

方 慧,颜秋晓,柳小兰,等.油菜全生长期中土壤理化性质的变化及重金属污染评价[J].江苏农业科学,2018,46(23):344-348.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.085

油菜全生长期中土壤理化性质的变化 及重金属污染评价

方 慧¹,颜秋晓²,柳小兰²,黄文粤¹,何腾兵^{1,3},王道平²,林昌虎^{1,2}

(1. 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025; 2. 贵州省中科院天然产物化学重点实验室,贵州贵阳 550002;

3. 贵州大学新农村发展研究院,贵州贵阳 550025)

摘要:为在油菜生长过程中及时改善土壤环境状况,提高油菜的产量、品质和质量,保证食品安全,采集油菜播种前和4个生育时期(苗期、抽薹期、花期和收获期)耕作层表层(0~20 cm)和底层(20~40 cm)根区土壤,测定各个时期土壤理化性质[土壤机械组成、土壤pH值、土壤氧化还原电位(Eh)和土壤有机质含量]及土壤重金属Cr、Cd、Pb、Cu、Zn含量,分析其在整个生长期中的变异程度,并应用单因子污染指数和综合评价法对重金属污染状况进行评价。结果表明,在油菜全生长期中,表层和底层土壤机械组成变化情况基本一致,变异程度最大的是细沙,其次是黏粒,但二者的变化此消彼长;表层土壤pH值的变化极小,底层土壤变化略大,但都在适合油菜生长的pH值范围内;土壤Eh整体呈波动上升趋势,在抽薹期达到最大,处于中等还原状态,属于中等变异;表层土壤有机质含量高于底层,表层土壤有机质含量整体呈下降趋势,底层土壤有机质含量整体呈上升趋势;土壤重金属中Cd含量最低,但污染最严重,其中表层土壤中度污染,底层土壤重度污染,Cr、Pb、Zn、Cu含量虽高,但尚未造成土壤污染。

关键词:油菜;生育期;土壤理化性质;重金属;污染评价

中图分类号: S634.306;X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0344-05

油菜(*Brassica napus* L.)别称油白菜、苦菜,属十字花科

收稿日期:2017-08-10

基金项目:国家自然科学基金(编号:41561075);贵州省省院联合基金(编号:黔科合LH字[2016]7409);贵州省科技支撑计划(编号:黔科合支撑[2017]2860);贵州省优秀青年科技人才项目(编号:黔科合平台人才[2017]5622);贵州省基础研究项目(编号:黔科合基础[2016]1515-2)。

作者简介:方 慧(1992—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事土壤资源利用与保护研究。E-mail:892894946@qq.com。

通信作者:林昌虎,研究员,硕士生导师,主要从事土壤学和环境科学研究。E-mail:linchanghu79@sina.com。

etailed? led? id=5DDA8BA3442C18DEE05397BE0A0A95A7.

[28]农业部.茶叶产地环境技术条件:NY/T 853—2004[S/OL]. [2018-02-01]. <http://www.doc88.com/p-6327053126796.html>.

[29]生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[30]Teng Y G, Li J, Wu J, et al. Environmental distribution and associated human health risk due to trace elements and organic compounds in soil in Jiangxi Province, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015(122):406-416.

[31]中国环境监测总站.中国土壤环境背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[32]周阳靖,吴愉萍,沈群超.公路交通对周边土壤及农作物铅富集的影响研究[J].宁波大学学报(理工版),2014,3(3):88-92.

芸薹属植物,其总产值与种植面积在我国四大油料作物中排名第二^[1-3],也是贵州省最主要的油料作物。研究表明,油菜品质和质量除了受自身基因影响外,土壤环境特别是土壤理化性质也是极为关键的因素^[4]。此外,我国耕地土壤重金属污染问题比较突出,研究结果表明,油料作物特别是油菜对重金属有较强的耐受性和吸收能力,继而导致的食品安全问题更严重^[5],因此关注油菜生长过程中土壤是否清洁同样重要。目前对油菜生长的土壤理化性质及重金属的研究主要集中在外源物质的施用方面,李东洁研究表明,油菜生长过程中污泥及赤泥施入有利于调节土壤的pH值、有机质含量等,同时污泥施入还可以提高土壤可利用性Zn含量^[6];任英亚通

[33]Pagotto C, Rémy N, Legret M, et al. Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(3):307-319.

[34]高海荣.武夷岩茶与土壤中铅、铬的相关性[J].生态学杂志, 2012, 31(12):3203-3206.

[35]Fakayode S O, Olu - Owolabi B I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osogbo, Nigeria; its relationship to traffic density and proximity to highways[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(2):150-157.

[36]刘世梁,崔保山,温敏霞,等.路域土壤重金属含量空间变异的影响因子[J].环境科学学报,2008,28(2):253-260.

[37]翟云波,戴青云,蒋 康,等.高速公路土壤重金属污染状况及健康风险评价[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(6):149-156.

[38]冯金飞.高速公路沿线农田土壤和作物的重金属污染特征及规律[D].南京:南京农业大学,2010.

过油菜盆栽试验发现,施用醋糟堆肥后低肥力土壤的 pH 值基本保持稳定,土壤的有机质含量显著提高^[7];李晓莉研究了沼肥和化肥配施对石灰性土壤理化性质的影响,沼液化肥配施降低了土壤 pH 值,但提高了土壤有机质含量,同时沼液的施入对提高土壤中 Cu 和 Zn 的含量较为明显,对 Pb、Cr、Cd 作用不明显^[8];此外,菌糠的施入会降低土壤 pH 值,而生物炭的施入则会使 pH 值升高,不同处理菌糠均能提高土壤中的有机质含量^[9]。当前对油菜各个生长期土壤理化性质及重金属含量变异的研究比较粗略,因此本研究将对此进行细化,并对土壤重金属污染情况进行评价,以期为今后在油菜生长过程中及时改善土壤环境状况、提高油菜产量和质量作出一定的贡献。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验区域位于贵州省遵义市播州区石板镇,海拔约为 800 m,东经为 106°44′28″、北纬为 27°30′11″,年平均气温为 15.1 ℃,年降水量为 1 020.6 mm,无霜期 291 d,属于亚热带季风性湿润气候,1 年 2 熟,土壤类型为石灰性水稻土。该区域无污水灌溉,附近没有工矿等污染源,面积约为 450 m² (30 m×15 m)。油菜品种为油研 57 号,为甘蓝型半冬性隐性核不育两系杂交品种,国家审定编号为 2013001。此品种幼苗半直立,株高约为 193 cm,产量约为 4 446 kg/hm²,抗倒性强,宜四川、云南、贵州、重庆等冬油菜区种植。油菜播种及田间管理按照当地农户传统管理经验,播种前施用腐熟有机肥牛粪(Cr 含量为 12.54 mg/kg,Pb 含量为 8.85 mg/kg,Cu 含量为 19.25 mg/kg,Zn 含量为 82.99 mg/kg,Cd 含量为 0.81 mg/kg)作为基肥,施用量约为 30 000 kg/hm²,苗期采样后施用尿素(总氮量≥46.4%)作为追肥,施用量约为 150 kg/hm²。间苗后行距为 35 cm,苗间距为 20 cm。

1.2 样品的采集与测定

样品采集分油菜播种前和油菜的 4 个生育时期(苗期、抽薹期、花期、收获期)。油菜播种前、苗期、抽薹期、花期、收获期的采样时间分别为 2016 年 10 月 21 日、2016 年 12 月 1 日、2017 年 2 月 11 日、2017 年 3 月 22 日、2017 年 5 月 5 日。

采用全球定位系统(global positioning system,简称 GPS)定位,在研究区土壤海拔、成土母质、坡向和种植年限基本一致的条件下,采用五点取样法采集耕作层表层(0~20 cm)和底层(20~40 cm)根区土壤,每个土样在 1.0 kg 左右,记录装袋,与此同时做好采样记录。将采集的土壤样品带回实验室置于通风处自然风干,剔除杂质,按四分法将其充分混合后,用木棍碾压研磨,全部过 2 mm 的孔径筛,再用四分法取出一部分研磨,全部过 0.25 mm 的孔径筛。将过筛样品置于密封袋中,并做好标签保存备用。

依据国家和行业标准,并参照《土壤农化分析》^[10]和中华人民共和国农业行业标准准^[11]定土壤理化指标:(1)土壤 pH 值采用电位法(土液比为 1.0:2.5);(2)土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;(3)土壤氧化还原电位(Eh)采用铂电极直接测定法测定;(4)土壤机械组成采用简易比重计法测定;(5)重金属 Cr、Cd、Pb、Cu、Zn 含量采用 HNO₃-HF 微波消解,ICP-OES(prodigy xp)测定。

1.3 数据处理与分析

按照统计学基本要求,剔除试验数据的异常值,运用 Excel 2003 和 DPS 7.5 对土壤的理化指标进行统计,并制表成图进行分析。

参照《土壤环境标准(GB 15618—1995)》^[12](表 1),选取对土壤质量和油菜品质关系密切的 5 种重金属元素(Cr、Cd、Pb、Cu、Zn)作为土壤污染状况的评级因子。根据《全国土壤污染状况评价技术规范(试行)》,将土壤单项污染指数法和综合评价方法相结合^[13-14],采用内梅罗综合指数法进行评价,具体计算方法如下:

单因子指数法, $P_i = \frac{C_i}{S_i}$ 。

式中: P_i 表示环境中污染物 i 的单项污染指数; C_i 表示环境中污染物 i 的实测数据; S_i 表示污染物 i 的评价标准。当 $P_i > 1$ 时,为污染。

综合污染指数法, $P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{\left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{max}}\right]^2 + \left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}\right]^2}{2}}$ 。

式中: $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数; $\left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{max}}\right]^2$ 表示土壤所有污染物中单项污染因子中最大值的平方; $\left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}\right]^2$ 表示土壤所有的污染物中单项污染因子的平均值的平方。

根据综合污染指数对耕作层表层、底层土壤中 5 种重金属元素进行评价,同时对土壤重金属污染进行等级划分(表 2)。

表 1 GB 15618—1995《土壤环境质量指标》

重金属元素	含量限值(mg/kg)		
	pH 值 <6.5	pH 值 6.5~7.5	pH 值 >7.5
Cr	150	200	250
Cd	0.3	0.3	0.6
Pb	250	300	350
Cu	50	100	100
Zn	200	250	300

表 2 土壤环境质量等级

等级	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线	比较清洁
3	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染物超出环境质量标准,作物未受污染
4	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染	土壤污染物超出环境质量标准,作物受污染
5	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染	土壤、作物污染相当严重

2 结果与分析

2.1 土壤机械组成

在油菜全生育期中,表层和底层土壤机械组成的变化情况是基本一致的(图 1),所占比例最大的是粗粉沙(26.4%~35.2%),所占比例最小的是粗沙及中沙(1.5%~3.8%),但收获期表层土壤细沙比例(29.6%)略大于粗粉沙(26.4%)。黏粒所占比例从播种前至收获期呈现先减小后增大再减小的

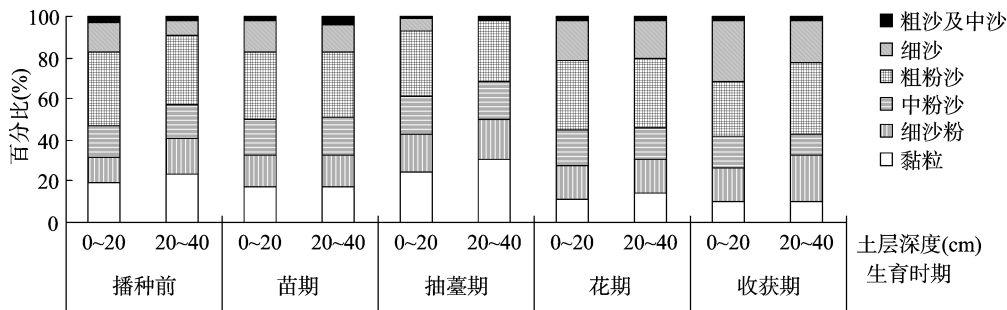


图1 油菜生长过程中土壤机械组成的变化

状态,在抽薹期所占比例(表层为 24.5%,底层为 30.6%)达到最大,与之相反的是细沙,从播种前至收获期细沙所占的比例先增大后减然后再增大。此外,细沙粉和中粉沙的比例一直比较稳定。油菜全生长期中土壤机械组成的变化与根系分泌物、根系的生长以及土壤中的其他生物的活动密不可分。

2.2 土壤 pH 值

土壤 pH 值是土壤酸碱性的直接反应,也是土壤重要的理化指标之一,不仅会影响重金属的有效性和毒性,还会影响植物的生长。研究区域土壤呈中性和微碱性(图 2),适合油菜生长。在油菜的生长过程中,表层土壤 pH 值变化不明显,波动区间极窄,介于 7.80~7.92 之间;底层土壤 pH 值变化比较大,自播种前到花期呈下降趋势,收获期又回升。苗期之前底层土壤 pH 值比表层土壤 pH 值高,之后底层土壤 pH 值均低于表层土壤。

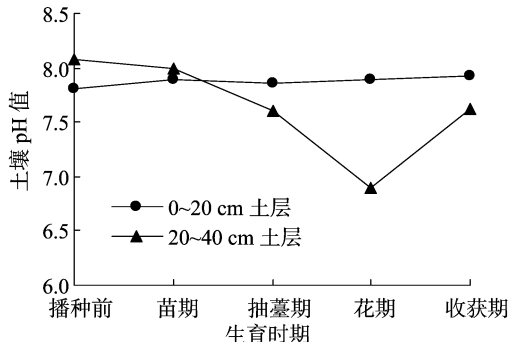


图2 油菜生长过程中土壤 pH 值的变化

2.3 土壤氧化还原电位

土壤氧化还原电位 (oxidation-reduction potential, 简称 Eh) 是反映土壤氧化还原状况综合性的强度指标。在油菜全生长期中,表层土壤和底层土壤 Eh 变化趋势一致(图 3),整体呈波动上升趋势,在抽薹期达到最大(表层土壤 Eh 为 179 mV,底层土壤 Eh 为 193 mV),开花期虽有下降,但在收获期又保持回升趋势。表层土壤 Eh 略低于底层土壤, Eh 均为正值,且在 10~193 mV 之间,处于中度还原状态。

2.4 土壤有机质

油菜全生长期中,耕作层表层土壤的有机质明显高于底层土壤(图 4)。表层土壤有机质含量整体呈下降趋势,在抽薹期和花期小幅增长;底层土壤有机质含量整体呈上升趋势,在花期和收获期小幅下降。油菜在生长过程中养分物质的吸收虽会导致有机质含量的降低,但土壤中的动植物、微生物等频繁活动产生的大量分泌物也会增加其含量。

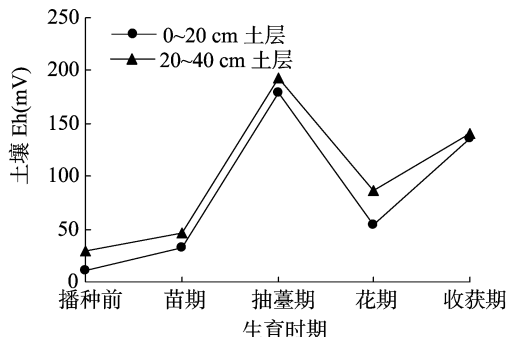


图3 油菜生长过程中土壤 Eh 的变化

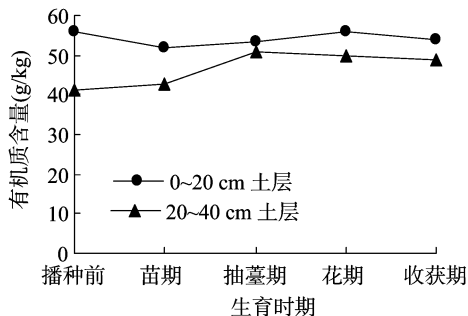


图4 油菜生长过程中土壤有机质的变化

2.5 土壤重金属含量

农田土壤中重金属会随着作物生长富集到植株体内,同时在作物生长过程中降水也会导致重金属的流失,从而引起作物不同生长时期土壤中重金属含量的变化。由图 5 可知,在表层土壤中 Cr (71.18~84.36 mg/kg) 和 Zn (70.94~82.16 mg/kg) 含量较高, Cd 含量 (1.41~1.73 mg/kg) 最低。油菜全生长期中 Cr 和 Zn 一直处于波动状态,自播种前到收获期含量有增有减; Cd 含量在油菜生长过程中先增大后减小,抽薹期含量最大。Pb (35.22~44.54 mg/kg) 和 Cu (16.94~19.75 mg/kg) 含量变化趋势一样,自播种前到花期含量保持递减状态,到收获期又缓缓回升。

底层土壤中重金属含量最高的是 Cr (77.06~83.93 mg/kg), 最低的仍是 Cd (1.06~1.93 mg/kg) (图 6), Cd 含量在油菜全生长期呈波动状态,由于其含量较低,所以增减幅度不参与整体比较。Cr、Zn、Cu 三者变化趋势一致,即播种前到苗期略增长,随后均下降,但变化量极小, Pb 含量的波动前期比后期大。

2.6 油菜全生长期中土壤理化性质及重金属含量变异程度分析

表层土壤理化性状变异系数在 2.99%~78.41% 之间,

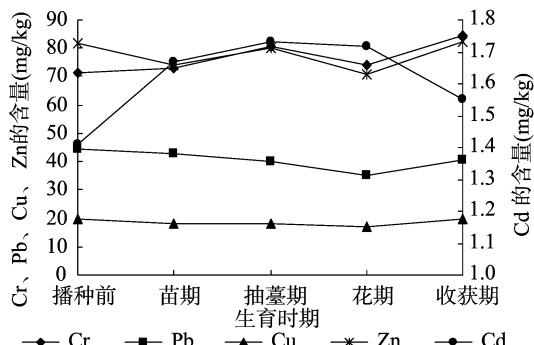


图5 油菜全生育期中 0~20 cm 土壤重金属含量的变化

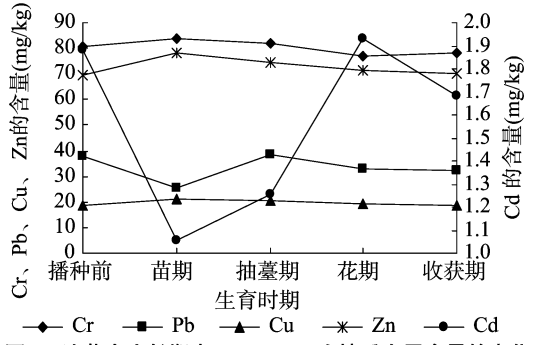


图6 油菜全生长期中 20~40 cm 土壤重金属含量的变化

底层土壤理化性状变异系数在 5.44% ~ 60.91% 之间,均为弱变异和中等变异(表 3)。表层和底层土壤 Eh 变异最强(变异系数分别为 78.41% 和 60.91%),其次是细沙和黏粒(细沙的变异系数分别为 46.10%、60.76%,黏粒的变异系数

分别为 31.93%、36.88%)。表层土壤变异最弱的是土壤有机质含量(变异系数为 2.99%),底层土壤变异最弱的是土壤 pH(变异系数为 5.44%)。

表 3 油菜全生长期中土壤理化性质及重金属含量变异程度(平均值 ± 标准差)

类型	指标	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
土壤理化性质	黏粒(粒径 < 0.001 mm)	16.42 ± 31.929	19.30 ± 36.879
	细沙粉(0.001 ≤ 粒径 < 0.005 mm)	15.62 ± 12.065	17.91 ± 12.313
	中粉沙(0.005 ≤ 粒径 < 0.010 mm)	17.02 ± 7.540	15.90 ± 18.542
	粗粉沙(0.010 ≤ 粒径 < 0.050 mm)	31.93 ± 9.336	32.46 ± 6.663
	细沙(0.050 ≤ 粒径 < 0.250 mm)	16.91 ± 46.095	11.99 ± 60.759
	粗沙及中沙(0.250 ≤ 粒径 < 1.000 mm)	2.10 ± 16.940	2.43 ± 29.191
	土壤 pH 值	7.87 ± 5.300	7.64 ± 5.443
	土壤 Eh	82.30 ± 78.411	99.30 ± 60.913
土壤重金属含量	土壤有机质含量	54.17 ± 2.987	46.61 ± 8.336
	Cr	76.61 ± 6.582	80.30 ± 3.156
	Cd	1.62 ± 7.474	1.56 ± 22.347
	Pb	40.68 ± 7.793	33.42 ± 14.135
	Cu	18.47 ± 5.671	19.50 ± 4.723
	Zn	77.76 ± 5.773	72.68 ± 4.395

土壤重金属 Cd 和 Pb 含量变异程度大于其他 33 种重金属,且底层土壤变异程度大于表层,Cd 和 Pb 在表层土壤的变异系数分别为 7.47%、7.79%,在底层土壤的变异系数分别为 22.35%、14.14%。

2.7 土壤重金属污染评价

参照我国 1995 年颁布的 GB15618—1995《土壤环境质量标准》,采用内梅罗综合指数法进行评价,计算油菜各个生长时期土壤重金属含量的单项污染指数(P_i)和油菜生长过程中重金属含量的综合污染指数($P_{综}$),进而对土壤重金属元素进行分析和评价。

由表 4 可知,土壤重金属 Cd 在表层和底层土壤均为中度污染(表层土壤 $P_{综}$ 为 2.791,底层土壤 $P_{综}$ 为 2.929),表层土壤重金属 Cd 在抽薹期污染最严重,底层土壤在花期污染最严重,其他 4 种元素在 2 层土壤中均处于安全等级。各重金属元素在油菜全生长期中单项因子污染指数变化趋势均不一致,但就综合污染指数而言,除了 Pb,其他 4 种重金属元素在底层土壤综合污染指数大于表层土壤,这可能与雨水的淋溶作用以及油菜对表层土壤重金属的富集作用有关。

3 结论与讨论

在油菜全生育期中,表层和底层土壤机械组成的变化情

况基本一致,变异程度最大的是细沙,其次是黏粒,但二者的变化此消彼长,在抽薹期黏粒所占比例达到最大,细沙比例降到最小,这与根系的生长及根系分泌物有关。抽薹期根系迅速生长会破坏之前土壤结构,同时根系分泌物也会快速黏结土壤颗粒,陶俊的研究也表明,总体上 0.500 ~ 1.000 mm 径级的根系对减小沙粒含量、增大黏粒含量、改善土壤结构构成贡献最大^[15]。

底层土壤 pH 值较表层变化略大,但都在适合油菜生长的 pH 值范围内。底层土壤 pH 值自播种前到花期一直下降随后又回升,油菜播种之前和苗期底层土壤 pH 值比表层高,但是底层土壤 pH 值在抽薹期、开花期和收获期均低于表层,这是因为冬春季节降水量大于蒸发量,土壤的淋溶作用强烈,土壤溶液中盐基离子随水渗透向下移动,并随之出现交换性铝^[16],故耕作层底层土壤有酸化的趋势,苗期采样过后弱碱性肥料尿素的施用使表层土壤 pH 值没有出现大的波动,收获期气温升高,水分蒸发再次将盐分分离底层土壤。

土壤 Eh 波动范围在 10 ~ 193 mV 之间,属于中等变异,处于中等还原状态,花期土壤 Eh 骤降,说明土壤通气性变差,当地油菜的花期在 3 月中旬至 4 月中旬,这段时间降水量大且频率高,土壤水分含量高,通气性差。一般来说,表层土壤通气状况更好,土壤 Eh 应该更高,但良好的通气状况也更

表 4 土壤重金属污染评价

土层深度 (cm)	元素	P_i					$P_{\text{综}}$	污染等级
		播种前	苗期	抽薹期	花期	收获期		
0~20	Cr	0.285	0.291	0.323	0.296	0.337	0.322	安全
	Cd	2.349	2.781	2.885	2.863	2.588	2.791	中度污染
	Pb	0.127	0.123	0.114	0.101	0.116	0.122	安全
	Cu	0.195	0.181	0.180	0.169	0.197	0.191	安全
	Zn	0.272	0.247	0.267	0.236	0.274	0.267	安全
20~40	Cr	0.322	0.336	0.328	0.385	0.312	0.362	安全
	Cd	3.142	1.758	2.088	6.442	2.808	2.929	中度污染
	Pb	0.109	0.073	0.110	0.109	0.092	0.104	安全
	Cu	0.186	0.208	0.204	0.190	0.187	0.202	安全
	Zn	0.232	0.261	0.247	0.285	0.234	0.269	安全

有利于好氧微生物的生长,好氧微生物在生长过程中消耗掉大量的氧气,反过来又降低了土壤 $E_h^{[17]}$,因此表层土壤 E_h 略低于底层土壤。云贵高原冬春季受寒潮天气影响降水多,且平时地形降水频繁,故播种前要及时翻耕土地,油菜在生长过程中,特别是花期降水多要做好清沟排水措施,保证土壤良好的通气状况。

油菜在全生育期中表层土壤有机质含量高于底层,这与朱书法等^[18]的研究结果一致。表层土壤有机质含量整体呈下降趋势,一方面是因为油菜生长主要从表层土壤汲取养分物质,另一方面是因为有机质通过淋溶作用向下迁移;底层土壤有机质含量整体呈上升趋势,在花期和收获期含量降低,同时表层土壤有机质含量在收获期也在降低,这是因为油菜在此生育期间须要大量的养分物质来保证植株的开花与结果,因此导致土壤中有机质极大亏损。

表层土壤 Pb 和 Cu 含量自播种前到花期保持递减趋势,到收获期又小幅度回升,Cr 和 Zn 含量在油菜整个生育期中处于波动状态,Cd 含量在油菜全生育期中先增大后减小;底层土壤 Cr、Zn、Cu 含量变化趋势一致,但变化不明显;Pb 含量从播种前到抽薹期波动大,后期变化小,Cd 含量呈先降低后增高然后又降低的趋势,变异程度均大于表层土壤;5 种重金属中 Cd 含量最低,但 Cd 污染最严重,表层土壤中度污染,底层土壤重度污染,Cr、Pb、Zn、Cu 含量虽高,但均安全。油菜在生长过程中土壤重金属含量的变化有多方面的原因:一是基肥牛粪的施用;二是油菜生长过程中对重金属的富集;三是随降水的流失;四是枯叶掉落和油菜花凋谢将重金属归还土壤。

为在油菜生长过程中及时改善土壤环境状况,提高油菜的产量、品质和质量,保证食品安全,现提出以下建议:有机肥施用前测定重金属含量,选用含量低的有机肥;花期降水量大,大雨过后要及时清沟排水,保证土壤良好的通气性;采摘枯黄菜叶,避免将重金属再次带回土壤。

参考文献:

[1] 龚清. 浅谈油菜栽培技术与提高种植效益的措施[J]. 山西农经,2017(7):62-70.

[2] 徐小伟. 油菜主要病虫害发生特点及综合防治策略[J]. 安徽农学通报,2017,23(12):74-82.

[3] 杨萍,左小义,刘庭云,等. 不同生育阶段施肥对比对油菜农艺性状及产量的影响[J]. 农业与技术,2017,37(12):73-74.

[4] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响[J]. 作物学报,2009,35(1):87-92.

[5] 黎红亮,杨洋,陈志鹏,等. 花生和油菜对重金属的积累及其成品油的安全性[J]. 环境工程学报,2015,9(5):2488-2494.

[6] 李东洁. 污泥及赤泥农用对油菜生长、品质及土壤环境的影响[D]. 保定:河北农业大学,2013.

[7] 任英亚. 醋糟堆肥对低肥力土壤理化性质及油菜品质的影响[D]. 太原:山西大学,2016.

[8] 李晓莉. 沼液对石灰性土壤理化性质及油菜产量的影响研究[D]. 晋中:山西农业大学,2014.

[9] 张然,程红艳,吴梦欣,等. 不同处理菌糠对油菜生长及土壤理化性质的影响[J]. 吉林农业,2017(4):76-79.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,1995.

[11] 中华人民共和国农业部. 绿色食品产地环境技术条件:NY/T 391—2000[S].

[12] 国家环境保护局,国家技术监督局. 土壤环境质量标准:GB 15618—1995[S].

[13] 颜秋晓,何腾兵,高安勤,等. 不同种植年限下山银花产地土壤及花蕾重金属污染特征[J]. 水土保持研究,2015,22(1):310-315,328.

[14] 潘琼,潘峰. 湖南省冶矿城市土壤重金属污染现状及评估[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):405-410.

[15] 陶俊. 三峡库区不同护坡草本根系分布对土壤理化性质的时间尺度效应[D]. 重庆:西南大学,2013.

[16] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2010.

[17] 刘志光. 土壤氧化还原电位的研究及其应用[J]. 土壤学进展,1983(4):1-10.

[18] 朱书法,刘丛强,陶发祥,等. 喀斯特地区土壤有机质的稳定碳同位素地球化学特征[J]. 地球与环境,2006,34(3):51-58.