星对三种双壳贝类的捕食选择性和摄食率..... 齐占会,王 珺,毛玉泽,等 (4878)
- 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择..... 董 超,张国钢,陆 军,等 (4885)
- 我国特有植物青檀遗传结构的 ISSR 分析..... 李晓红,张 慧,王德元,等 (4892)
- 栽培菊花与菊属-近缘属属间杂种杂交后代耐盐性的遗传分析..... 许莉莉,陈发棣,陈素梅,等 (4902)
- 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用..... 张海娜,苏培玺,李善家,等 (4909)
- 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响..... 陈凯利,李建明,贺会强,等 (4919)
- 广西猫儿山不同海拔常绿树种和落叶树种光合速率与氮的关系..... 白坤栋,蒋得斌,万贤崇 (4930)
- 施肥对板栗林地土壤 N₂O 通量动态变化的影响..... 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等 (4939)
- 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响..... 刘希玉,王忠强,张心昱,等 (4949)

种群、群落和生态系统

- 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量..... 牟长城,王 彪,卢慧翠,等 (4956)
- 基于多时相 Landsat TM 影像的汶川地震灾区河岸带植被覆盖动态监测——以岷江河谷映秀-汶川段
为例..... 许积层,唐 斌,卢 涛 (4966)
- 不同强度火干扰下盘古林场天然落叶松林的空间结构..... 倪宝龙,刘兆刚 (4975)
- 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素..... 蔡永久,姜加虎,张 路,等 (4985)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群年龄结构和性比..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (5000)
- 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型..... 赵志国,荣二花,赵志红,等 (5008)
- 秋末苏南茶园昆虫的群落组成及其趋色性..... 郑颖姘,钮羽群,崔桂玲,等 (5017)
- 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响..... 韩雪梅,李丹丹,梁子安,等 (5026)

景观、区域和全球生态

- 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用..... 杨天翔,张韦倩,樊正球,等 (5035)
- 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态..... 张远东,庞 瑞,顾峰雪,等 (5047)

江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素..... 赵明松,张甘霖,李德成,等 (5058)

基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征..... 张明阳,罗为检,刘会玉,等 (5067)

资源与产业生态

基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (5078)

基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 张 锐,郑华伟,刘友兆 (5090)

保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁 (5101)

城乡与社会生态

生态保护价值的距离衰减性——以三江平原湿地为例..... 敖长林,陈瑾婷,焦 扬,等 (5109)

研究简报

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应..... 姜 春,吴志峰,钱乐祥,等 (5118)

室内养殖雌性松鼠秋季换毛期被毛长度和保温性能变化..... 荆 璞,张 伟,华 彦,等 (5126)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说: 高寒草甸牦牛群——三江源区位于青藏高原腹地,平均海拔 4200m,是长江、黄河、澜沧江三条大河的发源地,也是全球气候变化最敏感的地区。三江源区高寒草甸植被状况对该区的生态环境、草地资源合理利用和应对全球气候变化具有十分重要的意义。2005 年以来,国家投资 70 多亿元启动三江源生态保护工程。监测显示,近年来,三江源湖泊湿地面积逐步扩大,植被覆盖度得到提高,三江源区高寒草甸的生态恶化趋势得到遏制。图为冒着风雪在三江源高寒草甸上吃草的牦牛群。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201212311902

金姝兰, 黄益宗. 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展. 生态学报, 2013, 33(16): 4836-4845.

Jin S L, Huang Y Z. A review on rare earth elements in farmland ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4836-4845.

稀土元素对农田生态系统的影响研究进展

金姝兰¹, 黄益宗^{2,*}

(1. 上饶师范学院, 上饶 334000; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 稀土矿的开采和冶炼、稀土农用等导致农田土壤稀土元素含量不断积累, 对农田生态系统结构和功能稳定产生严重的影响。综述了近 20 年来国内外农田生态系统稀土元素的主要来源、分配和输出, 土壤和植物中稀土元素的测定方法, 稀土元素对农田生态系统中植物、微生物、动物以及人类健康影响的研究进展。探讨了农田生态系统稀土元素的毒性评价和稀土污染土壤的修复措施。最后提出开展稀土元素对农田生态系统影响研究还需要加强的一些问题。

关键词: 稀土元素; 农田生态系统; 土壤; 修复

A review on rare earth elements in farmland ecosystem

JIN Shulan¹, HUANG Yizong^{2,*}

1 Shangrao Normal University, Jiangxi, Shangrao 334000, China;

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Rare earth ore mining and smelting, application of rare earth elements in farm lead to accumulation of rare earth elements in soil, and affect the structure and function stability of farmland ecosystem. This article reviews the main source, distribution and output of rare earth elements in farmland, the determination method of rare earth elements in soils and plants, and the effect of rare earth elements on crops, microorganisms, animal and human health in farmland ecosystem. Rare earth element toxicity evaluation and rare earth contaminated soil remediation of farmland ecosystem are discussed in the paper. Finally some problems will be pay attention to studying of rare earth elements on farmland ecosystem in the future.

Key Words: rare earth elements; farmland ecosystem; soil; remediation

我国是世界上稀土资源最为丰富的国家之一。2012 年国务院新闻办发布的《中国的稀土状况与政策》白皮书显示, 我国的稀土储量为 1859 万 t, 约占世界总储量的 23%^[1]。2011 年, 中国稀土产量为 9.69 万 t, 实际出口 1.86 万 t, 占世界总产量的 90% 以上, 承担了世界 90% 以上的市场需求^[1]。可见, 我国不仅是世界稀土资源大国, 更是稀土生产、稀土出口和消费大国。在稀土资源的开发和冶炼过程中, 由于监管不到位、非法开采、工艺落后、“三废”排放等原因, 导致矿区周边水体和土壤稀土元素、重金属和浸矿剂污染比较严重。稀土矿开发和冶炼将产生大量的稀土尾矿, 尾矿在降雨的冲刷和淋滤下, 稀土元素、重金属等污染物质排入水体和土壤, 导致农田绝收、水体生物多样性下降, 周边居民的身体健康受到严重威胁^[2]。另外, 稀土农用在我国比较普遍, 虽然适量的稀土元素可增强作物的光合作用, 促进作物根系生长, 提高作物抵抗病虫害和逆境的能力, 并显著地提高作物的产量, 但是长期施用稀土也导致稀土元素在农田土壤中不断积累, 从而对农田生态系

基金项目: 中国科学院院地合作资助项目(江西省典型矿区及周边土壤重金属污染特征及其联合修复技术)

收稿日期: 2012-12-31; 修订日期: 2013-06-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hyz@rcees.ac.cn

统产生影响。Jiang 等^[3]调查了 16 种稀土元素在北京、福建、广东、湖南、湖北和上海 6 省市主要食物中的积累情况,发现食物中铈(Ce)、镝(Dy)、钇(Y)、镧(La)和钕(Nd)的含量非常高。农田生态系统由农田环境因素和生物群落构成,为人类生存提供食物,是人类赖以生存的基础。稀土元素对农田生态系统的影响较少有系统的报道,本文综述了近 20 年来国内外有关稀土元素对农田生态系统影响的研究进展,探讨稀土对农田生态系统农作物、微生物和动物的影响,为我国稀土资源的合理开发、农田环境保护和保障人体健康提供有益借鉴。

1 农田生态系统稀土的输入、分配与输出

1.1 稀土输入

我国稀土资源主要分布在以包头为中心的北方地区和以江西为代表的南方地区。稀土资源的开发和冶炼过程中,由于管理混乱、非法开采、工艺落后、采富弃贫、采矿回收率低、资源浪费等原因,造成矿区周边环境污染日益严重。包头地区气候较干旱,风沙大,稀土尾砂容易随风进入大气。另外包头地区的一些污灌区土质多为砂壤土和砂土,稀土元素容易从土壤中淋溶至地下水,导致地下水稀土元素含量超标。包头地区的土壤多呈弱碱性,这种土壤更有利于吸附稀土离子,其对不同稀土元素离子的吸附能力大小顺序为: $\text{Sm}^{3+} > \text{Nd}^{3+} > \text{La}^{3+} > \text{Ce}^{3+}$ ^[4]。有研究报道,包头表层土壤稀土 La、Ce、镨(Pr)、Nd、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)呈现局部富集,主污水渠滨岸漫水地、四道沙河河底沉积物、工厂污水渠底部沉积物及其剖面样、农田土壤 La 元素含量分别为 2924、427.60、309.30、113.26 和 44.94 mg/kg,分别是背景值 30.04 mg/kg 的 97.33、14.25、10.16、3.72 和 1.50 倍;Ce 含量分别为 4524.00、581.20、382.00、185.52 和 91.08 mg/kg,分别是背景值 358.29 mg/kg 的 77.61、9.97、6.55、3.18 和 1.56 倍^[4-5]。江西赣南的土壤类型主要为红壤,在高温多雨的条件下土壤矿物质化学分解作用强烈,土壤中的活性化合物易于淋失,而铁和铝的氢氧化物则较多积累,从而形成高岭土和多水高岭土组成的粘土矿物,在这种条件下形成的土壤易于积累稀土元素^[6]。土壤质地较粘重的红壤,比砂壤土更容易吸附和富集稀土元素。温小军等研究了赣南信丰某稀土矿区耕作层的土壤环境,发现研究区耕作层所有土壤样品的稀土元素地累积指数均较大,稀土元素全量均远远大于全国土壤背景的相应值,La、Ce、Y、Sm、Pr 和 Gd 的全量超标率分别为 100%、97.3%、100%、86.49% 和 100%^[7]。江西省南部稀土矿区村民饮用井水的稀土含量平均为 9.18 $\mu\text{g}/\text{L}$ 是非矿区稀土含量的 24.8 倍,土壤的稀土含量达 869.73 $\mu\text{g}/\text{g}$ 是非矿区稀土含量的 3.8 倍,蔬菜的稀土含量 6370.35 ng/g(干重)是非矿区稀土含量的 7 倍以上^[8]。Li 等^[9]研究表明,稀土在土壤中的积累浓度与矿区距离呈显著相关关系,说明矿产开采冶炼造成了稀土元素在土壤、水体和生物中的超量积累和环境污染,仅赣州一地因为稀土开采冶炼造成的环境污染所需的环境恢复和治理费用就高达 380 亿元^[10]。

稀土农用并作为一种微肥使用在我国已有 40 年的历史,且应用范围越来越广,涉及种植业、林业、畜牧业和渔业等方面。目前我国农田施用稀土面积每年约达 333.33—466.67 万 hm^2 。我国常用的稀土复混肥中,每吨含混合稀土 0.8—1.6 kg,若以每 hm^2 地每季施复混肥 750 kg 计,则每年两季进入耕层土壤的混合稀土为 1200—1400 g/hm^2 。研究发现,土壤中稀土元素的含量与稀土的施加量呈一定的剂量关系。随着外施稀土浓度增加,水稻土中 La、Ce、Pr、Nd 和 Gd 含量显著提高^[11]。

1.2 稀土分配与输出

外源稀土进入土壤后,99.5% 以上被土壤固相表面所吸附^[12],绝大部分残留在土壤表层。被土壤吸附固定的稀土可以通过沉淀-溶解、吸附-解吸、氧化-还原、配合作用、生物富集等多种途径进行迁移和转化。外源稀土进入土壤后的形态转化受到土壤 pH、氧化还原电位、有机质、粘粒矿物等的影响。据报道,在 pH 值和无定形氧化铁、锰含量较低的红壤中,外源稀土主要以交换态和氧化锰结合态存在,其中交换态稀土含量高达 45%—60%;黑土、黑钙土、黄棕壤和砖红壤中外源性稀土主要以无定形结合态和有机结合态存在,交换态稀土含量少于 10%^[13]。土壤中可溶态和交换态稀土含量较高时将提高稀土在土壤中的迁移性,容易被植物吸收和积累,进而通过食物链途径进入人体,从而对人类健康造成危害。研究表明,植物中稀土元素的含量与稀

土的施用量呈现显著的正相关关系,重稀土元素从植物地下部向地上部迁移的能力强于轻稀土元素^[13]。李小飞等^[14]研究发现,福建省长汀县稀土矿区蔬菜地土壤中稀土元素平均含量高于福建省土壤稀土元素含量的背景值,蔬菜中的稀土元素含量高于一般农田种植作物的稀土元素含量,矿区井水中稀土元素含量的平均值是福州自来水的 118.7 倍,矿区居民血液中稀土元素含量高于对照区居民的 155.6 倍,男女性居民头发中稀土元素含量分别是对照区的 9.62 倍和 9.48 倍。

2 土壤和植物中稀土元素的测定方法

农田生态系统中土壤和植物稀土元素的含量测定是判断土壤是否受到稀土元素污染、植物是否受到稀土元素危害的主要依据。土壤和植物样品需经过高压密闭消解、干法灰化消解和微波消解等前处理才可以对其进行稀土元素含量的测定。

稀土元素常见的测定方法有分光光度法、原子吸收法、原子荧光法、X-射线荧光光谱法、中子活化法、电感耦合等离子体光谱法(ICP-OES)、电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等^[15]。采用分光光度法分析稀土元素 La 与偶氮氯膦Ⅲ(CPA Ⅲ)、溴化十六烷基三甲铵(CFMAB)的显色反应,发现在酸性介质 1.2 mol/L HCl 中稀土 La 能与 CPA Ⅲ显色剂形成稳定的蓝绿色络合物,最大吸收波长为 722 nm,该显色反应灵敏度高、选择性好,并在大多数共存元素存在下不干扰测定结果^[16]。目前 ICP-MS 已成为人们测定土壤和植物稀土元素含量最有优势的方法^[17-20]。林立等^[21]采用微波消解和干法灰化处理样品,ICP-MS 测定国家标准物质茶叶 GBW07605 和 GBW10016 中的 16 种稀土元素,测定值与标准值非常吻合,样品测定精度为 0.6%—6.3%,方法检出限为 0.04—0.43 μg/kg。用加标回收法进行评价,回收率在 96.0%—108.0% 之间。高朋等建立了微波消解-ICP-MS 测定土壤稀土元素的方法,样品回收率在 93.0%—101.0% 之间,测定结果比较满意^[22]。

3 稀土元素对农田生态系统的影响

3.1 农作物

农作物是农田生态系统中的主要组成部分。土壤中稀土元素的含量和分布将直接影响作物样品中的稀土元素含量和分布特征,进而影响作物种子发芽、光合作用、抗逆性、产量和品质等。实验发现,喷施 120 mg/L $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 溶液的嫁接西瓜产量比对照处理提高 10.43%,而大于 180 mg/L 的 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 浓度则会抑制西瓜的生长,降低其产量和品质^[23]。Xie 等研究氯化镧浸种对小麦种子萌发的影响,发现浓度为 0.05—100 mg/kg 的氯化镧对种子萌发有促进作用,而超过 100 mg/kg 的氯化镧处理则对种子萌发具有抑制作用^[24]。d'Aquino 等^[25]研究发现,用浓度为 0.01 mmol/L La^{3+} 和 0.1 mmol/L 混合稀土分别浸泡小麦种子 8 h 就对种子萌发产生抑制作用,而将两者的浓度分别提高到 1 mmol/L 和 10 mmol/L 后,仅分别浸泡 2 h 和 4 h 即对种子萌发产生抑制作用。当氧化镧、氧化钪和氧化铈纳米颗粒的浓度为 2000 mg/L 时,就严重地抑制小麦、油菜、卷心菜和黄瓜等作物根系的生长^[26]。研究 La 对 Cd 胁迫下蚕豆幼苗生长的影响,发现低浓度的 La ($<120 \mu\text{mol/L}$) 可缓解 Cd 对蚕豆幼苗的伤害,降低蚕豆根系的 Cd 含量。相反高浓度 La 加重 Cd 对蚕豆幼苗的伤害,蚕豆根系的 Cd 含量显著高于单独 Cd 处理的含量^[27]。Wen 等^[28]研究发现,单独添加低浓度的 La^{3+} 可促进大豆幼苗的生长;低浓度 La^{3+} 和酸雨复合处理时,大豆幼苗的生长就受到抑制;高浓度 La^{3+} 和酸雨复合处理时,大豆幼苗叶绿体的超微结构将严重地受到破坏。

稀土元素对作物光合作用、膜的稳定性、抗氧化系统、营养元素吸收等均产生影响。低浓度的稀土可以诱导作物叶绿素合成,增强作物的光合作用^[29-31]。Tb、Sm、Dy、Ho、La 和 Ce 处理使棉花和小麦叶片的叶绿素含量比对照处理提高 33%—54%^[32]。农作物经过一定浓度的稀土元素处理后,其叶绿体内的色素捕光能力得到提高,光系统 PS I 和 PS II 的活性增强, Rubisco-Rubisco 活化酶超复合体被诱导,从而提高作物光合碳同化的能力^[33]。稀土离子与 Ca^{2+} 在性质和结构上相似,可以占据或替代 Ca^{2+} 在植物细胞中的位置,从而影响一系列的生理功能,因此稀土被称为超级钙^[34]。适宜浓度的稀土元素能影响作物细胞的超微结构,影响细胞膜的通透性和稳定性,提高细胞膜的保护功能,增强植物对不良环境的抵抗能力,但高浓度的稀土对细胞超微结构

具有损伤作用。施用稀土可提高植物体内钙调蛋白 CaM 的含量,促进 CaM 基因表达,加速细胞分裂、促进种子萌发和根系生长。稀土还可以提高植物体内的吲哚乙酸、赤霉素、细胞分裂素等的含量,促进可溶性蛋白的合成,提高植物 SOD、CAT、APX、GPX 等抗氧化酶的活性,降低活性氧自由基对植物的伤害^[35-37]。低浓度 Nd³⁺ 促进杂交水稻线粒体的代谢,而高浓度 Nd³⁺ 则抑制线粒体的代谢^[38]。稀土元素施用能提高作物的产量是因为其可以促进、协调植物对营养元素的吸收。Babula 等^[39] 研究表明,Ce³⁺ 对植物吸收镁、磷、硫、钾和铁等均有不同程度的促进作用,尤其对植物吸收磷、硫和钾影响更显著。不同稀土元素的生物效应有差异。比较 3 种稀土元素对菠菜光合效应的影响,发现 Ce³⁺ 促进光合作用最明显,Nd³⁺ 次之,La³⁺ 最差,原因可能与稀土元素独特的 4f 电子层结构和变价特征有关。La³⁺ 的 4f 层没有电子,Ce³⁺ 有 1 个电子,Nd³⁺ 有 3 个电子,而且 Ce³⁺ 除了 +3 价外还可以被氧化到 +4 价,而 La³⁺、Nd³⁺ 则无变价^[33]。

分子生物学技术在作物细胞、基因和蛋白质水平上的稀土元素毒害机理,以及稀土元素污染土壤治理和生物修复等方面已得到越来越广泛的应用。Boyko 等报道,KCl、CeCl₃ 和 LaCl₃ 处理可促进拟南芥和烟草植物的生长,提高植物转基因整合位点的数量和质量^[40]。徐玉品采用 T-DNA 插入诱变法和甲基磺酸乙酯 (EMS) 诱变种子筛选法分别从 605 组约 121000 粒 T-DNA 突变体种子和 509 组约 60000 粒 EMS 化学诱变种子中筛选出拟南芥抗 La³⁺ 突变体和拟南芥 La³⁺ 敏感型突变体,为植物 La³⁺ 的毒害机理和稀土污染土壤修复提供实验材料^[41]。研究稀土元素 Pr、钬 (Ho)、铽 (Tb) 对蚕豆遗传毒性和细胞毒性的影响,发现稀土引起蚕豆根尖细胞有丝分裂指数显著降低,根尖细胞多种染色体异常和核异常,包括微核、染色体环、染色体断片、染色体单桥、多桥、滞后、多极分布、解螺旋不同步、染色体在赤道面上分布异常、染色体加倍、核出芽和核破裂等^[42]。比较不同稀土元素对蚕豆细胞的毒性,发现 Tb 的毒性阈值为 12—24 μg/mL 之间^[43],Ho 的毒性阈值为 4 mg/L^[44],Pr 的毒性阈值为 8 μg/mL^[42]。重稀土对玉米根尖细胞遗传毒性的阈值(硝酸铈和硝酸钬均为 5 mg/L) 比轻稀土的毒性阈值(硝酸铈 25 mg/L、硝酸钆 125 mg/L 和硝酸铈 125 mg/L) 低得多,说明重稀土的毒性大于轻稀土^[45]。

3.2 微生物

微生物是一个完整农田生态系统的主要组成部分之一,种类包括藻类、细菌、真菌、放线菌等。它们在农田生态系统中扮演着分解者的角色,把有机质分解成简单的化合物并释放到环境中,供农田生态系统中的初级生产者再利用。

据报道稀土元素 La 对微生物有较强的毒性作用,随着 La 浓度的升高,培养基的细菌、放线菌和真菌数量不断减少。La 浓度分别大于 200 mg/L 和 150 mg/L 时,细菌和放线菌无法存活;La 浓度大于 500 mg/L 时,仅有 40% 的真菌可以存活^[46]。稀土元素对不同微生物的毒性大小,La: 细菌>放线菌>真菌;Ce: 细菌>放线菌>真菌。有报道,低浓度的 Ce 积累量达 10% AD (土壤吸附容量) 以下时,黄褐土中放线菌的菌落种类有 10 多种,但 Ce 积累量达 20% AD 以上时,放线菌菌落种类仅有 2—4 种^[47]。低浓度的 La 对红壤中硝化细菌活性有强烈的刺激作用,但是随着 La 浓度的升高硝化细菌活性则被严重抑制,在 1000 mg/kg La 时,土壤硝化细菌数量只有对照的 10%^[46]。唐欣昀等^[48] 报道,0.27 mg/kg 的稀土可刺激土壤自养固氮菌数量的增加,而高剂量稀土 (>490 mg/kg) 则强烈地抑制自养固氮菌的生长。

采用室内培养和盆栽实验方法研究稀土元素 La 对红壤呼吸作用的影响,发现 La 浓度较低时微生物呼吸作用增强,但是随着 La 浓度的增加微生物呼吸作用不断降低,在 100 mg/kg 时呼吸作用降低达到显著水平^[49-50]。周峰等^[51] 的实验得出,小于 100 mg/kg 的低浓度稀土对微生物呼吸作用具有刺激作用,随着稀土浓度的增加呼吸速率受到明显的抑制作用,当稀土浓度达到 2000 mg/kg 时可抑制呼吸速率 44.7%。微生物代谢熵是指单位土壤微生物生物量的呼吸作用。当稀土的浓度为 50 mg/kg 时,代谢熵 qCO₂ 的抑制率高达 47.7%;稀土浓度大于 1000 mg/kg 时,代谢熵的最大抑制率高达 61.5%。低浓度的 La 对土壤硝化作用有微弱的刺激作用,但浓度升高时则表现出抑制作用。褚海燕等报道^[52],La 浓度低于 100 mg/kg 时对土壤 P 转化作用有微弱的刺激作用,但浓度升高时则表现出明显的抑制作用。土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及由

动植物残体、遗骸分解释放于土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质。稀土对土壤酶活性影响的研究主要集中在脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、脱氢酶和蔗糖酶等。La 对土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶 3 种水解酶活性均表现出明显的抑制作用。不同处理的稀土对土壤脲酶活性的抑制能力表现为:尾矿稀土淋出液(多种稀土混合液)> La 和 Ce 复合污染> Ce 单一污染> La 单一污染;对土壤过氧化氢酶活性的抑制能力表现为:尾矿稀土淋出液> La 和 Ce 复合污染> La 单一污染> Ce 单一污染^[53]。

3.3 动物

动物是农田生态系统中的伴生物群落。不同剂量的稀土均可以诱发动植物机体细胞、器官和组织的多种效应。稀土对动物具有“低促高抑”的效应,大剂量稀土对动物将产生明显的毒性作用。谢克和等^[54]研究表明高剂量的稀土导致蚯蚓体重降低,而低剂量稀土促进蚯蚓体重增长。研究稀土对蚯蚓体内氨基酸含量的影响,发现高浓度稀土溶液与蚯蚓接触 24 h 后使蚯蚓体内氨基酸含量下降,而低浓度稀土使蚯蚓氨基酸含量显著提高^[55]。反过来蚯蚓的生长也可以改变稀土元素 Y、La、Ce、Pr 和 Nd 在土壤的形态分布,并提高这些元素在土壤的生物有效性^[56]。在母鼠孕哺期饮用水中加入一定剂量的 LaCl₃,可导致仔鼠体重、脑组织重量下降,神经系统受到伤害,超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性降低,大脑皮质、基因和蛋白表达降低,学习记忆能力下降^[57-58]。当 Cd²⁺浓度为 0.025 和 0.25 mg/L 时,0.5 mg/L Ce³⁺能缓解 Cd²⁺胁迫引起泥鳅肝脏的各种基因成分、构象和含量的不良变化,而当 Cd²⁺浓度为 0.5 mg/L 时,Ce³⁺和 Cd²⁺则起协同作用破坏泥鳅肝脏的各种基团的构象,降低核酸和蛋白质的空间稳定^[59]。研究 Sm 对蝌蚪生长发育的影响,发现随着 Sm 浓度的增大,蝌蚪的死亡率不断提高,说明 Sm 对蝌蚪具有较大的毒害作用^[60]。叶面喷施稀土 La 和 Nd 对葡萄园中性昆虫亚群落和食饵功能团的物种数影响较显著^[61]。稀土对葡萄园节肢动物衰退期起着延缓的作用,Nd 元素体现为持效性效果较好,而 La 元素体现出速效性的特点^[62]。施用不同稀土浓度的梅园土壤中,杂食性土壤动物功能群个体数量高于植食性土壤动物功能群,且杂食性土壤动物功能群个体数量在不同稀土土壤的大小顺序为:对照区>La 区>Ce 区>Pr 区>Nd 区>Sm 区^[63]。据报道,稀土元素 La、Ce 和 Pr 可在牛的肝脏等器官大量积累,并影响牛免疫系统的正常功能^[64-65]。

4 农田生态系统稀土毒性评价与防治

4.1 稀土毒性评价

稀土资源的不合理开采和冶炼,导致矿区周边土壤和水体稀土元素含量较高,稀土经过植物吸收和富集并通过食物链途径进入动物和人体内,对动物和人产生毒害作用。通过食物链途径进行人体是稀土元素的主要暴露途径。赣南矿区成人稀土日摄入量稀土量为 6.0—6.7 mg,比对照区成人摄入量高 2 倍^[53]。长期接触稀土导致女工月经量减少率和月经异常量均高于对照组。稀土元素也可以经过呼吸作用直接进入人体。在农田施用稀土过程中,稀土粉尘在人的呼吸作用下进入人体,对人的呼吸道粘膜产生一定的刺激作用,使咽部和鼻腔充血。Yu 等^[66]在稀土矿区采集成人血液进行研究,发现稀土暴露地区人群的外周血单核细胞的端粒酶活性提高,外周血单核细胞 S 期和 G2-M 期增加,稀土元素还影响 DNA 的复制。长期摄入低剂量的稀土,将导致儿童智商发育不良,成人中枢神经传导显著下降,儿童肺活量和血压较低,免疫蛋白 IgM 水平显著降低^[67]。可见,残留在农田中的稀土元素已经对人体产生明显的毒副作用,有必要对稀土进行毒性评价。

稀土的毒性评价可用植物、动物和微生物的毒性实验来进行。植物毒性评价实验的表征因子有呼吸作用和生长率等。动物毒性评价(如蚯蚓等)的表征因子有急性死亡率、繁殖率、生长率以及体内酶活性变化等。微生物毒性评价的表征因子有菌落数、种群、生物量以及土壤酶活性变化等。根据 OECD 评价体系,研究混合稀土对 3 种作物(水稻、油菜和大豆)相对生长量和出苗率的影响,计算出稀土影响作物的半效应浓度(EC₅₀)和半致死浓度(LC₅₀),通过与已有 LC₅₀ 和 EC₅₀ 值的比较可以诊断出该稀土含量是否达到某一污染水平或污染程度^[68]。唐欣昀等^[48]研究混合型氯化稀土(含有 La、Ce、Nd 和 Lu)对大田土壤微生物的影响,发现细菌、放线菌和真菌的 EC50 值分别为 24.0 mg/kg、41.6—73.8 mg/kg 和 55.3—150.1 mg/kg,并初步得出 30 mg/kg 是混合型氯化稀土在黄褐土中积累的安全临界值。有人研究 La 对红壤转化酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性

的影响,发现 La 对土壤脱氢酶活性具有强烈的抑制作用,认为脱氢酶活性是评价土壤 La 污染的敏感指标^[52]。

4.2 稀土防治

稀土的理化性质与重金属有很大的相似性,生物毒性均随着浓度的升高而提高。鉴于稀土元素污染过程中的隐蔽性、长期性和不可逆性等特点,稀土污染土壤的治理已引起人们的广泛关注。稀土污染土壤的治理方法有:①物理法,包括排土、换土、去表土、客土、深耕翻土、淋洗、电化法等措施;②化学法,通过氧化、还原、沉淀、吸附、拮抗等方法,提高土壤的吸附能力,改变稀土元素存在的形态,降低稀土元素在土壤中的迁移能力和生物可利用性;③生物法,包括植物修复和微生物修复方法。

植物修复技术以其成本低、不破坏土壤结构和不造成二次污染等优点而备受人们推崇的治理稀土污染土壤的生态技术。其机理主要是利用植物对稀土元素进行吸收积累和降解转化。目前,人们将超积累植物作为修复稀土污染土壤的优先考虑品种。一般认为地上部稀土元素含量达到或超过 1000 $\mu\text{g/g}$ 的植物,或者地上部稀土元素吸收系数达到或超过 1 的植物,即可称为稀土元素超积累植物^[69]。地上部稀土元素含量以灰分计算,最高达到或超过 1000 $\mu\text{g/g}$,就可以直接确定为稀土元素超积累植物。共发现 4 种稀土元素超积累植物:柔毛山核桃(1350 $\mu\text{g/g}$)、山核桃(2296 $\mu\text{g/g}$)、乌毛蕨(1022 $\mu\text{g/g}$)和芒萁(3358 $\mu\text{g/g}$)^[69]。另有报道,依据地上部稀土元素的吸收系数达到或超过 1 的植物,有 16 种:里白算盘子、美洲商陆、横须贺蹄盖蕨、红盖鳞毛蕨、黑足鳞毛蕨、丝柄铁角蕨、本州铁角蕨、尖叶铁角蕨、小铁角蕨、铁角蕨、单盖铁线蕨、东亚乌毛蕨、糙毛芒萁、日本狗脊蕨、美洲商陆和横须贺蹄盖蕨。以上 20 种植物中,除了柔毛山核桃与山核桃、美洲商陆、里白算盘子外,其余 16 种均为蕨类植物,这与蕨类植物种类繁多、分布广泛、繁衍方式多和对各种极端恶劣环境适应能力强有关^[70],因此运用蕨类植物吸收富集稀土元素,修复稀土污染土壤具有较好的应用和推广前景。

5 问题与展望

稀土元素具有环境累积性、生物吸收与富集性等特点,尽管低浓度的稀土对作物生长有利,但是高浓度稀土却对作物生长有抑制作用。与重金属相类似,稀土元素的生物毒性随着浓度的增加而提高。稀土元素对农田生态系统中的农作物、微生物和动物的影响研究不断得到加强,其影响机理不断被阐明,但是由于不同稀土元素性质的差异性、农田生态系统结构和功能的复杂性,许多问题仍需人们进一步思考和解决:

1) 加强农田生态系统稀土毒性评价方法的研究。目前人们对稀土的毒性评价主要采用植物毒性评价法和微生物毒性评价法等,这些方法有自己的优点和缺点。鉴于农田生态系统稀土元素污染的复杂性,应该加强稀土元素其它毒性评价方法的研究,比如蚯蚓毒性评价法、生物标记物评价法、遗传毒性评价法等,从而快速、准确和科学地评价稀土元素的毒性状况,为稀土的污染防治提供科学依据;

2) 加强稀土元素对农田生态系统作物生长胁迫机理的研究,可从细胞显微结构变化、功能基因克隆与表达、蛋白质组表达等方面开展深入的探讨。研究外源稀土元素进入农田生态系统后的行为、归宿及形成机理;稀土元素与其它环境污染问题(酸雨等)复合污染对农田生态系统的影响,从而更好地揭示稀土对农田生态系统的影响机制。利用分子生态学技术研究稀土元素对土壤微生物结构和功能、微生物多样性的影响;

3) 加强稀土污染土壤修复技术的研发。目前有关稀土污染土壤修复的研究开展较少,因此有必要加强这方面的研究工作。针对不同土壤稀土元素的污染特点,结合物理、化学、生物、农艺手段对污染土壤进行联合治理,研发出有效的修复技术,降低农作物对稀土元素的吸收和积累,减少稀土元素的地表径流和下渗迁移,从而降低稀土元素对周边环境的污染风险和对人体健康的危害。

References:

- [1] [EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2012-06/20/content_2165524.htm. News Office of the State Council. The situation and policy of rare earth in China. 2012-6-20.
- [2] Gao Z Q, Zhou Q X. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2915-2922.

- [3] Jing D G, Yang J, Zhang S, Yang D J. A survey of 16 rare earth elements in the major foods in China. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2012, 25(3): 267-271.
- [4] Zhang Q H, Zhao J, Zhu J. Distribution and environmental impact of cerium in wastewater irrigation area of Baotou southern suburbs. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(3): 478-481.
- [5] Zhang Q H, Wang G, Zhao J, Zhu J, Cheng L, Tong L G. REE distribution characteristics of sewage irrigation in Sidaoshahe basin of Baotou City. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(5): 186-190.
- [6] Tao Q X, Wei X W. Study on content and distribution pattern of soluble rare earth elements in Jiangxi province. *Acta Agriculture Jiangxi*, 1998, 10(2): 15-22.
- [7] Wen X J, Zhang D C. Effect of resource exploitation on soil environment and rare earth bioavailable fractions in plough layer of mining area. *China Mining Magazine*, 2012, 21(2): 44-47.
- [8] Zhu J H, Yuan Z K, Wang X Y, Yan S M. Investigation on the contents of rare earth elements in environment of rare earth ore area in Jiangxi. *Journal of Environment and Health*, 2002, 19(6): 443-444.
- [9] Li J X, Hong M, Yin X Q, Liu J L. Effects of the accumulation of the rare earth elements on soil macrofauna community. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(6): 967-964.
- [10] Yuan B X, Liu C. The harm of rare earth in Ganzhou, Jiangxi. *China Quality Miles*, 2012, (6): 48-52.
- [11] Wang L J, Hu A I, Zhou Q S, Liang T, Wang X L, Yan X. Accumulation and fractionation of rare earth elements in soil-rice system. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, 24(1): 91-97.
- [12] Jones D L. Trivalent metal (Cr, Y, Rh, La, Pr, Gd) sorption in two acid soils and its consequences for bioremediation. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(4): 697-702.
- [13] Xu X K. Research advances in the behavior and fate of rare earth elements in soil-plant systems. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(S1): 315-319.
- [14] Li X F, Chen Z B, Zhang Y H, Chen Z Q. Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 835-843.
- [15] Zawisza B, Pytlakowska K, Feist B, Polowniak M, Kita A, Sitko R. Determination of rare earth elements by spectroscopic techniques; a review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26(12): 2373-2390.
- [16] Zhou N B, Xiao H. Spectrophotometric determination of trace rare earth elements in wheat sample. *Henan Chemical Industry*, 2004, (4): 37-39.
- [17] Nkoane B B M, Wibetoe G, Lund W, Torto N. A multi-element study on metallophytes from mineralized areas in Botswana using ICP-AES and ICP-MS. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2007, 7(1): 49-56.
- [18] Zhang F S, Yamasaki S, Kimura K. Rare earth element content in various waste ashes and the potential risk to Japanese soils. *Environment International*, 2001, 27(5): 393-398.
- [19] Sakamoto N, Kano N, Imaizumi H. Determination of rare earth elements, thorium and uranium in seaweed samples on the coast in Niigata Prefecture by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(10): 2955-2960.
- [20] Costas M, Lavilla I, Gil S, Pena F, de la Calle I, Cabaleiro N, Bendicho C. Evaluation of ultrasound-assisted extraction as sample pre-treatment for quantitative determination of rare earth elements in marine biological tissues by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 679(1/2): 49-55.
- [21] Lin L, Chen G, Chen Y H. Determination of 16 rare earth elements in tea leaves by ICP-MS. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(4): 555-558.
- [22] Gao P, Yang J N, Wang Q L, Xue C. Determination of rare earth elements in the soil by the inductively coupled plasma mass spectrometry and microwave digestion. *Environmental Monitoring in China*, 2011, 27(2): 68-69.
- [23] Wu Y F, Chen S. Effects of La on the yield, quality and physiological indicators of grafted watermelon leaves. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2008, 36(9): 145-150.
- [24] Xie Z B, Zhu J G, Chu H Y, Zhang Y L, Zeng Q, Ma H L, Cao Z H. Effect of lanthanum on rice production, nutrient uptake, and distribution. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(10): 2315-2331.
- [25] d'Aquino L, de Pinto M C, Nardi L, Morgana M, Tommasi F. Effect of some light rare earth elements on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism in *Triticum durum*. *Chemosphere*, 2009, 75(7): 900-905.
- [26] Ma Y H, Kuang L L, He X, Bai W, Ding Y Y, Zhang Z Y, Zhao Y L, Chai Z F. Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants. *Chemosphere*, 2010, 78(3): 273-279.
- [27] Wang C R, Luo X, Tian Y, Xie Y, Wang S C, Li Y Y, Tian L M, Wang X R. Biphasic effects of lanthanum on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, implicating finite antioxidation and potential ecological risk. *Chemosphere*, 2012, 86(5): 530-537.
- [28] Wen K J, Liang C J, Wang L H, Hu G, Zhou Q. Combined effects of lanthanum and acid rain on growth, photosynthesis and chloroplast

- ultrastructure in soybean seedlings. *Chemosphere*, 2011, 84(5): 601-608.
- [29] He Y W, Loh C S. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science*, 2000, 159(1): 117-124.
- [30] Huang H, Liu X Q, Qu C X, Liu C, Chen L, Hong F S. Influences of calcium deficiency and cerium on the conversion efficiency of light energy of spinach. *Biomaterials*, 2008, 21(5): 553-561.
- [31] Liu C, Cao W Q, Yun L, Huang H, Chen L, Liu X Q, Hong F S. Cerium under calcium deficiency-influence on the antioxidative defense system in spinach plants. *Plant and Soil*, 2009, 323(1/2): 285-294.
- [32] Liu X L. Study and development of lanthanide to photosynthesis. *Shanxi Architecture*, 2006, 33(12): 339-340.
- [33] Liu C. The Relationships between Physico-chemical Characteristics of Rare Earth Elements and Photosynthesis as Well as Their Underlying Mechanisms [D]. Suzhou: Suzhou University, 2010.
- [34] Wu J, Feng X J. Progress in the plant ecological effects of rare earth elements. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2012, 30(4): 37-40.
- [35] Xu Q M, Chen H. Antioxidant responses of rice seedling to Ce^{4+} under hydroponic cultures. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(6): 1693-1699.
- [36] Yin S T, Ze Y G, Liu C, Li N, Zhou M, Duan Y M, Hong F S. Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. *Biological Trace Element Research*, 2009, 132(1/3): 247-258.
- [37] Gong D H, W Z Z, Li G L, Zhang S Y, Xie Q C. Effects of Ce^{3+} on physiological characteristics of under salt stress. *Journal of the Chinese Society of Rare Earth*, 2013, 31(1): 124-128.
- [38] Zhou X C, Yang M, Hao G Q, Wu M H, Zhao Z C, Mei Q M. Effect of Nd^{3+} on mitochondrial metabolic activity of hybrid rice. *Science and Technology Innovation Herald*, 2011, (8): 142-143.
- [39] Babula P, Adam V, Oparilova R, Zehnalek J, Havel L, Kizek R. Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2008, 6(4): 189-213.
- [40] Boyko A, Matsuoka A, Kovalchuk I. Potassium chloride and rare earth elements improve plant growth and increase the frequency of the *Agrobacterium tumefaciens*-mediated plant transformation. *Plant Cell Reports*, 2011, 30(4): 505-518.
- [41] Xu Y P. Screening of La-resistance and La-sensitive Mutants of *Arabidopsis* [D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2009.
- [42] Sun L, Qu A, Hu W J, Qiu J Y, Zhang X P, Ding T L. The genotoxic and cytotoxic effects of rare earth element on *Vicia faba* L. root-tip cells. *Carcinogenesis, Teratogenesis and Mutagenesis*, 2008, 20(6): 441-444.
- [43] Wang C X. Rare earth element terbium to broad bean's heredity toxicity and celltoxicity research. *Journal of Nanyang Normal University*, 2008, 7(3): 55-58.
- [44] Qu A, Wang C R, Bo J. Research on the cytotoxic and genotoxic effects of rare-earth element holmium to *Vicia faba*. *Hereditas*, 2004, 26(2): 195-201.
- [45] Huang S F, Li Z Y, Fu M L, Hu F F, Xu H J, Xie Y. Detection of genotoxicity of 6 kinds of rare earth nitrates using orthogonal experimental design. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 150-155.
- [46] Chu H Y, Li Z G, Xie Z B, Zhu J G, Cao Z H. Effect of lanthanum on the microflora of red soil. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2000, 21(6): 28-31.
- [47] Tang X Y, Zhang Z L, Cheng Y, Wan H F, Zhu W M. Effect of Ce accumulation on soil microflora in yellow cinnamon soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(6): 585-588.
- [48] Tang X Y, Sun Y Y, Xia M Z, Wen C Q, Zhang Z L. Ecological effects of low dosage mixed rare earth elements accumulation on major soil microbial groups in a yellow cinnamon soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2137-2141.
- [49] Chu H Y, Cao Z H, Xie Z B, Zhu J G, Li Z G. Effects of lanthanum on microbial biomass carbon, nitrogen and respiration in red soil. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2001, 19(2): 94-96.
- [50] Chu H Y, Zhu J G, Xie Z B, Cao Z H, Li Z G, Zeng Q. Effects of lanthanum on microbial biomass carbon and nitrogen in red soil. *Journal of Rare Earths*, 2001, 19(1): 63-66.
- [51] Zhou F, Chen F, Cao J H, Pu L J, Peng B Z. Effects of rare earth elements on microbial characteristics and temporal availability in rice soil. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(5): 589-593.
- [52] Chu H Y, Zhu J G, Xie Z B, Li Z G, Cao Z H. Effects of rare earth element lanthanum on the activities of invertase, catalase and dehydrogenase in red soil. *China Environmental Science*, 2001, 21(1): 77-80.
- [53] Wen X J. Study on Characteristics of Soil Environment and Geochemical Behavior of Rare Earth Metals in Rare Earth Mining Area of Southern Jiangxi Province [D]. Kunming: Yunnan University, 2012.
- [54] Xie K H, Tan T J. Effect of rare earth nitrate on the growth and reproduction of earthworm. *Agro-Environmental Protection*, 1992, 11(5):

234-235.

- [55] Hua R M, Zhang Z L, Wu X A, Zhang D C, Tan H R. Effects of rare earth elements on amino acid contents in earthworms. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1787-1789.
- [56] Wen B, Liu Y, Hu X Y, Shan X Q. Effect of earthworms (*Eisenia fetida*) on the fractionation and bioavailability of rare earth elements in nine Chinese soils. *Chemosphere*, 2006, 63(7): 1179-1186.
- [57] Yang J, Liu Q, Zhang L, Wu S, Qi M, Lu S, Xi Q, Cai Y. Lanthanum chloride impairs memory, decreases pCaMK IV, pMAPK and pCREB expression of hippocampus in rats. *Toxicology Letters*, 2009, 190(2): 208-214.
- [58] Liapi C, Zarros A, Theocharis S, Al-Humadi H, Anifantaki F, Gkrouzman E, Mellios Z, Skandali N, Tsakiris S. The neuroprotective role of L-cysteine towards the effects of short-term exposure to lanthanum on the adult rat brain antioxidant status and the activities of acetylcholinesterase, (Na^+ , K^+)- and Mg^{2+} -ATPase. *BioMetals*, 2009, 22(2): 329-335.
- [59] Sun S H. Effects of Cadmium Stress and Cadmium/Cerium Interaction Impact on Physiological Function of *Misgurnus anguillicaudatus* [D]. Yangling; Northwest A & F University, 2008.
- [60] Guo S H. Effects of rare-earth element samarium on pollywog's growth and development. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(26): 12873-12873, 12880-12880.
- [61] Li G T, Tian Y L, Zou Y D, Ke S B, Zhao X J, Shi X L, Lu S, Huang Q H. The impacts of rare earth foliar fertilizer on arthropod community and prey functional groups in grapery. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5422-5430.
- [62] Lu S. Studies on the Rare Earth Element Impact Structure of Arthropod Communities in Vineyard in HuaiBei [D]. Hefei; Anhui Agricultural University, 2009.
- [63] Huang B H, Zou Y D, Bi S D, Wu H C, Li G T, Peng J C. Effects of rare earth elements on the composition of the soil fauna community in a plum orchard. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(9): 1849-1857.
- [64] Renner L, Schwabe A, Döll S, Höltershinken M, Dänicke S. Effect of rare earth elements on beef cattle growth performance, blood clinical chemical parameters and mitogen stimulated proliferation of bovine peripheral blood mononuclear cells *in vitro* and *ex vivo*. *Toxicology Letters*, 2011, 201(3): 277-284.
- [65] Schwabe A, Meyer U, Grün M, Voigt K D, Flachowsky G, Dänicke S. Effect of rare earth elements (REE) supplementation to diets on the carry-over into different organs and tissues of fattening bulls. *Livestock Science*, 2012, 143(1): 5-14.
- [66] Yu L, Dai Y C, Yuan Z K, Li J. Effects of rare earth elements on telomerase activity and apoptosis of human peripheral blood mononuclear cells. *Biological Trace Element Research*, 2007, 116(1): 53-59.
- [67] Xia Q, Liu H X, Yang X D, Wang K. The neural toxicity of lanthanides: An update and interpretations. *Scientia Sinica (Chimica)*, 2012, 42(9): 1308-1314.
- [68] Ding S M, Liang T, Zhang Z L, Sun Q. Advances of ecological effect of rare earths on soil. *Soils*, 2004, 36(2): 157-163.
- [69] Wei Z G, Zhang H J, Li H X, Hu F. Research trends on rare earth element hyperaccumulator. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, 24(1): 1-11.
- [70] Zheng J M, Tang S R, Chen Z Y, Ding B Y. Uptake of inorganic contaminants by pteridophyte. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005, 19(2): 155-158, 133-133.

参考文献:

- [1] [EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2012-06/20/content_2165524.htm. 国务院新闻办. 中国的稀土状况与政策白皮书. 2012-6-20.
- [2] 高志强, 周启星. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2915-2922.
- [4] 张庆辉, 赵捷, 朱晋. 包头市南郊污灌区镉分布特征及其对生态环境的影响. *湖北农业科学*, 2012, 51(3): 478-481.
- [5] 张庆辉, 王贵, 赵捷, 朱晋, 程莉, 同丽嘎. 包头市四道沙河流域污灌区稀土元素的分布特征. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(5): 186-190.
- [6] 陶其骧, 魏向文. 江西省土壤可溶态稀土元素含量和分布规律的研究. *江西农业学报*, 1998, 10(2): 15-22.
- [7] 温小军, 张大超. 资源开发对稀土矿区耕作层土壤环境及有效态稀土的影响. *中国矿业*, 2012, 21(2): 44-47.
- [8] 朱建华, 袁兆康, 王晓燕, 颜世铭. 江西稀土矿区环境稀土含量调查. *环境与健康杂志*, 2002, 19(6): 443-444.
- [10] 袁柏鑫, 刘畅. 江西赣州稀土之痛. *中国质量万里行*, 2012, (6): 48-52.
- [11] 王立军, 胡鸞堂, 周权锁, 梁涛, 王秀丽, 阎欣. 稀土元素在土壤-水稻体系中的迁移与吸收累积特征. *中国稀土学报*, 2006, 24(1): 91-97.
- [13] 徐星凯. 稀土元素在土壤-植物系统中行为与归宿的研究. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 315-319.
- [14] 李小飞, 陈志彪, 张永贺, 陈志强. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 835-843.

- [16] 周宁波, 肖华. 分光光度法测定小麦样品中微量稀土元素. 河南化工, 2004, (4): 37-39.
- [21] 林立, 陈光, 陈玉红. 电感耦合等离子体质谱法测定茶叶中的 16 种稀土元素. 环境化学, 2007, 26(4): 555-558.
- [22] 高朋, 杨佳妮, 王秋丽, 薛程. 微波消解电感耦合等离子体质谱法测定土壤中稀土金属元素. 中国环境监测, 2011, 27(2): 68-69.
- [23] 吴宇芬, 陈晟. 镧对嫁接西瓜叶片生理指标及产量和品质的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(9): 145-150.
- [32] 刘笑乐. 稀土元素对光合作用影响的研究进展. 山西建筑, 2006, 33(12): 339-340.
- [33] 刘超. 稀土元素的理化特性与光合作用的关系及其作用机制 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [34] 吴晶, 冯秀娟. 稀土元素对植物的生物有效性研究进展. 中国资源综合利用, 2012, 30(4): 37-40.
- [37] 巩东辉, 王志忠, 李国龙, 张少英, 谢庆超. 稀土 Ce^{3+} 对盐胁迫下螺旋藻生理特性的影响. 中国稀土学报, 2013, 31(1): 124-128.
- [38] 周锡昌, 杨旻, 郝广勤, 吴明和, 赵则春, 梅启明. 稀土钆(III)对杂交水稻线粒体代谢活性的影响. 科技创新导报, 2011, (8): 142-143.
- [41] 徐玉品. 拟南芥镧抗性和敏感性突变体的筛选 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [42] 孙玲, 屈艾, 胡文静, 仇敬运, 张相萍, 丁铁林. 稀土元素钽对蚕豆的遗传毒性和细胞毒性研究. 癌变, 畸变, 突变, 2008, 20(6): 441-444.
- [43] 王春侠. 稀土元素铽对蚕豆的遗传毒性和细胞毒性研究. 南阳师范学院学报, 2008, 7(3): 55-58.
- [44] 屈艾, 汪承润, 薄军. 稀土元素钽对蚕豆的细胞毒性和遗传毒性研究. 遗传, 2004, 26(2): 195-201.
- [45] 黄淑峰, 李宗芸, 傅美丽, 胡方方, 徐汉杰, 谢艳. 正交实验设计法检测 6 种硝酸稀土的遗传毒性. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 150-155.
- [46] 褚海燕, 李振高, 谢祖彬, 朱建国, 曹志洪. 稀土元素镧对红壤微生物区系的影响. 环境科学, 2000, 21(6): 28-31.
- [47] 唐欣昀, 张自立, 程勇, 宛海峰, 竺伟民. Ce 积累对黄褐土中土壤微生物区系的影响. 应用生态学报, 1997, 8(6): 585-588.
- [48] 唐欣昀, 孙亦阳, 夏觅真, 温崇庆, 张自立. 低剂量混合稀土积累对黄褐土微生物主要类群的生态效应. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2137-2141.
- [49] 褚海燕, 曹志洪, 谢祖彬, 朱建国, 李振高. 镧对红壤微生物碳、氮及呼吸强度的影响. 中国稀土学报, 2001, 19(2): 94-96.
- [51] 周峰, 陈浮, 曹建华, 濮励杰, 彭补拙. 外源稀土对土壤微生物特征的影响及时间效应. 中国稀土学报, 2003, 21(5): 589-593.
- [52] 褚海燕, 曹志洪, 谢祖彬, 李振高, 曹志洪. 镧对红壤转化酶、过氧化氢酶和脱氢酶活性的影响. 中国环境科学, 2001, 21(1): 77-80.
- [53] 温小军. 赣南稀土矿区土壤环境特征及稀土金属地球化学行为研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [54] 谢克和, 谭天爵. 稀土硝酸盐对蚯蚓生长繁殖的影响. 农业环境保护, 1992, 11(5): 234-235.
- [55] 花日茂, 张自立, 吴新安, 张东春, 檀华荣. 稀土对蚯蚓体内氨基酸含量的影响. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1787-1789.
- [59] 孙淑红. 镧胁迫及其与稀土元素铈对泥鳅生理机能影响的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [60] 郭淑华. 稀土元素钆对蝌蚪生长发育的影响. 安徽农业科学, 2009, 37(26): 12873-12873, 12880-12880.
- [61] 李桂亭, 田玉龙, 邹运鼎, 柯胜兵, 赵学娟, 施晓丽, 卢申, 黄庆华. 稀土叶面肥对葡萄园节肢动物群落和食饵功能团的影响. 生态学报, 2010, 30(20): 5422-5430.
- [62] 卢申. 稀土元素对淮北葡萄园节肢动物群落的影响研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [63] 黄保宏, 邹运鼎, 毕守东, 巫厚长, 李桂亭, 彭军成. 稀土元素对梅园主要土壤动物群落结构组成的影响. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1849-1857.
- [67] 夏青, 刘会雪, 杨晓达, 王夔. 稀土神经毒性研究. 中国科学: 化学, 2012, 42(9): 1308-1314.
- [68] 丁士明, 梁涛, 张自立, 孙琴. 稀土对土壤的生态效应研究进展. 土壤, 2004, 36(2): 157-163.
- [69] 魏正贵, 张惠娟, 李辉信, 胡锋. 稀土元素超积累植物研究进展. 中国稀土学报, 2006, 24(1): 1-11.
- [70] 郑洁敏, 唐世荣, 陈子元, 丁炳扬. 蕨类植物对无机污染物的吸收. 核农学报, 2005, 19(2): 155-158, 133-133.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 16 Aug. ,2013(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advances in theoretical issues of species distribution models LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguang, et al (4827)
- A review on rare earth elements in farmland ecosystem JIN Shulan, HUANG Yizong (4836)
- A review on the mechanism of attachment and metamorphosis in barnacle cyprids ... RAO Xiaozhen, LIN Gang, XU Youqin (4846)
- Decision making in group living animals WANG Chengliang, WANG Xiaowei, QI Xiaoguang, et al (4857)

Autecology & Fundamentals

- Influence of monsoon's advancing, retreating and conversion on migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China
..... BAO Yunxuan, HUANG Jinying, XIE Xiaojin, et al (4864)
- Prey selection and feeding rate of sea stars *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on three bivalves
..... QI Zhanhui, WANG Jun, MAO Yuze, et al (4878)
- Habitat selection of Whooper Swan at Bayanbulak in Xinjiang of China DONG Chao, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (4885)
- The genetic structure of endemic plant *Pteroceltis tatarinowii* by ISSR markers
..... LI Xiaohong, ZHANG Hui, WANG Deyuan, et al (4892)
- Genetic analysis of salt tolerance of F₁ progenies between chrysanthemum and the intergeneric hybrid of chrysanthemum and
crossostephium XU Lili, CHEN Fadi, CHEN Sumei, et al (4902)
- Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region
..... ZHANG Haina, SU Peixi, LI Shanxia, et al (4909)
- Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al (4919)
- Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi
..... BAI Kundong, JIANG Debing, WAN Xianchong (4930)
- Effect of fertilization on the dynamic of soil N₂O fluxes in Chinese chestnut stands
..... ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, et al (4939)
- Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil
..... LIU Xiyu, WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, et al (4949)

Population, Community and Ecosystem

- Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al (4956)
- Monitoring the riparian vegetation cover after the Wenchuan earthquake along the Minjiang River valley based on multi-temporal
Landsat TM images; a case study of the Yingxiu-Wenchuan section XU Jiceng, TANG Bin, LU Tao (4966)
- A dynamic analysis of spatial distribution pattern of *Larix gmelinii* natural forest in Pangu farm under varying intensity of fire
disturbance NI Baolong, LIU Zhaogang (4975)
- Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics
..... CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al (4985)
- The research on the age structure and sex ratio of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (5000)
- Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap
..... ZHAO Zhiguo, RONG Erhua, ZHAO Zhihong, et al (5008)
- Community composition and phototaxis of insects in tea plantations in Southern Jiangshu Province during late fall
..... ZHENG Yingcha, NIU Yuqun, CUI Guiling, et al (5017)
- Effect of agricultural land use types on soil mite communities in north China
..... HAN Xuemei, LI Dandan, LIANG Zian, et al (5026)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Exploring the space syntax under negative planning; a case study of landscape connectivity based on the behaviors of avian edge
species YANG Tianxiang, ZHANG Weiqian, FAN Zhengqiu, et al (5035)
- Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China
..... ZHANG Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, et al (5047)

- Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al (5058)
- Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data ZHANG Mingyang, LUO Weijian, LIU Huiyu, et al (5067)
- Resource and Industrial Ecology**
- Urban metabolism process based on emergy synthesis; a case study of Beijing LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (5078)
- Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao (5090)
- The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix ZHAO Zhifeng, WANG Dongmei, ZHAO Tingning (5101)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The effect of distance on the ecological conservation value; a case study of Sanjiang Plain Wetland AO Changlin, CHEN Jinting, JIAO Yang, et al (5109)
- Research Notes**
- Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province JIANG Chun, WU Zhifeng, QIAN Lexiang, et al (5118)
- The changes of hair length and pelage thermal insulation in captive female squirrel, *Sciurus vulgarize manchuricus*, during autumn molting period JING Pu, ZHANG Wei, HUA Yan, et al (5126)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 王克林 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第16期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 16 (August, 2013)

编辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主编 王如松
主管 中国科学技术协会
主办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路18号
邮政编码:100085

出版 科学出版社
地址:北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

印刷 北京北林印刷厂
发行 科学出版社
地址:东黄城根北街16号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@espg.net

订购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第8013号
许可证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

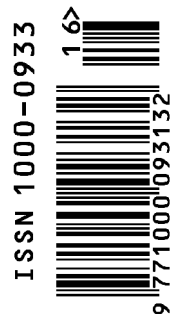
Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@espg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元