

Research on Evaluation of Heavy Metals Pollution in Urban Forest Soil of Xuzhou

Zhaofeng Yu, Zhongqi Zhang, Fazhan Yu*, Yongbing Shan

School of Geography, Geomatics, and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu
Email: 1446340021@qq.com, *yufazhan@126.com

Received: Jul. 10th, 2020; accepted: Jul. 21st, 2020; published: Jul. 28th, 2020

Abstract

Urban forest, an urban greening ecological construction measure, was put forward by forest scientists and ecologists so as to improve the ecological function of urban green space. Taking the urban forest soil in Xuzhou as research object, comprehensive evaluation of heavy metal pollution was carried out from different types of urban forest and forest soil. The results show that the content of 5 kinds of heavy metal Cu, Cd, Zn, Pb, and Cr in Xuzhou urban forest soil was higher than China soil element background values. The pollution of Cd presents the most prominent, while the pollutions with Cu, Zn, Pb, and Cr are free or mild contamination level. From the comprehensive pollution index, the rank of six types of urban forest soil heavy metal pollution is plane tree and paulownia mixed forest (0.92) < camphor forest (1.07) < cedar forest (1.14) < *Platycladus orientalis* forest (1.35) < locust forest (1.46) < Chinese white poplar bark and ginkgo mixed forest (2.06). The degree of contamination of the same kind of heavy metal pollution in urban forest soil is diverse in different regions, the single pollution indexes of forest soil with Cu, Cd, zinc, Pb, and Cr in urban central areas are higher than those of urban fringe and suburban areas respectively, and the difference of urban fringe area and the city suburbs is not obvious. The pollution levels of the soil heavy metal in different regions can be ranked as: urban central areas > edge area of city > city suburbs. The results have provided certain reference for the level of heavy metal pollution in the city.

Keywords

Urban Forest, Soil Heavy Metal, Pollution Index, Xuzhou City

徐州市城市森林土壤重金属污染评价研究

于兆丰, 张忠启, 于法展*, 单勇兵

江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州
Email: 1446340021@qq.com, *yufazhan@126.com

收稿日期: 2020年7月10日; 录用日期: 2020年7月21日; 发布日期: 2020年7月28日

*通讯作者。

摘要

城市森林是林学家、生态学家为了提高城市绿地的生态功能而提出的城市绿化生态建设措施,重金属污染已成为全球共同关注的热点问题。以徐州市城市森林土壤为研究对象,对不同城市森林类型和不同区域森林土壤重金属污染进行综合评价。结果表明,徐州市城市森林土壤表层的5种重金属Cu、Cd、Zn、Pb、Cr含量均高于中国土壤元素背景值,其中Cd的污染程度较高,污染较严重,Cu、Zn、Pb、Cr无污染或轻度污染;从综合污染指数看,6种城市森林类型土壤重金属污染排序:悬铃木+泡桐混交林(0.92) < 香樟林(1.07) < 雪松林(1.14) < 侧柏林(1.35) < 刺槐林(1.46) < 毛白杨+银杏混交林(2.06);不同区域城市森林土壤中同一种重金属污染程度有所不同,城市中心区域森林土壤Cu、Cd、Zn、Pb、Cr单项污染指数均分别高于城市边缘区和城市郊区,而城市边缘区与城市郊区则差别不明显;不同区域土壤重金属污染程度由高至低排序:城市中心区 > 城市边缘区 > 城市郊区。其研究结果为不同功能区域城市森林土壤重金属污染现状水平提供科学参考。

关键词

城市森林, 土壤重金属, 污染指数, 徐州市

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

森林生态系统是陆地生态系统的主体,在维护区域生态环境和全球碳平衡等方面起着极其重要的作用,承担着优化环境和促进发展的双重任务。城市森林植被称作城市之肺,承载着改变城市生态环境,为城市居民提供良好的工作、生活和居住条件的重任[1]。因此,在加快新时期中国城镇化进程中,城市森林发展已成为生态化城市建设的重要形式和内容,城市森林在生态化城市建设中的地位和作用已成为城市生态学研究热点之一[2]。城市森林土壤能储淤城市环境中的重金属污染元素,影响土壤环境质量,能够在一定程度上指示城市生态环境质量状况[3]。由于城市化进程的加速发展和人类活动的干扰,重金属污染物通过多种途径进入森林土壤,造成的生态危害日益显著。土壤综合污染指数又称土壤环境质量指数,是评价环境质量的一种量化尺度,国内外广泛采用综合污染指数,来判定城市环境受各种污染的程度以及比较环境质量的好坏[4]。有关城市森林的研究多集中在对城市森林土壤污染及修复、城市森林结构与功能、土壤理化性质和城市森林土壤肥力质量等方面[5] [6] [7] [8] [9],但是有关城市森林土壤重金属污染评价、空间分布格局及其来源分析方面的研究不多[10] [11]。目前,国内外应用较多的土壤重金属评价方法有内梅罗指数法、环境风险指数法、灰色聚类法等[8],其中内梅罗指数法应用最为广泛,并对该方法上做了一定的改进,通过对比评价,得出更为符合实际情况的评价结果。本文以徐州市城市森林土壤为研究对象,通过对6种不同林分类型和不同区域采集土壤样品进行系统分析,旨在摸清该城市森林土壤重金属污染程度及分布特征,为该城市森林土壤重金属污染防治,维护森林生态安全和保障城市环境质量提供科学参考。

2. 研究区概况

徐州市位于江苏省西北部,地处苏、鲁、豫、皖四省接壤地区,地理坐标为东经 116°22'~118°40'、北纬 33°43'~34°58'之间。东西长约 210 km,南北宽约 140 km,总面积 11,258 km²,占江苏省总面积的 11%。属暖温带半湿润季风气候,四季分明,夏无酷暑,冬无严寒。年平均气温 14.3℃,年均降水量 800~930 mm。

徐州城市森林土壤主要包括粗骨褐土与淋溶褐土 2 个亚类, 土壤剖面形态一般由表土层、淀积层、母质层组成, 土壤呈弱碱性。适应徐州地区气候、土壤特点的林分类型为阔叶落叶林, 但目前市内主要的绿化树种为侧柏林。徐州市区管辖泉山、云龙和鼓楼区, 城市森林覆盖率 27.97%, 位居江苏省第一; 建成区绿地率、绿化覆盖率分别达到 37.64%、41.6%, 人均公共绿地面积 13.52 m², 在改善城市生态条件、营造良好人居环境方面发挥了重要作用。城市森林类型包括低山丘陵森林、城市行道树林和城市园林(公园绿地)。目前徐州市已发展成“城包山、山包城”的空间格局, 低山丘陵森林是徐州城市森林极为重要的组成部分, 山地森林中纯林面积占到有林地面积的 98%, 大多数山地森林以侧柏(*Platycladus orientalis*)纯林为主要林分类型; 主要的公园绿地有彭园、燕子楼公园、戏马台、快哉亭、黄河公园、彭城广场、人民广场、云龙山风景名胜区、泉山森林公园、淮海战役烈士陵园等; 城市行道树林主要绿化树种有银杏(*Ginkgo biloba* Linn)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、雪松(*Cedrus deodara*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、悬铃木(*Platanus acerifolia*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、泡桐(*Paulownia*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、枫树(*Hamamelidaceae*)等。

3. 采样分析与评价方法

3.1. 样品采集及分析

2018 年 8 月对泉山国家森林公园、彭园 - 淮塔风景区、人民广场、黄河公园、燕子楼公园 5 个样区分别采样, 按照代表性地区和面上均匀分布相结合的原则, 系统采集具有代表性的表层土壤样品 30 个。样点布设考虑了城市森林类型, 每个样品由中心点及周边 2~3 m 范围内的 3~4 个子样混合组成。采样一律采用木质工具, 以避免土样被污染。各采样区的具体位置及林分主要树种见表 1。

Table 1. Location of sample plots and the chief species

表 1. 采样区具体位置及林分主要树种

采样类别	采样点位置	区域管辖	主要树种	林分类型
城市郊区	泉山国家森林公园	泉山区	侧柏	侧柏林
城市边缘区	彭园 - 淮塔风景区	泉山、云龙区交界处	刺槐、银杏悬铃木、泡桐	刺槐林悬铃木 + 泡桐混交林
	人民广场	泉山区	雪松、女贞	雪松林
城市中心区	黄河公园	云龙区	银杏、毛白杨	毛白杨 + 银杏混交林
	燕子楼公园	鼓楼区	香樟、枫树	香樟林

将样品置于无尘、通风、避光的地方自然风干。风干后的样品挑去植物根系、大的石块和杂物等, 用瓷质研钵磨细后称取过 100 目木制尼龙筛混合均匀放入写好的纸袋中, 供元素全量分析使用。称取过 100 目木制尼龙筛的土壤样品 0.2 g, 于 105℃ 下恒温干燥 4~6 小时的样品放入铂金坩埚中, 用硝酸 - 氢氟酸 - 高氯酸方法消解, 0.2% 稀硝酸定容至 25 ml 用于重金属 Cu、Cd、Zn、Pb、Cr 的全量分析。其中 Cd、Pb 含量采用液相色谱电感耦合等离子体质谱仪(HPLC-ICP-MS)测定; Cu、Zn、Cr 含量采用电感耦合等离子光谱法(ICP-AES)测定。重金属分析测试过程中均用 GSS-4 和 GSS-5 标准参考土样进行全程质量控制, 具体操作规范见《土壤农业化学分析方法》[12]。

3.2. 单项污染指数法

中华人民共和国土壤环境质量标准(GB 15618-1995)根据土壤应用功能和保护目标, 将土壤划分为三级标准:I 类为主要适用于国家规定的自然保护区(原有背景重金属含量高的除外)集中式生活饮用水源地、

茶园、牧场和其他保护地区的土壤，土壤质量基本上保持自然背景水平；II类主要适用于一般农田、蔬菜地、茶园果园、牧场等地土壤，土壤质量基本上对植物和环境不造成危害和污染；III类主要适用于林地土壤及污染物容量较大的高背景值土壤和矿产附近等地的农田土壤(蔬菜地除外)，土壤质量基本上对植物和环境不造成危害和污染。本研究选取第一级标准(I类)作为土壤环境质量评价的评价标准见表2。

单项污染指数法以土壤单项污染物的实测值与评价标准相比，主要用于评价土壤某一种污染物的污染程度，其计算公式如下：

$$P_{ij} = C_{ij} / S_i \quad (1)$$

公式(1)中： P_{ij} 为第*j*采样区第*i*个重金属的污染指数，指数小污染轻，指数大污染则重。 C_{ij} 为第*j*采样区第*i*个重金属的实测值， S_i 为*i*元素的评价标准。一般 $P_{ij} \leq 1$ 为未污染， $P_i > 1$ 为已污染， $1 < P_{ij} \leq 2$ 为轻度污染， $2 < P_{ij} \leq 3$ 为中度污染， $P_{ij} > 3$ 为重度污染， P_{ij} 越大受到的污染越严重。

Table 2. Standards of soil environmental quality of China

表 2. 中国土壤环境质量标准(mg·kg⁻¹)

质量级别	Cu	Cd	Zn	Pb	Cr
背景值	22.6	0.097	72.4	26.0	61.0
一级	≤35.00	≤0.20	≤100.00	≤35.00	≤90.00
二级	≤100.00	≤1.00	≤250.00	≤300.00	≤300.00
三级	≤400.00	-	≤500.00	≤500.00	≤400.00

3.3. 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数主要反映土壤重金属的综合污染现状，其计算公式如下：

$$P = \left[\left(P_{ij\max}^2 + P_{ij\ave}^2 \right) / 2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

公式(2)中： P 为第*j*采样区的质量综合污染指数， $P_{ij\ave}$ 和 $P_{ij\max}$ 分别第*j*采样区所有污染物单项污染指数的平均值和最大值。依据 GB 15618-1995《土壤环境质量标准》的三级标准分别作为评价的各级污染的初始值，把土壤重金属污染分为4级，并在划分级别上也进行相应调整，内梅罗指数土壤污染分级标准见表3。土壤重金属污染安全级别具体为，I安全级：土壤污染物实测值与土壤背景值相近，属清洁区($P \leq 1$)；II轻污染级：土壤污染物实测值高于污染起始值，土壤受到污染($1 < P \leq 2$)；III中污染级：土壤污染物实测值超过污染起始值1倍，植物生长受到抑制($2 < P \leq 3$)；IV重污染级：土壤污染物实测值超过污染起始值2倍，植物受害严重($P > 3$)。采用土壤环境质量标准对内梅罗综合污染指数法进行综合考量，可使得评价结果更加合理，可比性增强，符合污染评价的实际需要[13]。

Table 3. Grade standard of soil pollution by Nemerow

表 3. 土壤重金属内梅罗污染指数分级标准[13]

污染等级	内梅罗污染指数	污染程度
1 (I)	$P \leq 0.7$	清洁(安全)
2 (I)	$0.7 < P \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)
3 (II)	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染
4 (III)	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染
5 (IV)	$P > 3.0$	重度污染

4. 评价结果与分析

4.1. 不同城市森林类型土壤重金属污染

采用单项污染指数和内梅罗综合指数分别对研究区森林土壤中的重金属元素进行污染评价,对采样点进行分级统计。侧柏林、刺槐林、雪松林、悬铃木 + 泡桐混交林、毛白杨 + 银杏混交林、香樟林 6 种城市森林类型土壤重金属污染评价结果列于表 4。由表 4 可知,除毛白杨 + 银杏混交林和香樟林中 Cu、侧柏林和悬铃木 + 泡桐混交林中 Zn、刺槐林中的 Pb 的单项污染指数小于 1.0 之外,其余各重金属元素的单项污染指数均大于 1.0。其中 Cd 的平均单项污染指数高达 2.5,说明徐州市森林土壤中 Cd 污染达到了中度污染的等级,即 Cd 的污染程度最大。徐州市不同城市森林土壤的单项污染指数大小排序为: $Zn < Cu < Pb < Cr < Cd$ 。同样,同一种重金属在不同森林类型土壤的污染指数不同,Cu 的单项污染指数以刺槐林最高(1.36),香樟林最低(0.61);Zn 的单项污染指数以毛白杨+银杏混交林最高(1.26),悬铃木 + 泡桐混交林最低(0.57);Cd 的单项污染指数在不同森林类型中差异不明显,但含量较高,以毛白杨 + 银杏混交林最高(3.16),雪松林最低(2.07);Pb 的单项污染指数以毛白杨 + 银杏混交林最高(1.49),刺槐林最低(0.90);Cr 的单项污染指数以刺槐林最高(1.41),悬铃木 + 泡桐混交林最低(1.08)。

Table 4. Single factor pollution and Nemerow index of various urban forest soils

表 4. 不同城市森林类型土壤重金属单项污染指数和内梅罗综合指数

林分类型	单项污染指数					内梅罗综合指数
	Cu	Cd	Zn	Pb	Cr	
侧柏林	1.08	2.81	0.78	1.15	1.31	1.35
刺槐林	1.36	2.08	1.14	0.90	1.41	1.46
雪松林	1.21	2.07	1.04	1.03	1.33	1.14
悬铃木 + 泡桐混交林	1.02	2.24	0.57	1.07	1.08	0.92
毛白杨 + 银杏混交林	0.80	3.16	1.26	1.49	1.24	2.06
香樟林	0.61	2.64	1.09	1.21	1.22	1.07

徐州市 6 种森林类型土壤重金属污染内梅罗综合指数除悬铃木 + 泡桐混交林外均大于 1.0,即达到轻度~中度污染等级,其中毛白杨 + 银杏混交林土壤重金属综合指数最高(2.06),达到中度污染等级,悬铃木 + 泡桐混交林为最低(0.92)。6 种森林类型中土壤重金属污染内梅罗综合指数从小到大依次:悬铃木 + 泡桐混交林(0.92) < 香樟林(1.07) < 雪松林(1.14) < 侧柏林(1.35) < 刺槐林(1.46) < 毛白杨 + 银杏混交林(2.06)。表明徐州市不同森林类型土壤重金属综合污染程度不同,可能是由于不同森林类型中不同树种对重金属的吸收、截留和净化能力不同,毛白杨 + 银杏混交林对 Cu、Cd、Zn、Pb、Cr 的综合净化能力最差,而悬铃木 + 泡桐混交林最强。因此,从净化城市森林土壤重金属的角度,应适当增加悬铃木、泡桐等树种。

4.2. 不同区域城市森林土壤重金属污染

采用同样方法分别对城市中心、城市边缘、城市郊区等研究区森林土壤中的重金属元素进行污染评价,对采样点进行分级统计。城市郊区、城市边缘区、城市中心区的森林土壤重金属污染评价结果列于表 5。由表 5 可知,徐州市不同区域城市森林土壤中,Cd 的污染指数最大,污染程度最高,即达到中度污染;其次为 Cr;Zn 的污染指数最小,污染程度最低。不同区域城市森林土壤中同一种重金属污染程度也有所不同,城市中心区域森林土壤 Cu、Cd、Zn、Pb、Cr 单项污染指数均分别高于城市边缘区和城市

郊区，而城市边缘区与城市郊区则差别不明显。在城市中心不同区域森林土壤同一种重金属污染程度又不同，Cd 的单项污染指数明显高于 Cu、Zn、Pb、Cr，其中黄河公园的 Cu(0.97)和燕子楼公园的 Zn(0.95) 单项污染指数均小于 1.0，未污染，其他均有不同程度的污染。在城市边缘区与城市郊区森林土壤中，Cd、Cr 的污染指数较大(大于 1.0)，其中 Cd 的污染指数(2.04)在城市边缘区大于 2.0，达到中度污染程度。同一种重金属元素在不同区域城市森林土壤中的污染指数也不同，Cu 的单项污染指数在燕子楼公园最高(1.21)，属轻度污染，泉山国家森林公园最低(0.84)；Zn 的单项污染指数在黄河公园最高(1.17)，达到轻度污染等级，泉山国家森林公园的污染指数最低(0.73)；Pb 在黄河公园的单项污染指数最高(1.32)，达轻度污染程度，彭园 - 淮塔风景区最低(0.91)；Cr 在人民广场的单项污染指数最高(1.32)，属轻度污染等级，泉山国家森林公园的污染指数最低为 1.03，也已达到轻度污染；Cd 的单项污染指数在泉山国家森林公园为 1.87，属轻度污染，其他区域的单项污染指数均大于 2.0，达到中度污染程度。可见，徐州城市森林土壤 Cd 的单项污染指数最高，污染程度最为严重。

Table 5. Single factor pollution and Nemerow index of various urban forest soils in different area
表 5. 不同区域城市森林土壤重金属单项污染指数和内梅罗综合指数

采样类别	采样区域	单项污染指数					内梅罗综合指数
		Cu	Cd	Zn	Pb	Cr	
城市郊区	泉山国家森林公园	0.84	1.87	0.73	0.98	1.03	0.75
城市边缘区	彭园 - 淮塔风景区	1.05	2.04	0.82	0.91	1.09	0.89
	人民广场	1.13	2.26	1.04	1.05	1.32	1.14
城市中心区	黄河公园	0.97	2.42	1.17	1.32	1.08	0.93
	燕子楼公园	1.21	2.03	0.95	1.11	1.25	1.02

内梅罗综合污染指数可以综合判断森林土壤中多种重金属污染物的联合污染效应，从表 5 可知，在城市中心区域的人民广场和燕子楼公园的内梅罗综合指数最大，分别为 1.14 和 1.02，属轻度污染等级；在城市边缘区和城市郊区的内梅罗综合污染指数相对较小，分别为 0.89 和 0.75，属尚清洁污染等级。城市中心区为轻度污染等级，城市边缘区和城市郊区属尚清洁污染等级，表明不同城市化梯度森林土壤重金属的污染程度不同，其污染程度由高至低排序为：城市中心区 > 城市边缘区 > 城市郊区。这说明工业、交通及生活等人为活动因素对城市森林土壤重金属污染产生较为显著的影响作用。

5. 结论与讨论

5.1. 结论

1) 徐州市城市森林土壤 Cd 的污染最为严重，Cd 含量远高于土壤背景值，且超过土壤环境质量一级标准；Cu、Zn、Pb、Cr 4 种重金属平均含量均略高于土壤背景值，存在不同程度的污染。

2) 徐州市不同城市森林类型土壤以 Zn 的单项污染指数最低，Cd 的单项污染指数最高，按单项污染指数大小排序为：Zn < Cu < Pb < Cr < Cd；6 种城市森林类型土壤重金属污染内梅罗综合指数从小到大依次：悬铃木 + 泡桐混交林(0.92) < 香樟林(1.07) < 雪松林(1.14) < 侧柏林(1.35) < 刺槐林(1.46) < 毛白杨 + 银杏混交林(2.06)。

3) 徐州市不同区域城市森林土壤中同一种重金属污染程度有所不同，城市中心区域森林土壤 Cu、Cd、Zn、Pb、Cr 单项污染指数均分别高于城市边缘区和城市郊区，而城市边缘区与城市郊区则差别不明显；不同区域森林土壤重金属污染程度由高至低排序：城市中心区 > 城市边缘区 > 城市郊区。

5.2. 讨论

1) 结合土壤环境质量标准的内梅罗指数从评价结果来看,比其他单因子内梅罗指数评价结果更能适度地反映人为因素和自然因素的综合作用情况,分析结果更为客观。

2) 由于不同森林类型、不同区域为多对象研究,受研究目的、时间等因素影响,不同城市梯度研究区域采样点位偏少,各区域内部没有进行细化研究,今后有待加强深化。

3) 不同森林类型对于城市森林土壤重金属污染有不同的净化效果,需做到适地适树,建议在城市森林的营造时尽可能地选用本地树种和抗污染较强的树种,以利于林木的生长。

基金项目

江苏师范大学博士学位教师科研支持项目(19XFRS013);徐州市科技计划项目(XZZD1201)。

参考文献

- [1] 郭聪聪. 河北省城市森林综合评价体系的构建[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2010.
- [2] 余爱华, 卢秀琳, 周舒宇, 等. 城市不同功能区土壤重金属特性分析——以南京市玄武区为例[J]. 森林工程, 2014, 30(6): 27-32.
- [3] 余广学, 张金震, 王焯, 等. 郑州市土壤重金属污染状况和质量评价[J]. 岩矿测试, 2015, 34(3): 340-345.
- [4] 谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 等. 土壤重金属污染评价方法研究: 以广州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1329-1337.
- [5] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 等. 工业性城乡交错区农业土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的空间分布及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 227-329.
- [6] 刘为华, 张桂莲, 徐飞, 等. 上海城市森林土壤理化性质[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(2): 155-163.
- [7] 阎伍玖, 吕成文, 陈飞星. 芜湖城市郊区土壤重金属污染危害及其对策研究[J]. 土壤学报, 2000, 31(1): 136-141.
- [8] 马军, 刘爱琴, 侯晓龙, 等. 福州城市边缘区森林土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 149-153.
- [9] 单奇华, 俞元春, 张建锋, 等. 城市森林土壤肥力质量指标筛选——以南京市为例[J]. 土壤, 2009, 41(5): 777-783.
- [10] 丁园, 余小芬, 赵帼平, 等. 庐山不同海拔森林土壤中重金属含量分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 191-194.
- [11] 李向阳, 吴疆, 刘洪强. 鄂东南 5 种森林土壤重金属含量及污染评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 102-108.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] 李小曼, 徐梦洁, 刘勤, 等. 基于内梅罗指数法及其改进方法的小尺度区域土壤重金属污染评价——以苏南地区为例[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 241-245.