

· 专论与综述 ·

严格管控类耕地非食用植物镉修复效果评价

张慧敏¹, 张宁¹, 胡含秀¹, 周彩玲², 叶文玲¹, 马友华^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036;
2. 铜陵市义安区农业技术推广中心, 安徽 铜陵 244100)

摘要:综述了国内外在烟草, 树木(杨树、柳树、桑树), 纤维植物(苧麻、棉花)和蓖麻等非食用植物修复土壤镉方面的研究与应用进展, 综合分析其修复能力与经济效益, 得出蓖麻和苧麻的修复效果最佳。针对严格管控类耕地土壤镉修复, 提出了开展非食用植物修复大田试验示范、研发环境友好型辅助措施、优化种植结构调整生态补偿机制, 以及及时开展耕地土壤环境质量类别动态调整等建议。

关键词: 镉; 非食用植物; 土壤修复; 严格管控类耕地

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1006-2009(2021)06-0009-05

Evaluation on Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Non-edible Plants in Strictly Controlled Farmland

ZHANG Hui-min¹, ZHANG Ning¹, HU Han-xiu¹, ZHOU Cai-ling², YE Wen-ling¹, MA You-hua^{1*}

(1. *Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China*; 2. *Agricultural Technology Extension Center of Yi'an District, Tongling, Anhui 244100, China*)

Abstract: This article summarized the progress of research and application of non-edible plants such as tobacco, trees (poplar, willow and mulberry), fiber plants (ramie, cotton) and castor in the remediation of cadmium contaminated soil domestic and overseas, comprehensively analyzed their remediation abilities and economic benefits, and concluded that castor and ramie had the best remediation effects. In view of the remediation of cadmium contaminated soil in strictly controlled farmland, it suggested carrying out field experiment and demonstration of the remediation by non-edible plants, developing environment-friendly auxiliary measures, optimizing planting structure adjustment ecological compensation mechanism, and dynamically adjusting farmland soil environmental quality category in time.

Key words: Cadmium; Non-edible plant; Soil remediation; Strictly controlled farmland

严格管控类耕地指土壤镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)含量高于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中风险管制值的耕地。对于该类耕地,在严格管控的同时还应降低其土壤重金属含量,达到修复受重金属污染耕地的目的。土壤重金属植物修复指利用绿色植物去除土壤中的重金属^[1-2],其中利用超积累植物修复是近年来土壤重金属污染修复的热点^[3-4]。然而,目前发现的超积累植物较少,且存在植物生物量小、植株矮小、易受

地域影响等缺点,不适用于大面积植物修复,甚至可能导致生物入侵,带来更大的经济损失。基于此,我国提出了农业生态整治策略,调整种植结构,

收稿日期:2021-03-17;修订日期:2021-09-19

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(No. 2008085MD112);安徽省科技重大攻关基金资助项目(No. 17030701053)

作者简介:张慧敏(1990—),女,安徽淮北人,博士研究生,研究方向为土壤重金属污染治理与修复。

*通信作者:马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

通过种植非食用经济作物、经济树种等从土壤中提取重金属,在修复重金属污染的同时给农民带来可观收入,避免重金属在食物链中的传递,使重金属污染耕地在农业领域重新获得安全且高效的利用。

Cd是毒性最强的重金属之一,位于前二十强毒素清单的第七位,其土壤风险管制标准分别为1.5 mg/kg (pH值 ≤ 5.5)、2.0 mg/kg ($5.5 < \text{pH}$ 值 ≤ 6.5)、3.0 mg/kg ($6.5 < \text{pH}$ 值 ≤ 7.5)、4.0 mg/kg (pH值 > 7.5)。不同植物对Cd的提取效果存在很大差异,选择修复效果好、易于推广的品种进行种植很有必要。今评估我国普遍种植的非食用经济作物、经济树种等对土壤Cd的修复效果,以期受污染耕地安全利用提供参考。

1 非食用植物修复土壤Cd的研究与应用

1.1 烟草

烟草(*Nicotiana tabacum* L.)是茄科烟草属植物,主要被用作烟草工业原料,全株也可用作农药杀虫剂,或用作药用麻醉、发汗、镇静和催吐剂等。烟草具有生物量大、生长快、易于栽培、地理分布广泛等特点,近年来不同研究分别在田间试验基础上进一步探究了其对重金属的萃取潜力,并尝试通过施用辅助剂及基因手段增强提取效果^[5-8]。烟草对Cd的富集能力较强,尤其是其叶片可积累大量的Cd。有研究分别对烟草积累Cd、As、Co、Cr、Cu、Hg、Mo、Ni、Pb、Zn的能力进行评价,结果表明,烟草对Cd的富集系数为7.19,而对其余9种元素的富集系数均 < 0.3 ,显示了突出的Cd积累特性^[9]。当土壤Cd质量比为5.4 mg/kg时,烟草植株Cd质量比高达164 mg/kg (DW),具备超积累植物的特征^[10],在Cd污染修复方面具有很大潜力。

Cd严格管控类耕地种植烟草的后续处理值得关注,若被制成卷烟制品,则应评估卷烟中Cd的安全性。目前国内外尚无烟草制品重金属限量标准,研究者主要通过建立模型的方式评估烟草重金属的安全性^[11]。鉴于此,应进一步评价烟草中Cd含量对人体健康的影响,完善烟草重金属限量标准,避免因变相扩大烟草种植而引发的重金属及公众健康风险。烟草在农药、医疗、科研等方面也具有重要价值,如用烟草制作的杀虫剂在杀死害虫的同时对青蛙等益虫无害,是对环境友好的植物源药剂;从烟草中提取的烟碱、茄尼醇、泛酮等可用作制药原料;利用转基因烟草可生产治疗癌症的生物药

物及防治其他疾病的疫苗等^[12]。此外,烟草废弃物还可用作有机肥料或工业原料^[13]。因此,进一步探究烟草的综合利用,开发环境友好型利用方式,加强烟草在医药、农药、工业等方面的应用,是解决烟草后续处理的重要研究内容。

1.2 树木

1.2.1 杨树和柳树

在潜在的Cd植物修复物种中,树木因具有生长快速、生物量大、繁殖能力强、养分需求低、便于管理、经济价值高、易被公众接受、场地稳定等特点而被广泛应用于土壤修复。杨树和柳树是北半球最常用的植物修复树种,可以积累高浓度的有效态Cd^[2,14]。张春燕等^[15]研究表明,杨树和柳树对Cd的富集和转运能力强,尤其是品种61-1和南林895,适合Cd的植物萃取,其修复土壤Cd的主要机制是植物固定^[16]。

杨树和柳树是经济用材和绿化树种,并可用于生物能源生产。杨树可与浅根系草本植物间作,针对不同深度土壤重金属污染进行修复,且杨树基因组已被完全测序,是应用于基因工程的良好材料^[17],也因此成为植物修复的理想选择。

1.2.2 桑树

桑树(*Morus alba* L.)被称为“东方神木”,其品种多,喜温暖湿润气候,对土壤的适应性强,耐旱,耐瘠薄,在土壤pH值4.5~9.0范围都能正常生长发育。桑树根系发达,在不同树种中,由于其生根体系更佳而具有更大的修复受污染土壤重金属的潜力^[18]。

早在20世纪90年代,国内就有学者研究证实了种桑养蚕的经济生态模式在治理Cd污染农田方面的重要作用。近年来桑树被报道成功应用于Cd、Pb、Hg、Cr、Ni等污染土壤的植物修复^[19-20]。张兴等^[21]在Cd污染(8.11 mg/kg)土壤种植桑树,其对Cd的迁移总量为2 056.4 mg/m²,修复年限为1.26 a。

桑树中的Cd约50%积累在根部,约10%积累在叶片中,即使当土壤中Cd质量比高达145 mg/kg时,其叶片中的Cd也未超过2.5 mg/kg^[22]。在Cd质量比低于40.6 mg/kg的土壤种桑养蚕,蚕的生长发育和蚕茧质量均符合国家标准^[23]。除被用作蚕桑外,桑树叶还可被用作饲草。饲草桑虽然不是Cd的超富集植物,但可以作为替代植物修复Cd污染(< 1.0 mg/kg)水稻土^[24]。对于严格管控类

耕地,种植饲草桑的安全性仍须进一步探究。

1.3 纤维植物

1.3.1 苧麻

苧麻(*Boehmeria nivea* L.)是荨麻科苧麻属宿根性草本植物,为我国特有的纤维作物,具有根系庞大、生长速度快等特点^[25]。苧麻对Cd具有较强的耐受力,且对Cd的积累量是一般植物的2~10倍,累积系数最高可达2.1^[26]。苧麻多年生、一年收获三四次的特点使其修复土壤Cd污染的效率更高。此外,苧麻水土保持能力强,尤其适合山坡地种植,是一种较为理想的Cd污染土壤修复作物^[27]。

代剑平等^[28]在Cd污染农田筛选高积累苧麻品种,结果表明,不同苧麻品种根际土Cd含量均低于非根际,尤其是积累量最高的宜春红心麻品种,其根际土Cd含量比非根际土低80.84%,积累量最低的8322号品种也能使根际土Cd含量降低34.85%。安化县利用苧麻修复Cd污染农田的结果显示,中苧一号原麻年产量可达3450 kg/hm²,Cd去除量达到0.28 kg/hm²^[29]。

苧麻纤维品质的优劣是评价其种质的重要指标之一。在Cd质量比超过100 mg/kg的土壤种植苧麻,其经济性状和纤维产量并未降低,产出的麻纤维仍能满足加工中等质量麻织品的要求^[30]。

1.3.2 棉花

棉花(*Gossypium* spp.)是我国广泛种植的纤维作物,经济价值高。对于Cd污染,棉纤维的Cd富集量为各组织中最低。Cd胁迫对棉花经济效益和使用价值的影响有限,当土壤Cd质量比低于1 mg/kg时,Cd胁迫在一定程度上还提高了棉花产量和品质。在土壤Cd重度污染区(2 mg/kg),Cd胁迫对棉花产量的降幅<5%,纤维品质无显著差异^[31]。

棉花对Cd具有较强的吸收、累积能力,连续几年种植棉花(棉秆拔除)可显著减轻土壤Cd污染程度。李玲等^[32]研究了3种棉质(系)对Cd的积累情况,结果表明,棉花的地上部分、营养器官及整个植株的富集系数均>1,且地上部分Cd积累远大于根,说明其具有很好的Cd运输机制,可作为超富集植物治理土壤Cd污染。对2014年长株潭棉花替代种植区Cd修复效果的评价结果显示,土壤中Cd含量比播种前平均下降17.8%,2015年土壤Cd含量比播种前平均下降30%,表明将棉花

用于Cd污染耕地的修复种植具有较高的潜力和可行性^[33]。

1.4 蓖麻

蓖麻(*Ricinus communis* L.)是大戟科重要的不可食用油料作物,不进入食物链,具有良好的经济价值。史景允等^[34]采用营养液栽培试验研究不同品种蓖麻对Cd积累与耐性特征的影响,结果显示,当土壤Cd质量比为200 mg/kg时蓖麻仍能生长,叶、茎、根对Cd的累积量分别为51.89 μg/盆、9.25 μg/盆、4.46 μg/盆。叶文玲等^[35]采用水培试验研究发现,在5 mg/L Cd处理下,两种蓖麻(ZB-8和HB-8)对Cd的耐性指数(TI)分别为89.1%和86.5%,表现出较强的耐受性,而生物量与对照相比分别下降了10.9%和13.5%。有学者指出,蓖麻虽然对Cd的富集能力很强^[36],但转运能力较差,因而将其界定为富集植物而非超积累植物。由于蓖麻对Cd的耐性很强,其对重度Cd污染土壤仍具有修复潜力。鉴于目前相关研究多停留在盆栽或水培试验阶段,应进一步探究大田条件下蓖麻对土壤Cd的累积特征,同时加强其对Cd修复的实际应用。

2 非食用植物对土壤Cd的修复能力

综合以上研究成果,对非食用植物的Cd修复能力量化统计,结果显示:烟草、杨树、柳树、桑树、苧麻、棉花、蓖麻对土壤Cd的耐受质量比分别为10 mg/kg、150 mg/kg、150 mg/kg、145 mg/kg、100 mg/kg、50 mg/kg、200 mg/kg;富集系数分别为7.19、0.45~2.00、0.56~2.39、0.66、2.1、1.94~2.40、3.2;生物量分别为0.27 t/hm²、18.67 t/hm²~50.67 t/hm²、11.39 t/hm²~20.98 t/hm²、4.98 t/hm²、66.52 t/hm²~94.77 t/hm²、5.09 t/hm²~9.91 t/hm²、2.99 t/hm²~5.97 t/hm²。其中,杨树、柳树、桑树和蓖麻耐Cd质量比>100 mg/kg,耐Cd能力强;烟草、苧麻、棉花和蓖麻对Cd的富集系数>1,具有很好的Cd转移效果;杨树、柳树和苧麻的生物量>10 t/hm²,生物量优势明显。

3 非食用植物修复土壤Cd的经济效益

经济效益是决定植物修复能否规模化运行的重要因素之一。烟草、杨树、柳树、桑树、苧麻、棉花、蓖麻的种植成本分别为2.82万元/hm²、1.5万元/hm²、0.21万元/hm²~0.45万元/hm²、

2.25 万元/hm²、0.8 万元/hm² ~ 1.0 万元/hm²、1.71 万元/hm²、1.26 万元/hm²; 种植纯收益分别为 0.92 万元/hm²、1.5 万元/hm²、0.056 万元/hm² ~ 0.2 万元/hm²、6.0 万元/hm²、2.86 万元/hm² ~ 3.72 万元/hm²、1.72 万元/hm²、1.95 万元/hm²; 成本纯收益率分别为 32.62%、100%、26.67% ~ 44.44%、266.67%、357.5% ~ 372%、100.58%、154.76%^[37-43]。对不同非食用植物的经济效益作对比,柳树和苕麻的成本不足 1 万元/hm²,投入较低;杨树、桑树、苕麻、棉花和蓖麻的纯收益在 1 万元/hm²以上,尤其是桑树的纯收益较高,为 6.0 万元/hm²;桑树和苕麻的成本收益率 > 200%,收益远高于成本投入。

综合分析非食用植物对土壤 Cd 的修复能力与经济效益,蓖麻和苕麻对土壤 Cd 的修复效果最佳。非食用植物对 Cd 的实际修复效果需要根据各地的实际情况(如气候、品种、价格等)详细评估,以探寻适合不同地区 Cd 严格管控类耕地土壤修复的最佳方式。

4 展望

(1) 非食用经济作物不进入食物链,具有修复土壤重金属污染的效果。不同的研究结果存在一定差异,尤其是目前关于非食用作物修复的研究多集中在水培和盆栽试验,需要进一步开展大田试验验证其效果,同时结合气候、种植制度等实际情况探索适合各地种植推广的品种。另外,应研发环境友好型辅助措施,在强化修复效果的同时确保环境安全。

(2) 由于严格管控类耕地的特殊性,不适宜种植可食用农产品,可以结合当地实际情况,因地制宜,发展相关产业,形成产业链,政府给予相应的生态补贴,如资金补偿、政策补偿、实物补偿、智力补偿等。

(3) 耕地是农业生产的基础,我国耕地总量少,质量总体不高,后备资源不足,必须将有限的耕地资源优先用于粮食生产,坚持科学合理地利用耕地资源。严格管控类耕地经非食用植物修复,土壤重金属含量降低后,应及时开展耕地土壤环境质量类别划分动态调整,以减少耕地“非粮化”。

[参考文献]

[1] 胡鹏杰,吴龙华,骆永明. 重金属污染土壤及场地的植物修复

技术发展与应用[J]. 环境监测管理与技术,2011,23(3): 39-42.

- [2] LUO Z B, HE J, POLLE A, et al. Heavy metal accumulation and signal transduction in herbaceous and woody plants: Paving the way for enhancing phytoremediation efficiency[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(6): 1131-1148.
- [3] 王焱,李江遐,王冬良,等. 花卉修复土壤重金属污染研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(5): 1-5.
- [4] 刘伟才,罗晶,姬瑞华. 苔藓植物大灰藓对大气中重金属元素的生态监测[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(3): 44-47.
- [5] LU Y G, MA J, TENG Y, et al. Effect of silicon on growth, physiology, and cadmium translocation of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in cadmium-contaminated soil[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(4): 680-689.
- [6] THIJS S, WITTERS N, JANSSEN J, et al. Tobacco, sunflower and high biomass SRC clones show potential for trace metal phytoextraction on a moderately contaminated field site in Belgium[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 12(21): 1879-1893.
- [7] HERZIG R, NEHNEVAJOVA E, PFISTER C, et al. Feasibility of labile Zn phytoextraction using enhanced tobacco and sunflower: Results of five- and one-year field-scale experiments in Switzerland[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2014, 16(7): 735-754.
- [8] LEE B R, HWANG S B. Over-expression of NtHb1 encoding a non-symbiotic class 1 hemoglobin of tobacco enhances a tolerance to cadmium by decreasing NO (nitric oxide) and Cd levels in *Nicotiana tabacum*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 113: 18-27.
- [9] LIU H, WANG H, MA Y, et al. Role of transpiration and metabolism in translocation and accumulation of cadmium in tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1960-1965.
- [10] MENCH M, TANCOCNE J, GOMEZ A, et al. Cadmium bioavailability to *Nicotiana tabacum* L., *Nicotiana rustica* L., and *Zea mays* L. grown in soil amended or not amended with cadmium nitrate[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 8: 48-53.
- [11] 李田,李德成,曹瑗,等. 安徽省池州市植烟土壤的重金属污染程度及污染风险评价[J]. 土壤,2011,43(4): 674-676.
- [12] 娄晓平,赵炯平,张保全,等. 烟草废弃物无害化研究与应用探讨[J]. 江西农业学报,2020,32(4): 90-97.
- [13] 娄晓平,赵炯平,张保全,等. 田间烟草废弃物综合利用实践与思考[J]. 江西农业学报,2020,32(12): 100-105.
- [14] DICKINSON N M, BAKER A J, DORONILA A, et al. Phytoremediation of inorganics: realism and synergies[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11(2): 97-114.
- [15] 张春燕,王瑞刚,范稚莲,等. 杨树和柳树富集 Cd、Zn、Pb 的品种差异性[J]. 农业环境科学学报,2013,32(3): 530-538.
- [16] PILIPOVIĆ A, ZALESNY R S, RONČEVIĆ S, et al. Growth, physiology, and phytoextraction potential of poplar and willow established in soils amended with heavy-metal contaminated, dredged river sediments[J]. *Journal of Environmental Manage-*

- ment, 2019, 239: 352 – 365.
- [17] TUSKAN G A, DIFAZIO S, JANSSON S, et al. The genome of black cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. & Gray) [J]. Science, 2006, 131 (5793): 1596 – 1604.
- [18] ZHOU L Y, ZHAO Y, WANG S F, et al. Lead in the soil-mulberry (*Morus alba* L.)-silkworm (*Bombyx mori*) food chain: Translocation and detoxification [J]. Chemosphere, 2015, 128: 171 – 177.
- [19] JIANG Y, RENZHI H, XINPEI Y, et al. Mulberry for environmental protection [J]. Pakistan Journal of Botany, 2017, 49 (2): 781 – 788.
- [20] HASHEMI S A, TABIBIAN S. Application of *Mulberry nigra* to absorb heavy metal, mercury, from the environment of green space city [J]. Toxicology Reports, 2018, 5: 644 – 646.
- [21] 张兴, 王治, 揭雨成, 等. 桑树对矿区土壤中重金属的原位去除效应研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28 (7): 59 – 63.
- [22] 万飞. 镉对桑蚕生长发育及茧质影响的试验初报 [J]. 中国蚕业, 2004, 25 (4): 23 – 24.
- [23] 陈朝明, 龚惠群, 王凯荣. Cd 对桑叶品质、生理生化特性的影响及其机理研究 [J]. 应用生态学报, 1996, 7 (4): 417 – 423.
- [24] JIANG Y B, JIANG S M, HUANG R Z, et al. Accumulation of Cd by three forage mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb.) cultivars in heavy metal-polluted farmland: A field experiment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 3354 – 3360.
- [25] YANG B, ZHOU M, SHU W S, et al. Constitutional tolerance to heavy metals of a fiber crop, ramie (*Boehmeria nivea*), and its potential usage [J]. Environmental Pollution, 2010, 158 (2): 551 – 558.
- [26] 李雪玲, 余玮, 李林林, 等. 镉对 3 个苧麻品种生长和光合特性的影响 [J]. 中国麻业科学, 2017, 39 (3): 130 – 135.
- [27] SHE W, JIE Y C, XING H C, et al. Tolerance to cadmium in ramie (*Boehmeria nivea*) genotypes and its evaluation indicators [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37 (2): 348 – 353.
- [28] 代剑平, 揭雨成, 冷鹏, 等. 镉污染环境 中镉在苧麻植株各部分分布规律的研究 [J]. 中国麻业科学, 2003, 25 (6): 279 – 282.
- [29] 余玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 不同程度污染农田苧麻吸收积累镉特性研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28 (14): 275 – 279.
- [30] 许英, 揭雨成, 孙志民, 等. 苧麻品种对镉污染土壤适应性的研究 [J]. 中国麻业科学, 2005, 27 (5): 249 – 253.
- [31] LI L, CHEN J H, HE Q L, et al. Characterization of physiological traits, yield and fiber quality in three upland cotton cultivars grown under cadmium stress [J]. Australian Journal of Crop Science, 2012, 6 (11): 1527 – 1533.
- [32] 李玲, 陈进红, 何秋伶, 等. 3 个陆地棉种质 (系) 重金属镉的积累、转运和富集特性分析 [J]. 棉花学报, 2012, 24 (6): 535 – 540.
- [33] 杨晓萍, 李玉军, 李飞. 关于湖南省镉污染耕地植棉修复的思考 [J]. 湖南农业科学, 2018 (3): 95 – 97.
- [34] 史景允, 于伟红, 梁秋生. 蓖麻对镉污染土壤的修复潜力 [J]. 江苏农业科学, 2014, 42 (11): 386 – 388.
- [35] 叶文玲, 答萱, 章本立, 等. 2 种蓖麻对镉的吸收及解毒机制研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45 (3): 468 – 472.
- [36] 刘义富, 毛昆明. 蓖麻对铅锌尾矿土的修复潜力评价 [J]. 广东农业科学, 2012, 39 (17): 154 – 156.
- [37] STOLARSKI M J, OLBA-ZIĘTY E, ROSENQVIST H, et al. Economic efficiency of willow, poplar and black locust production using different soil amendments [J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 106: 74 – 82.
- [38] 卢顺友, 陈庆高, 雷庭, 等. 规模烟叶种植户的生产效益研究——以瓮安县为例 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42 (7): 2153 – 2154.
- [39] 王素丽, 潘孟, 朱斌. 杨树造林技术要点及其效益分析 [J]. 河南农业, 2019 (11): 30 – 33.
- [40] 龙唐忠, 颜新培, 龚昕, 等. 论桑树在尾矿库生态修复中的应用前景——基于湘西矿山环境效应 [J]. 农村经济与科技, 2015, 26 (12): 63 – 66.
- [41] 朱中秋, 廖元兵, 刘小琴, 等. 坡耕地种植苧麻综合利用技术及效益分析 [J]. 现代农业科技, 2016 (20): 33 – 34.
- [42] 弓泽宇, 陈玉兰. 新疆棉花种植成本效益分析研究 [J]. 天津农业科学, 2020, 26 (4): 32 – 36.
- [43] 王海清, 王光明, 张宝贤, 等. 利用宜农荒地种植蓖麻增加农民经济收入 [J]. 农业科技通讯, 2015 (3): 248 – 251.

本栏目编辑 姚朝英

(上接第 8 页)

- [10] HINTON J C. GIS and remote sensing integration for environmental applications [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1996, 10 (7): 877 – 890.
- [11] 于海涛. 基于 AE 的油气田地理信息系统的设计与实现 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2015.
- [12] 朱锦. 小型油气田地理信息数据库设计 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2015.
- [13] 熊丽君, 袁明珠, 吴建强. 大数据技术在生态环境领域的应用综述 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (12): 2454 – 2463.
- [14] 阿永嘎. 大数据技术在环境执法工作中的应用研究 [J]. 环境科学与管理, 2017, 42 (10): 10 – 12.
- [15] 覃雄派, 王会举, 李芙蓉, 等. 数据管理技术的新格局 [J]. 软件学报, 2013, 24 (2): 175 – 197.
- [16] 李学龙, 龚海刚. 大数据系统综述 [J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45 (1): 1 – 44.

本栏目编辑 姚朝英