

我国农田土壤重金属污染现状·来源及修复技术研究综述

赵纪新, 尹鹏程, 岳荣, 王美萍, 史锐* (巴彦淖尔市环境科学研究所, 内蒙古临河 015000)

摘要 概述了我国农田土壤重金属污染现状, 从工矿企业生产、污水灌溉、矿产资源开发、农业生产活动、大气沉降等方面分析土壤重金属的来源, 并介绍重金属污染土壤的修复技术, 同时探讨该研究领域存在的问题及今后发展方向。

关键词 土壤; 重金属; 来源; 修复技术

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)04-0019-03

Research Progress of Status, Source, Restoration Technique of Heavy Metals Pollution in Cropland of China

ZHAO Ji-xin, YIN Peng-cheng, YUE Rong et al (Institute of Environmental Science of Bayannur, Linhe, Inner Mongolia 015000)

Abstract Present situation of soil heavy metal pollution was described in cropland of China. The sources of soil heavy metals were analyzed from industrial production, sewage irrigation, exploitation of mineral resources, agricultural activities and atmospheric deposition, and remediation technology of heavy metal contaminated soil was introduced. Problems in this area and the development direction in the future were discussed.

Key words Soil; Heavy metal; Source; Restoration technique

土壤是地球生态系统的重要组成部分, 土壤的理化性质影响植物的生长, 尤其是土壤重金属污染对植物的生长造成影响, 土壤重金属会通过食物链进入植物进而进入人体或其他动物体内进行富集, 影响人类生命健康^[1]。过去的 50 年中, 大约有 2.2 万 t 的 Cr、 9.39×10^5 t Cu、 7.83×10^5 t Pb 排入土壤环境中, 造成土壤重金属污染^[2]。

1 我国土壤重金属污染问题日益凸显, 土壤重金属研究热度不断攀升

我国土壤重金属污染形势不容乐观。近年来, 我国土壤重金属污染事件, 不仅对农产品质量造成严重威胁, 影响人民身体健康, 甚至成为导致社会不稳定的因素^[3]。2000 年, 农业部环境监测系统发布了我国大中城市郊区、工矿区、污灌区、商品粮基地和基本农田保护区农畜产品监测结果: 我国大部分城市郊区土壤和农产品中重金属污染相当严重^[4]。土壤重金属污染危害严重, 周期长, 农田土壤重金属行为过程、风险及修复技术研究已经成为当下研究的热点^[5]。

从“知网”关于土壤重金属的研究趋势图来看, 从 1997 年开始, 土壤重金属的学术关注度一路走高, 越来越受到研究人员的重视(图 1)。从知网关于土壤重金属的研究热点来看, 前 4 万篇文献内, 主要文献数量为 203 篇, 相关国家课题量为 27 个, 主要研究人员为 436 人, 主要研究机构为 153 个。土壤重金属的研究热度为 4 星。

从国家层面来讲, 2017 年 8 月, 国家已经开展土壤详查, 要在 2018 年年底前查明农用地土壤污染的面积、分布及其对农产品质量的影响, 2020 年年底掌握重点行业企业用地中污染地块的分布及其环境风险。

2 我国农田土壤重金属污染现状

目前, 我国重金属污染呈现面积逐步增大、污染源多元化的趋势。我国耕地土壤重金属超标率都在 35% 左右^[6], 关于重金属污染农田的面积多数学者认为达到 2 000 万 hm^2 ,

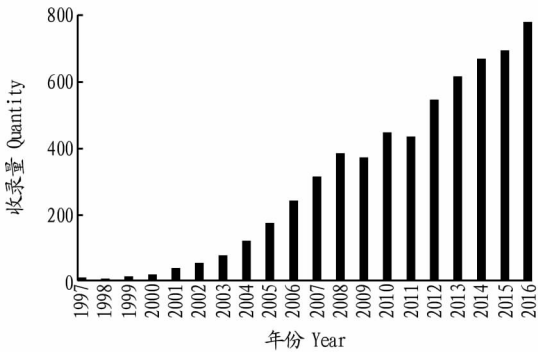


图 1 知网土壤重金属文献收录量

Fig. 1 Quantity of documents about soil heavy metals in CNKI

约占全国耕地面积的 20%。而宋伟等^[4]通过检索文献收集到我国 83.87% 省份和 22.54% 地级市的土壤污染数据, 通过分析得到, 我国耕地土壤重金属污染面积大概占我国耕地面积的 1/6。全国每年受重金属污染的粮食达到 0.12 亿 t, 因重金属污染导致的粮食污染造成的经济损失达 200 亿元^[7]。导致我国农田土壤环境质量下降的重金属主要有铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、Cr(铬)和准金属砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)等生物毒性显著的元素。我国不同区域的农田重金属污染问题不尽相同, 这是由于各个区域土壤类型与环境质量不同^[8]。其中, Cd 的污染最为普遍, 面积达到 1.3 万 hm^2 , 涉及 11 个省的 25 个地区, 再次约有 3.2 万 hm^2 耕地受到 Hg 的污染, 涉及 15 个省的 21 个地区^[9]。我国耕地重金属污染呈现的规律为中部高, 东西部较低。张小敏等^[1]研究表明, 土壤 Pb 含量在空间分布上西南部出现高值, 其他区域变化不明显, 新疆地区含量较少。Cd 的空间分布则出现多个高值区域。Cr 在中国区域的分布情况为由云南向东北方向直到江苏地区出现连续高值, 在环黄渤海地区尤其京津唐地区出现次高值区。其他重金属土壤含量较高的地区为广东省北部与湖南交界和环渤海地区, 再之在湖北、安徽等地土壤重金属含量偏高。Zn 含量在空间分布上与 Pb 相似。

3 我国农田土壤重金属来源

土壤中重金属来源较为复杂, 成土母质及人类活动是影

作者简介 赵纪新(1983—), 男, 河北邯郸人, 助理工程师, 硕士, 从事环境评估与生态恢复研究。* 通讯作者, 工程师, 硕士, 从事环境科学方法论与生态恢复研究。

收稿日期 2017-05-10

响其来源的主要因素^[10]。成土母质影响土壤重金属含量为不可控因素,但是随着人类经济社会的发展,人类活动已经成为影响土壤重金属含量的最主要因素^[11-12]。

3.1 工业生产排放 张从等^[13]研究表明,1980 年我国由于工业生产导致的耕地污染面积为 266.7 万 hm^2 ,1988 年达到 666.7 万 hm^2 ,1992 年为 1 000.0 万 hm^2 。工业“三废”的大量排放导致农用水源、农田土壤和农区大气受到影响,从而导致土壤重金属污染^[14]。统计数据显示,2011 年底,我国工业燃煤锅炉为 46 万台,消耗 7 亿 t 燃煤,煤燃烧产生的大量重金属进入大气,进而进入农田,污染土壤^[15-16];刘永伟等^[17]通过对深圳市工业污染源进行调查得到深圳市的重金属绝对排放量呈现增大趋势,而单位产值的重金属排放量呈下降趋势;目前我国年产生工业废渣量为 2 700 多万 t^[18],工业废渣中的重金属通过淋溶作用进入土壤,污染土壤环境,杨阳等^[19]通过对义乌市工业废渣堆积场的研究发现,堆场土壤重金属中,Cr、Zn、Pb、Cu 4 种重金属高于当地背景值 1 倍以上。张辉等^[20]在南京一个铬工厂周围调查发现,土壤中铬的含量超过当地背景值的 4.4 倍。

3.2 污水灌溉 我国是一个水资源匮乏的国家,农业用水缺口为 300 亿 m^3/a ^[21],所以利用污水灌溉在很多地方极为普遍。20 世纪 80 年代初期,由于污水灌溉导致的农田污染面积达到 62.9 万 hm^2 ^[22]。不同地区由于污灌水源不同,重金属污染类型也各不相同^[23-28],天津市污灌区土壤主要污染元素为 Cd、Hg;北京凤港减河、北运河、潮白河污灌区土壤主要污染元素为 Cr、Cu、Zn;北京市凉水河灌区土壤主要污染元素为 Hg、Pb、Cu、Cr、As 等,其中 Hg 的污染最为严重;沈阳张士灌区为 Cd 污染;太原污灌区土壤重金属元素均不同程度出现超过本底值的现象。

3.3 矿产资源开发 矿产资源的开发促进人类社会的发展,但随着矿山开采及相关周边产业开发带入环境的重金属已造成矿区及其周边农产品产地土壤重金属的污染^[29-30]。例如广西刁江沿岸农田受到严重的 As、Pb、Cd、Zn 复合污染,已不适合农田利用^[31]。

3.4 农药化肥等的使用 不同化肥中重金属的类别和数量差异较大,过磷酸钙中 Cd、Pb 等含量高于氮肥,有机-无机复混肥中 Pb 含量高于除过磷酸钙外的其他化肥^[32]。此外,有机肥料中也含有一定数量的重金属^[33-36]。许多学者研究结果表明^[37-39],经施肥后的土壤中 Cd、Hg 的含量存在不同程度的提高;表层土壤 Cd 含量的升高与大量施用过磷酸钙存在显著性关系^[40]。长期不当施用化肥、有机肥造成土壤中重金属的累积,除此之外,污泥、农药的使用也给土壤带来不同程度的重金属污染。

3.5 大气沉降 大气颗粒物可携带多种重金属元素,比如 Pb、Hg、Cd、Cr、As 等^[41],这些重金属通过大气颗粒物长期沉降,从而导致土壤遭受重金属污染。程珂等^[42]研究认为,天津郊区蔬菜地大气沉降和土壤扬尘对蔬菜中的 Cd 贡献率达 33.7%、As 的贡献率达到 83.7%、Pb 的贡献率达到 72.8%、Cr 的贡献率为 71%。章明奎等^[43]的研究表明,铅锌矿区大

气沉降对农田大白菜中重金属含量累积具有直接作用。

4 土壤重金属修复技术

4.1 物理修复技术

4.1.1 工程措施。工程措施是最为直接的措施,主要包括客土、换土和深耕翻土。工程措施的优点为彻底、稳定,但是工程措施工程量较大,投资高,只适用于小面积土壤重金属污染治理,不宜大面积推广使用^[44]。

4.1.2 热解吸法。热解吸法只适用于易挥发的土壤重金属污染物,脱附的气体需要收集集中处理^[45]。热解吸法的原理为对污染土壤加热,将一些具有挥发性的土壤重金属污染物从土壤中解吸出来。热解吸法最常用于重金属汞污染的土壤治理。

4.1.3 淋洗络合技术。淋洗络合技术是将水或含有冲洗助剂的螯合剂酸/碱溶液、络合剂等淋洗剂注入到污染土壤或沉积物中,洗脱和清洗土壤中污染物的过程^[46]。土壤淋洗剂一般有无机溶液、螯合剂、表面活性剂 3 种^[47],土壤淋洗络合技术快速、高效,但是淋洗废液如果处理不当,容易造成二次污染。

4.1.4 电解析法。电解析的原理是在污染土壤两侧施加直流电压,形成电场梯度,土壤中的重金属在电场作用下,被带到电极两端,从而达到清洁土壤的目的。此法适用于低渗透性的土壤^[48],且成本较低,经济合理。

4.2 生物修复技术

4.2.1 植物修复技术。1983 年,美国科学家 Chaney 等^[49]首次提出植物修复技术,植物修复技术就是利用重金属富集能力较强的植物吸收重金属,收割后统一集中处置,进而达到去除重金属元素的目的。植物修复法细分为植物固定、植物挥发、植物提取。植物固定是利用耐受性植物降低土壤中重金属的活性,从而降低重金属的危害;植物挥发是利用植物的蒸腾作用,将土壤中的重金属挥发到大气中,但是大气中的重金属会通过颗粒物沉降再次进入土壤,造成土壤污染。收集后的重金属常见的处理方法有集中填埋、焚烧和堆制肥料^[50]。利用植物修复可以治理土壤中 Hg、Cd、As、Pb 等重金属^[51-56]。

4.2.2 微生物修复技术。微生物修复技术主要是利用微生物的氧化还原性质,降低土壤中重金属污染程度。微生物修复技术主要涉及细菌、放线菌及真菌^[57]。可降解、毒性小是微生物代谢产物的特点^[58]。微生物修复土壤重金属的机理主要包括细胞代谢、表面生物大分子吸收转运、生物吸附、沉淀和氧化还原反应等^[59]。微生物修复技术是目前最有潜力的土壤重金属修复技术,但是,从目前的研究成果来看,微生物修复技术成本较高,并不适用于大面积推广使用。

4.2.3 植物-微生物联合修复技术。植物-微生物联合修复技术主要是利用植物和土壤微生物之间的共存关系,发挥各自优势,共同修复受重金属污染的土壤。植物-微生物联合修复技术主要机理包括:微生物促进植物生长、微生物提高植物对重金属的耐受性、微生物的解毒作用、促进植物对重金属的固定及吸收等^[60]。植物-微生物联合修复技术主

要有 2 种形式:植物与专性菌株的联合修复和植物与菌根的联合修复^[61]。

5 结语

土壤中重金属主要来自于工业活动、农业活动、矿产资源开发、污水灌溉等方面,土壤重金属的修复技术大致可分为物理修复技术和生物修复技术。

开展多种修复方法耦合的联合修复技术仍是今后重金属复合污染土壤修复研究的主要方向和热点问题。

重金属修复受污染土壤机理、修复技术的安全性研究及后续处理安全性研究相对匮乏。

土壤重金属的源解析及治理修复技术是土壤重金属的研究趋势。多种修复技术联合进行土壤修复是将来重金属污染土壤修复的趋势。

参考文献

- [1] 张小敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703.
- [2] SINGH O V, LABANA S, PANDEY G, et al. Phytoremediation: An overview of metallicity decontamination from soil [J]. Applied microbiology and biotechnology, 2003, 61(5/6):405-412.
- [3] 中国工程院,环境保护部.中国环境宏观战略研究[M].北京:中国环境科学出版社,2011.
- [4] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [5] 郑顺安.我国典型农田土壤中重金属的转化与迁移特征研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [6] 梁淑敏,许艳萍,陈裕,等.工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展[J].生态学报,2013,33(5):1347-1356.
- [7] 俄哲哲,杨思存,崔云玲,等.我国土壤重金属污染现状及生物修复技术研究进展[J].安徽农业科学,2009,35(19):9104-9106.
- [8] 廖玉芬.浅析重金属污染土壤的治理途径[J].中国农业信息,2016(17):3-4.
- [9] 陈怀满.土壤-植物系统中的重金属污染[M].北京:科学出版社,1996.
- [10] LV J S, LIU Y, ZHANG Z L, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of hazardous materials, 2013, 261(13):387-397.
- [11] 于洋,高宏超,马俊花,等.密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价[J].环境科学,2013,34(9):3572-3577.
- [12] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等.湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J].环境科学,2012,33(1):260-265.
- [13] 张从,夏立江.污染土壤生物修复技术[M].北京:中国环境科学出版社,2000.
- [14] 师荣光,郑向群,龚琼,等.农产品产地土壤重金属外源污染来源解析及防控策略研究[J].环境监测管理与技术,2017,29(4):4-13.
- [15] 张胜寒,程立国,叶秋生,等.燃煤电站重金属污染与控制技术[J].能源环境保护,2007,21(3):1-4.
- [16] 谢华林,张萍,贺惠,等.大气颗粒物中重金属元素在不同粒径上的形态分布[J].环境工程,2002,20(6):55-57.
- [17] 刘永伟,毛小琴,孙莉英,等.深圳市工业污染源重金属排放特征分析[J].北京大学学报网络版(预印本),2010,46(2):279-285.
- [18] 赵永康.环境污染防治的重要途径:综合利用工业废渣生微肥[J].微量元素与健康研究,1984(1):51.
- [19] 杨阳,茹广欣,朱秀红,等.义乌市某工业废渣堆积场土壤重金属污染状况研究[J].安徽农业大学学报,2013,40(6):1049-1053.
- [20] 张辉,马东升.南京某合金厂土壤铬污染研究[J].中国环境科学,1997,17(1):80-82.
- [21] 周彤.污水回用决策与技术[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [22] 李玉浸,刘凤枝,高尚宾,等.限制污水灌溉恢复良好的农田生态环境:第二次全国污水灌溉普查结论之二[J].中国人口·资源与环境,2003,13(专刊):65-69.
- [23] 王祖伟,张辉.天津污灌区土壤重金属污染环境质量与环境效应[J].生态环境,2005,14(2):211-213.
- [24] 孙雷,赵炜,李强,等.北京东郊污水与清水灌区土壤中重金属含量的比较研究[J].安全与环境学报,2008,8(3):29-33.
- [25] 杨军,郑袁明,陈同斌,等.北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J].环境科学学报,2005,25(9):1175-1181.
- [26] 周启星,高拯民.沈阳张士污灌区灌溉循环的分室模型及污染防治对策研究[J].环境科学学报,1995,15(3):273-280.
- [27] 张勇.沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J].土壤通报,2001,32(4):182-186.
- [28] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.太原市污灌区土壤重金属污染现状评价[J].农业环境科学学报,2011,30(8):1553-1560.
- [29] 雷梅,陈同斌,郑袁明,等.中国重金属污染:来源与成因分析技术需求[C]//重庆市环境科学学会.污染场地修复产业国际论坛暨重庆市环境科学学会第九届学术年会论文集.重庆:重庆市环境科学学会,2011:245-253.
- [30] 邵学新,吴明,蒋科毅.土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J].广东微量元素科学,2007,14(4):1-6.
- [31] 宋书巧,梁利芳,周永章,等.广西刁江沿岸农田受矿山重金属污染现状与治理对策[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):152-155.
- [32] 王美,李书田.肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J].植物营养与肥料学报,2014(2):466-480.
- [33] 樊文华,刘晋峰,王志伟,等.施用沼肥对温室土壤养分和重金属含量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2011,31(1):1-4.
- [34] 黄鸿翔,李书田,李向林,等.我国有机肥的现状与发展前景分析[J].中国土壤与肥料,2006(1):3-8.
- [35] 彭来真,刘琳琳,张寿强,等.福建省规模化养殖场畜禽粪便中的重金属含量[J].福建农林大学学报(自然科学版),2010,39(5):523-527.
- [36] 任顺荣,邵玉翠,王正祥.利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析[J].农业环境科学学报,2005,24(S1):216-218.
- [37] 马耀华,刘树应.环境土壤学[M].西安:陕西科学技术出版社,1998:198-201.
- [38] WILLIAMS C H, DAVID D J. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants[J]. Soil Sci, 1976, 121:86-93.
- [39] MOOL ENAAR S W, BELTRAMI P. Heavy metal blances of an Italian soil as affected by sewage sewage sludge and Bordeaux mixture applications [J]. Environ Qual, 1998, 27(4):828-835.
- [40] MULLA D J, PAGE A L, GANJE T J. Cadmium accumulation and bio-availability in soils from long term phosphorus fertilization[J]. Journal of environmental quality, 1980, 9(3):408-412.
- [41] 王文全,孙龙仁,吐尔逊·吐尔洪,等.乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 中重金属元素含量和富集特征[J].环境监测管理与技术,2012,24(5):23-27.
- [42] 程珂,杨新萍,赵方杰.大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(10):1837-1845.
- [43] 章明奎,刘兆云,周翠.铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属积累的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2010,36(2):221-229.
- [44] 杨海琳.土壤重金属污染修复的研究[J].环境科学与管理,2009,34(6):130-135.
- [45] WANG J X, FENG X B, ANDERSON C W N, et al. Remediation of mercury contaminated sites: A review [J]. Journal of hazardous materials, 2012, 221/222:1-18.
- [46] PENG J F, SONG Y H, YUAN P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 161(2/3):633-640.
- [47] 何岱,周婷,袁世斌,等.污染土壤淋洗修复技术研究进展[J].四川环境,2010,29(5):103-108.
- [48] 张峰瑜,李长明,张泉泉.重金属污染土壤的治理途径分析[J].资源节约与环保,2016(8):182.
- [49] CHANEY R L, MINNIE M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current opinion in biotechnology, 1997, 8(3):279-284.
- [50] 李玉宝,夏锦梦,论东东.土壤重金属污染的4种植物修复技术[J].科技导报,2017,35(11):47-51.
- [51] WU G, KANG H B, ZHANG X Y, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 174(1/2/3):1-8.
- [52] SANTIBÁÑEZ C, VERDUGO C, GINOCCHIO R, et al. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne* [J]. Science of the total environment, 2008, 395(1):1-10.

表 1 107 个玉米自交系 30° 倾角抗拉弯强度值比较

Table 1 Tensile strength values of 107 maize inbred lines at 30-degree angle

kg

自交系名称 Name of inbred lines	测定值 Measured value	自交系名称 Name of inbred lines	测定值 Measured value	自交系名称 Name of inbred lines	测定值 Measured value
B214	1.25	B228	2.84	B353	3.76
B216	1.13	B229	2.93	B362	3.74
B240	1.30	B231	2.20	B365	2.75
B241	1.92	B232	2.37	B375	2.10
B243	1.82	B233	2.03	B383	2.56
BR27	1.88	B235	3.20	B384	2.11
B269	0.78	B236	3.70	B387	2.33
DJ17	1.62	B239	3.04	B388	2.54
BY815	1.78	B242	2.12	B391	2.84
B351	1.74	B244	2.44	B412	2.09
B379	1.69	B245	3.05	B413	2.29
W1901	1.47	B246	2.96	B416	3.25
LH109	1.80	B247	2.07	B425	2.39
B73	1.75	B248	2.66	B428	2.50
B409	1.95	B249	2.54	B431	2.17
81538	1.06	B250	3.16	B433	2.35
B417	1.62	B251	2.16	B442	3.18
B429	1.84	B252	3.27	B447	2.10
B432	0.91	B255	3.23	B450	3.94
F42	1.77	B258	2.47	B466	2.31
B444	1.95	B259	2.62	B474	2.51
B470	1.69	B260	3.47	PH6WC	4.42
B211	2.26	B262	3.97	HZ14	4.11
B212	2.44	B263	2.95	C864	4.39
B213	3.40	B266	3.43	C232	4.86
B215	3.27	B267	3.26	哲 011	4.50
B217	2.39	B270	3.92	黄 TP	4.38
B219	3.31	B274	2.63	VG187-4	4.39
B220	3.65	B275	2.38	铁 98042	4.89
B221	3.57	B276	2.86	四-144	5.28
B222	3.32	B277	2.34	通 6240	4.16
B223	3.26	B280	3.71	吉 412	4.70
B224	2.63	B343	2.68	黄 C	5.92
B225	2.88	B344	3.57	美 22	8.44
B226	2.93	B345	2.84	NS701	4.54
B227	2.68	B346	3.14		

3 结论

试验结果显示,现有玉米自交系茎秆抗拉弯强度值较大的比例较少,抗拉弯强度值较小的比例也不多,近 70% 的系抗拉弯强度值居中。

一般抗倒性较好的自交系,倾斜 30° 时茎秆强度测定仪的抗拉弯强度值要达到 2.0 kg 以上;抗倒性达到高抗的标准,抗拉弯强度值需 4.0 kg 以上。抗倒性较好的系,基部节间较短、茎秆较粗;生育期早的系抗拉弯强度值相对小些。

表 2 不同种植密度下玉米杂交种抗拉弯强度值比较

Table 2 Tensile strength values of maize hybrid cultivars under different planting densities

kg

序号 Code	杂交种名 Name of hybrid cultivars	种植密度 Planting density//万株/hm ²		
		6.00	6.75	7.50
1	太玉 339	3.31	4.21	3.04
2	登海 618	4.93	4.04	3.65
3	利民 33	3.35	3.54	2.96
4	华美 368	2.10	2.90	2.07
5	强盛 388	3.44	3.73	2.09
6	先玉 508	3.70	3.09	3.03
7	大丰 30	4.32	2.87	3.61
8	先玉 696	2.44	3.63	2.31
9	瑞普 959	3.35	3.40	3.64
10	郑单 958	2.54	2.16	1.95
11	中地 88	2.33	2.59	2.89
12	大丰 26	3.96	3.97	3.24
13	先玉 335	3.62	3.37	2.85

玉米自交系抗倒伏鉴定,参试系在灌浆后期或蜡熟期,在穗位节利用 YYD-1 型茎秆强度测定仪,水平推植株,使其向侧方倾斜 30° 时的数值可作为抗倒伏鉴定指标,具体数值中抗要达到 2.0~4.0 kg,高抗要达到 4.0 kg 以上。因此,抗拉弯强度值越高,抗倒伏能力越强。抗拉弯强度值与玉米自交系田间特征特性相结合,可作为玉米自交系抗倒伏能力强弱的依据。

一般来说,玉米杂交种的抗拉弯强度值大于自交系的值。衡量杂交种的抗倒伏能力时,倾斜 30° 时抗拉弯强度值达到 2.6 kg 以上,可作为杂交种抗倒性的指标之一。

参考文献

[1] 白永新,张润生,李鹏,等. 玉米品种抗倒伏关联特性的鉴定[J]. 山西农业科学,2016,44(11):1592-1596.

[2] 贾志森,白永新. 玉米自交系抗倒伏鉴定研究[J]. 作物品种资源,1992(3):30-32.

[3] 丰光,景希强,李妍妍,等. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析[J]. 华北农学报,2010,25(S1):72-74.

[4] 丰光,刘志芳,李妍妍,等. 玉米茎秆耐穿刺强度的倒伏遗传研究[J]. 作物学报,2009,35(11):2133-2138.

[5] 刘小刚,马飞前,王红武,等. 玉米茎秆穿刺强度遗传研究[J]. 作物杂志,2014(4):27-31.

[6] 勾玲,黄建军,孙锐,等. 玉米不同耐密植品种茎秆穿刺强度的变化特征[J]. 农业工程学报,2010,26(11):156-162.

[7] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报,2013(10):1727-1736.

[8] YANG Q, TU S, WANG G, et al. Effectiveness of applying arsenate reducing bacteria to enhance arsenic removal from polluted soils by *Pteris vittata* L. [J]. International journal of phytoremediation,2012, 14(1):89-99.

[9] 邵友元,李永梅,熊钊. 土壤重金属污染治理技术的现状分析及未来对策[J]. 东莞理工学院学报,2017,24(3):76-82.

[10] 刘家女,王文静. 微生物促进植物修复重金属污染土壤机制研究进展[J]. 安全与环境学报,2016,16(5):290-297.

[11] 牛之欣,孙丽娜,孙铁珩. 重金属污染土壤的植物-微生物联合修复研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2366-2373.

(上接第 21 页)

[53] 王凤永,郭朝晖,苗旭峰. 东方香蒲(*Typha orientalis* Presl)对重度污染土壤中 As、Cd、Pb 的耐性与累积特征[J]. 农业环境科学学报,2011,30(10):1966-1971.

[54] 余海波,周守标,宋静,等. 铜尾矿库能源植物稳定化修复过程中定居植物多样性研究[J]. 中国农学通报,2010,26(18):341-346.

[55] 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.

[56] RUGH C L, WILDE H D, STACK N M, et al. Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene[J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America,1996, 93(8):3182-3187.