

有机肥连续施用对土壤剖面有机碳分布的影响及其与重金属的关系

王怡雯¹ 许浩¹ 茹淑华² 苏德纯^{1*}

(¹中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193; ²河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要 应用大田定位试验方法, 研究了连续 4 年施用不同类型有机肥后, 土壤剖面中有机碳和易氧化有机碳的分布特征, 并与相应的重金属含量进行了相关性分析。结果表明: 连续 4 年施用不同类型有机肥后, 土壤剖面中有机碳、易氧化有机碳主要累积在 0~15 cm 土层, 其含量随土层深度的增加而降低。施用高量鸡粪时, 有机碳可迁移到 15~30 cm 土层, 易氧化有机碳可迁移到 60~90 cm 土层; 施用猪粪和污泥时, 有机碳均未发生明显的迁移现象, 但高施用量处理下易氧化有机碳可迁移至 60~90 cm 土层。施用猪粪和污泥后, 土壤剖面各层中易氧化有机碳占总有机碳的比例显著增加, 且均高于施用鸡粪。施用不同有机肥后土壤剖面中有机碳、易氧化有机碳分布和 Cu、Zn、Cd 具有显著正相关。

关键词 有机肥; 土壤剖面; 有机碳; 易氧化有机碳; 重金属

Effects of continuous application of organic fertilizer on the distribution of organic carbon in soil profile and its relationship with heavy metals. WANG Yi-wen¹, XU Hao¹, RU Shu-hua², SU De-chun^{1*} (¹ Beijing Key Laboratory of Farmland Pollution Prevention-control and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ² Institute of Agro-resource and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China).

Abstract: A field positioning experiment was conducted to examine the distribution of organic carbon and easily oxidized organic carbon, and their correlation with the concentrations of heavy metals in soil profile after four years continuous application of three different kinds of organic fertilizers. The results showed that after applying organic fertilizers, organic carbon and easily oxidized carbon mainly accumulated in the 0–15 cm soil layer, and their concentrations decreased with increasing soil depth. When high amount of chicken manure was applied, organic carbon could migrate to the 15–30 cm soil layer, and easily oxidized organic carbon could migrate to the 60–90 cm soil layer. Organic carbon didn't significantly migrate when pig manure and sludge were applied, while easily oxidized organic carbon migrated to the 60–90 cm soil layer under high amount application of pig manure and sludge. The proportion of oxidized organic carbon to total organic carbon was much higher in the treatments of pig and sludge manure application as compared to chicken manure. There was a significant positive correlation between the distribution of organic carbon and easily oxidized organic carbon and Cu, Zn and Cd in the soil profile after application of different organic fertilizers.

Key words: organic fertilizer; soil profile; organic carbon; easily oxidized organic carbon; heavy metal.

我国是农业生产大国,有机肥料资源丰富,2016年我国畜禽粪便资源量约为6.5亿吨(冯小亮等,2017)。施用有机肥可以提高土壤中有机质含量,维持土壤中有机碳的平衡。有机肥的施用是土壤有机碳的重要来源之一。土壤活性有机碳常用易氧化有机碳、水溶性有机碳和颗粒有机碳等来表征,尽管活性有机碳占土壤总有机碳比例较小,但活性有机碳是土壤养分的驱动力且能够更直接指示土壤有机碳的稳定性和水溶性(张瑞等,2013;吴萍萍等,2015)。土壤中有机碳特别是水溶性有机碳的迁移会对周围水环境产生重要影响,还会影响土壤中重金属的迁移和生物有效性。花可可等(2013)研究表明,土壤中可溶性有机碳随径流从陆地向水体的迁移过程会对地表水和地下水产生影响,这不仅会加剧水环境污染,还会造成土壤有机碳库的损失。还有研究表明,施用有机肥易导致土壤可溶性有机碳淋失,增加了强降雨条件下可溶性有机碳向地下淋溶迁移的风险(李太魁等,2016)。另外,施用有机肥也会向土壤带入大量重金属元素。土壤中有机碳尤其是活性有机碳可以作为重金属的有机配体,从而对重金属的迁移产生影响(柳敏等,2006)。施用有机肥后有机碳与重金属的相互作用对土壤中重金属的生物有效性有两个相反的影响。一方面,有机肥中含有高含量的有机碳,有机碳会通过络合、螯合等反应固定重金属,进而降低重金属的生物活性,减少重金属被作物吸收,降低对生态系统的威胁(吴清清等,2010;李雅娟等,2012;季一诺等,2016)。施用有机肥后有机碳增加了土壤吸附的面积,进而降低重金属的生物毒性(Trenfield *et al.*, 2011;郑顺安等,2013)。另一方面,由于有机肥本身携带重金属,而且有机物腐解过程对土壤结合态重金属具有活化效应(吴清清等,2010),提高了重金属在土壤中的移动性。陈同斌等(2002)研究发现,施用有机肥会给土壤带入大量水溶性有机质,活性有机碳对镉吸附的抑制作用更强,进而提高了镉的生物有效性。

表1 供试土壤、肥料的基础理化性质和重金属含量

Table 1 Physicochemical property and heavy metal contents of tested soil and manures

项目	pH	有机质 ($g \cdot kg^{-1}$)	重金属含量($mg \cdot kg^{-1}$)					
			Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As
供试土壤	7.20	18.1	22.9	68	30.0	0.15	67.4	10.50
鸡粪	7.10	313.0	107.0	4485	145.0	2.53	505.0	6.71
猪粪	8.60	318.0	236.0	522	25.1	3.48	61.6	16.30
污泥	6.62	346.0	162.0	4216	77.3	3.32	188.0	12.30
有机肥标准(NY 525—2012)	5.5~8.5	≥ 45	-	-	≤ 50	≤ 3	≤ 150	≤ 15

本研究通过连续4年的田间试验,系统分析连续施用不同类型有机肥后有机碳和易氧化有机碳在土壤剖面中的分布和迁移特征,以及连续施用不同有机肥后土壤剖面中有机碳、易氧化有机碳与重金属元素分布的关系,旨在为有机肥安全合理施用、减少有机肥施用对环境的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与肥料

供试土壤:田间试验地位于河北农科院大河试验站试验田,地理位置为 $38^{\circ}07'32''N$, $114^{\circ}23'00''E$ 。母质:洪冲积物;土壤类型:黏壤质洪冲积石灰性褐土。

供试肥料:本试验中施用的肥料包括鸡粪、猪粪和污泥3种。鸡粪选用河北某有机肥厂生产的成品有机肥;猪粪为有机肥厂生产的半成品有机肥;污泥为河北某污水处理厂的污泥,将污泥加入一定比例的秸秆,发酵后制成。为了控制施肥方式一致,所有肥料采用一次性基肥施用(张田等,2017)。

供试土壤、肥料的基础理化性质和重金属含量见表1。

1.2 试验设计

本试验共设置4个处理,包括1个常规(仅施化肥)对照处理(CK)和3种有机肥处理:猪粪(Z)、鸡粪(J)和污泥(W)。每种有机肥设4个用量水平:15、30、45和 $60 t \cdot hm^{-2}$,共13个处理,每个处理设3次重复,共39个试验小区。每个小区面积为 $3 m \times 4 m = 12 m^2$,各小区随机排列。小区南北向用田埂隔开,东西向用塑料板隔开。田间管理方式参照当地。施肥后与耕层土壤(0~15 cm)用小型悬耕机充分混匀。试验期4年,每年均按相同方法和用量施用肥料并种植小麦,小麦一年一熟,收获后不再种植其他作物。

1.3 样品采集和预处理

土壤样品在小麦成熟期采集,采用“S”型多点采样法。每个小区分别在土壤深度为0~15、15~

30、30~60 和 60~90 cm 4 个土层采样,每层取土壤 5 个样点,混匀为 1 个土壤样品。土样经自然风干后研磨,过 100 目尼龙筛,测定土壤有机碳、易氧化有机碳和土壤 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、As。

1.4 土壤有机碳、易氧化有机碳和重金属的测定
土壤有机碳采用重铬酸钾-外加加热法测定;易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化比色法测定,土壤重金属 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、As 全量采用微波消解,电感耦合等离子体质谱法测定,用土壤标样进行质量控制。

数据处理使用 Microsoft Office Excel 2016、Origin 8.0 软件绘图,使用 SAS 9.1.3 软件在 $P < 0.05$ 水平下对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 连续施用不同有机肥后土壤剖面中有机碳分布

从图 1a 可以看出,在 0~15 cm 土层中,施用不同用量的鸡粪均显著增加了土壤中有机碳的含量,并且随着施用量的增加,土壤中有机碳含量不断增加,4 个鸡粪用量处理下土壤有机碳含量与仅施化肥(CK)的对照分别增加了 25.1%、46.4%、66.9% 和 91.0%。在 15~30 cm 土层中有机碳含量为 7.90~9.06 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,施用 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 鸡粪后有机碳增加最为显著,其余处理下有机碳含量与对照相比变化均不显著。在 30~60 和 60~90 cm 土层中,与对照相比,4 个处理对有机碳含量均没有显著增加。图 1b 是连续 4 年施用不同用量猪粪后有机碳在土壤剖面中的分布状况。在 0~15 cm 土层中,30、45、60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的猪粪处理均显著增加了土壤剖面中的有机碳含量,且随着猪粪施用量的增加有机碳含量显著增加,与对照相比分别增加了 19.0%、27.4%、34.3%。在 15~30、30~60、60~90 cm 土层中,施用不同用量的猪粪后有机碳的含量分别为 7.68~9.71、4.66~5.03、4.87~5.48 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且 4 个用量的猪粪对土壤中有机碳含量的影响均不显著。图 1c 是连续 4 年施用不同用量污泥后有机碳在土壤剖面中的分布状况。在 0~15 cm 土层中,与对照相比,施用 4 个用量的污泥显著增加了土壤中有机碳的含量,且随着污泥用量的增加,土壤中有机碳含量显著增加,其中 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 污泥处理下土壤有机碳含量最高,与对照相比增加了 67.8%。在 15~30、30~60、60~90 cm 土层中,施用不同用量的污泥后土壤有机碳的含量分别为 7.83~9.33、4.68~5.01、4.70~5.31 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

且 4 个用量的污泥对土壤中有机碳含量均无显著影响。这表明连续 4 年施用不同量鸡粪、猪粪和污泥堆肥后,有机肥带入的有机碳主要积累在了 0~15 cm 的表层土壤中,除了施用 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的鸡粪处理有机碳可以迁移到 15~30 cm 土层外,施用猪粪和污泥有机碳均没有发生明显的向下迁移。

2.2 连续施用不同有机肥后土壤剖面中易氧化有机碳分布

从图 2a 可以看出,连续 4 年施用不同用量鸡粪后 0~15 cm 土层中的易氧化有机碳含量与对照相比均显著增加,在 4 个用量的鸡粪处理下,土壤易氧化有机碳与对照相比分别增加了 35.0%、66.4%、87.5% 和 95%。在 15~30 cm 土层中,施用最高量鸡粪后,土壤易氧化有机碳的含量与对照相比显著增加了 38.0%。在 30~60 cm 土层中,施用最高量鸡粪后土壤易氧化有机碳含量相比于对照显著增加了 1 倍,其余处理对易氧化有机碳均无显著影响。在 60~90 cm 土层中,施用 30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的鸡粪后土壤易氧化有机碳的含量达到 1.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与对照相比显著增加了 43.6%,其他用量处理后易氧化有机碳含量差异均不显著。图 2b 是连续 4 年施用不同用量猪粪后易氧化有机碳在土壤剖面中的分布状况。在 0~15 cm 土层中,用 15、30、45 和 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的猪粪处理下,土壤易氧化有机碳含量与对照相比分别显著增加了 70.4%、76.4%、112% 和 85.4%,不同用量之间差异不显著。在 15~30 cm 土层中,15、30、45 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 猪粪用量处理的易氧化有机碳含量也均显著增加,易氧化有机碳的含量为 2.36~2.85 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 30~60 和 60~90 cm 土层中,施用不同量的猪粪显著增加了易氧化有机碳的含量,且易氧化有机碳含量与对照相比分别增加了 83.6%~113% 和 48.7%~80.8%,但不同用量之间差异不显著。图 2c 是连续 4 年施用不同量污泥后易氧化有机碳在土壤剖面中的分布状况。在 0~15 和 15~30 cm 土层中,4 个用量的污泥均显著增加了土壤中易氧化有机碳的含量,与对照相比分别增加了 71.1%~131.8% 和 49.1%~91.8%。在 30~60 cm 土层中,施用量为 30 和 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个处理下易氧化有机碳含量显著增加,为 1.30 和 1.86 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在 15 和 45 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个处理下土壤中易氧化有机碳含量无显著变化。在 60~90 cm 土层中,30、45 和 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下易氧化有机碳含量显著增加,与对照相比分别增加了 65.4%、65.4% 和 80.8%,但不同处理间差异不显著。

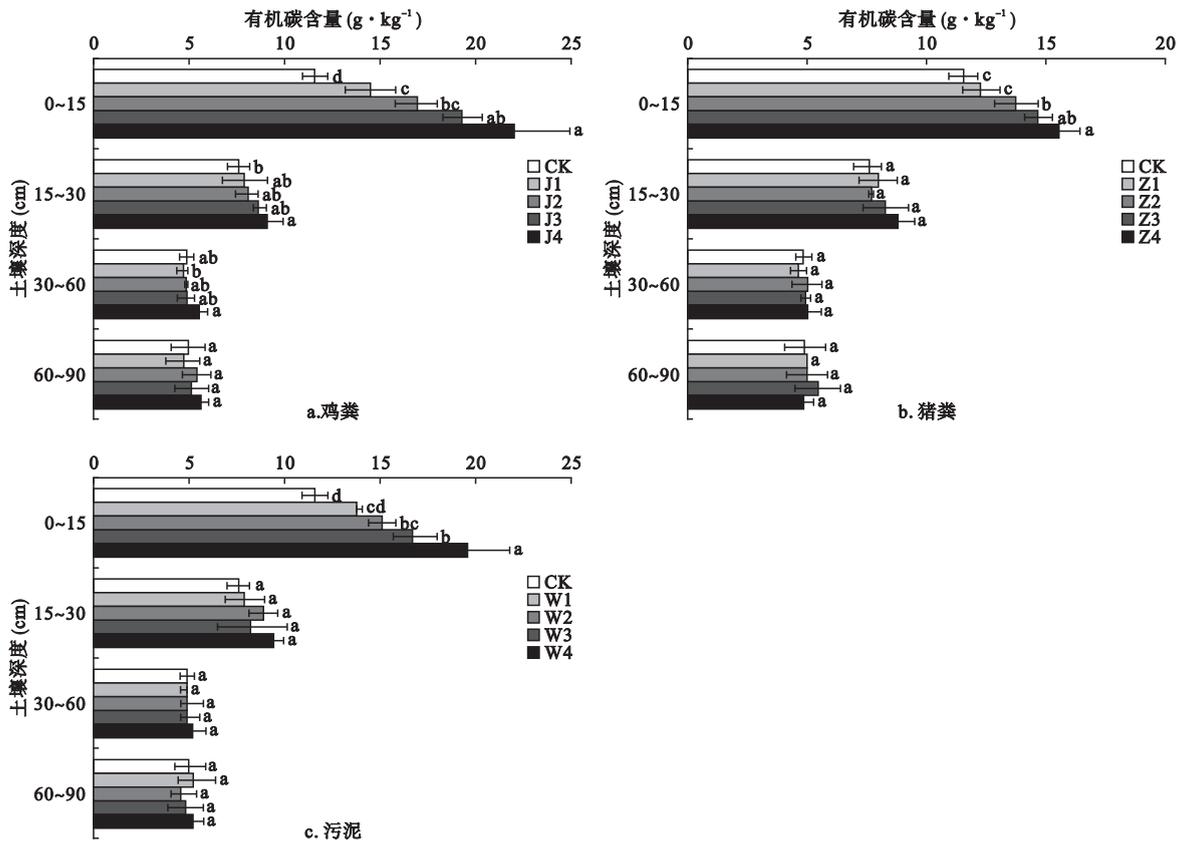


图 1 连续施用不同种类不同用量有机肥后有机碳在土壤剖面中的分布

Fig.1 Distribution of organic carbon in soil profile after the application of different amounts and different kinds of fertilizer

以上结果表明,连续 4 年施用不同种类有机肥后,土壤中易氧化有机碳含量虽然也随着土壤深度的增加逐渐降低,但高施用量条件下易氧化有机碳可以迁移到 60~90 cm 土层中,施用不同种类有机肥后有机碳和易氧化有机碳在土壤剖面中的迁移存在明显差异。由于易氧化有机碳作为土壤有机碳中最活跃的组分,稳定性差,移动较快,对施肥的反应更加敏感。因而对水体的潜在污染风险也更高。

不同有机肥的组成和 C/N 存在差异,在土壤中矿化速率也会不同。土壤易氧化有机碳占总有机碳的比例可以更好地反映土壤有机碳的活性以及不同施肥措施对土壤碳行为的影响(王朔林等,2015b),易氧化有机碳占总有机碳的比例增加,则说明施用有机肥增加了土壤中活性有机碳的含量,提高了养分有效性并能改善土壤有机碳的品质(王朔林等,2015b)。从表 2 可以看出,施用鸡粪后,在 0~15 cm 土层中,易氧化有机碳占有机碳的比例均高于对照,但各用量之间差异不显著。在 15~30 cm 的土层中,在高用量鸡粪处理下,易氧化有机碳占有机碳比

例与对照相比提高了 15%。在 30~60 cm 土层中,施用中高用量鸡粪后易氧化有机碳占有机碳的比

表 2 施用不同种类不同用量有机肥后土壤剖面中易氧化有机碳占总有机碳的比例 (%)

Table 2 Proportion of easily oxidized organic carbon to organic carbon in soil profile after the application of different amounts and different kinds of fertilizer

项目	0~15 cm	15~30 cm	30~60 cm	60~90 cm
CK	24.4±6.16 a	22.6±1.21 ab	12.6±4.40 b	15.7±1.92 bc
J1	25.9±4.25 a	14.3±4.28 c	19.8±6.14 ab	14.8±0.98 c
J2	27.6±5.03 a	21.2±2.57 ab	18.7±3.37 ab	20.8±0.75 a
J3	27.2±2.41 a	18.4±3.79 bc	19.8±6.47 ab	19.2±3.70 ab
J4	24.7±3.05 a	26.0±1.26 a	22.8±1.85 a	19.9±0.94 a
CK	24.4±6.16 b	22.6±1.21 b	12.6±4.40 b	15.7±1.92 b
Z1	39.0±5.17 a	35.6±1.85 a	27.9±1.97 a	27.9±1.29 a
Z2	35.7±8.34 a	35.3±5.01 a	22.2±2.66 a	27.4±3.90 a
Z3	40.5±3.81 a	30.0±2.91 ab	24.3±0.92 a	25.4±3.68 a
Z4	33.7±6.52 ab	27.1±6.68 b	22.8±5.86 a	23.7±2.85 a
CK	24.4±6.16 b	22.6±1.21 b	12.6±4.40 b	15.7±1.92 c
W1	36.9±2.31 a	32.8±1.94 a	27.6±3.75 ab	21.2±4.58 bc
W2	31.8±3.41 a	37.7±8.58 a	37.4±17.1 a	27.5±5.23 a
W3	34.4±0.27 a	30.8±2.73 ab	28.0±2.22 ab	27.0±5.25 ab
W4	33.5±4.66 a	30.3±4.04 ab	26.6±5.25 ab	27.3±1.39 a

同列不同字母表示同一土层不同处理间差异达到 5% 显著水平。

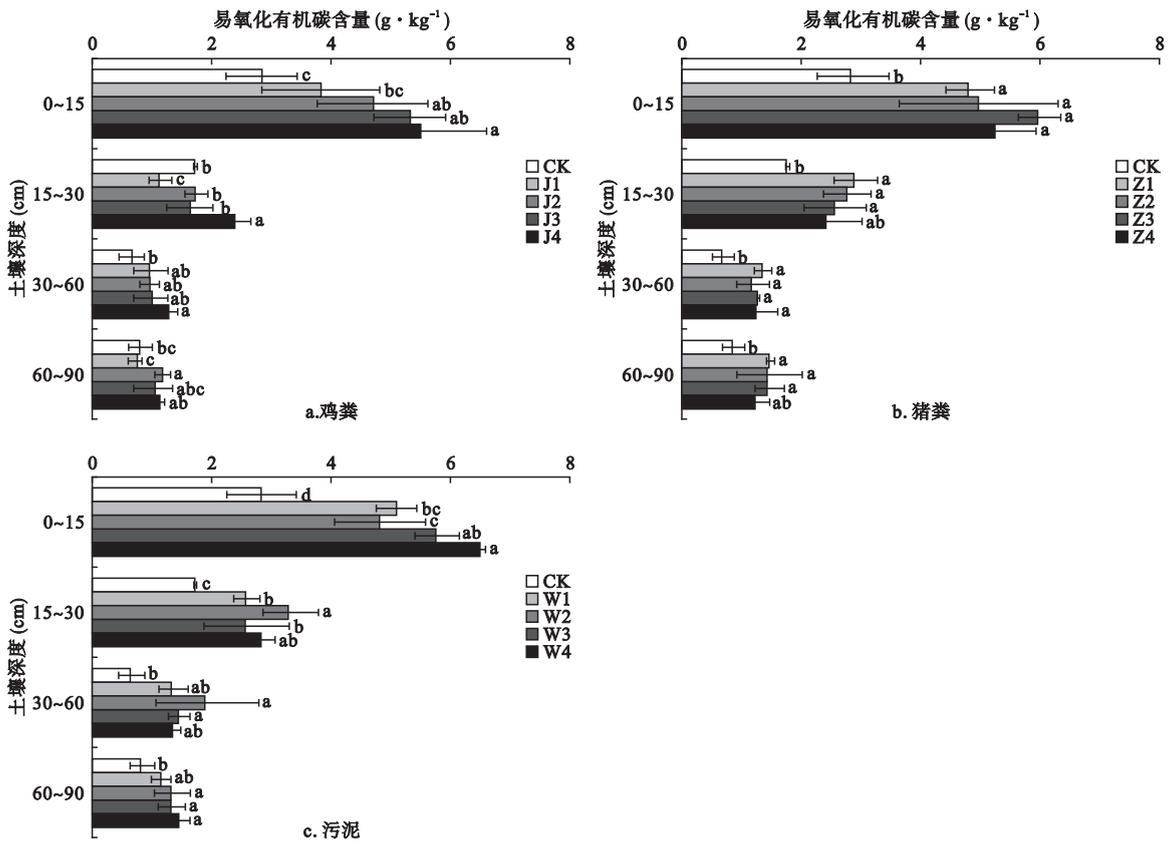


图2 连续施用不同种类不同用量有机肥后易氧化有机碳在土壤剖面中的分布

Fig.2 Distribution of easily oxidized organic carbon in soil profile after the application of different amounts and different kinds of fertilizer

例与对照相比增加了 6.1%~10.2%，其中 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下比例增加最显著。在 $60 \sim 90 \text{ cm}$ 土层中， $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 鸡粪处理下易氧化有机碳占有有机碳的比例增加最为显著，这说明在深层土壤易氧化有机碳增加的幅度大于有机碳增加的幅度。施用猪粪后，整个土壤剖面中易氧化有机碳占有有机碳的比例均增加。在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层中，施用不同用量的猪粪后易氧化有机碳占有有机碳的比例与对照相比增加了 9.30%~16.1%，但不同用量之间差异不显著。15~30 cm 土层中，施用 15、30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 用量的猪粪后易氧化有机碳占有有机碳的比例显著增加。在 30~90 cm 土层中，施用 4 个用量的猪粪后易氧化有机碳占有有机碳的比例均显著增加，但各用量间差异不显著。施用污泥后，整个土壤剖面中易氧化有机碳占有有机碳的比例也均增加，这说明施用污泥有机肥后同一土层中易氧化有机碳含量增加的幅度也大于有机碳含量增加的幅度。在 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 土层中，施用不同用量污泥后易氧化有机碳占有有机碳的比例与对照相比增加了 7.40%~12.5%，不同处理之间差异不显著。

在 15~30 cm 土层中各用量处理的易氧化有机碳占有有机碳的比例为 30.3%~37.7%。在 30~60 cm 土层中， $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 污泥处理下易氧化有机碳占有有机碳的比例显著增加，与对照相比增加了 197%，其余处理间差异并不显著。在 $60 \sim 90 \text{ cm}$ 土层中，30 和 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理易氧化有机碳占有有机碳比例显著增加，达到 27.5% 和 27.3%。本试验中，施用猪粪和污泥后土壤剖面中易氧化有机碳占有有机碳的比例大于施用鸡粪，表明施用猪粪、污泥后土壤剖面中活性有机碳增加量和向下迁移能力高于鸡粪。

2.3 土壤剖面中有机碳与重金属分布的相关性

本试验所用的 3 种有机肥与有机肥标准 (NY 525—2012) 相比，鸡粪有机肥中重金属 Pb 和 Cr 含量超标，猪粪有机肥中重金属 Cd 和 As 含量超标，污泥有机肥中重金属 Pb、Cd 和 Cr 含量超标。本试验所用有机肥中 Cu、Zn、Cd 等重金属含量显著高于土壤中的含量，有机肥施用是各层土壤中 Cu、Zn、Cd 增加的主要原因。从表 3 可以看出，连续 4 年施用鸡粪后，Cu、Zn、Cr、Cd、Pb 在土壤剖面中均与有机

表 3 施用不同种类不同用量有机肥后土壤剖面中 C 与重金属元素的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of C and heavy metals after the application of different amounts and different kinds of fertilizer

		Cu	Zn	Cr	As	Cd	Pb
鸡粪	有机碳	0.406 **	0.935 **	0.877 **	0.245	0.934 **	0.886 **
	易氧化有机碳	0.391 **	0.891 **	0.843 **	0.242	0.898 **	0.852 **
猪粪	有机碳	0.846 **	0.743 **	0.050	0.216	0.882 **	0.159
	易氧化有机碳	0.767 **	0.729 **	0.069	0.217	0.862 **	0.179
污泥	有机碳	0.658 **	0.926 **	0.075	0.209	0.939 **	0.567 **
	易氧化有机碳	0.649 **	0.917 **	0.062	0.184	0.929 **	0.547 **

$n=48$ 。* * 表示在 $P<0.01$ 条件下极显著。

碳和易氧化有机碳存在良好的相关性。其中, Cu、Zn、Cr、Cd、Pb 与有机碳和易氧化有机碳呈极显著正相关, 它们之间的相关性大小顺序为: Zn>Cd>Pb>Cr>Cu。这说明 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb 与有机碳和易氧化有机碳在土壤剖面分布与积累过程中有着较高的同步性, 各土层有机碳和易氧化有机碳含量增加时, Cu、Zn、Cr、Cd、Pb 的含量也会在一定程度上增加, 存在土壤剖面中共迁移特征。连续施用猪粪后, Cu、Zn、Cd 在土壤剖面中均与有机碳和易氧化有机碳呈极显著正相关, 而 Cr、As、Pb 与有机碳和易氧化有机碳没有显著的相关关系, 李金峰等(2016)的研究也有类似结果。这是由于猪粪中 Cr、As、Pb 含量低, 土壤剖面各土层中含量与之无关所致。而含量高的 Cu、Zn、Cd 则与有机碳和易氧化有机碳在土壤剖面分布与积累过程中表现出较高的同步性, 它们的含量随有机碳和易氧化有机碳含量的增加而增加, 表明它们具有同源性和共迁移性。通过连续 4 年施用污泥有机肥, Cu、Zn、Cd、Pb 在土壤剖面中均与有机碳和易氧化有机碳也呈极显著正相关, 4 种重金属元素的相关性大小顺序为: Cd>Zn>Cu>Pb, 而 Cr、As 与有机碳和易氧化有机碳没有显著相关关系。这说明 Cu、Zn、Cd、Pb 与有机碳和易氧化有机碳在土壤剖面分布与积累过程中表现出较高的同步性。其中, Zn、Cd 与有机碳和易氧化有机碳的相关系数均大于 0.900, 这说明在土壤剖面中 Zn、Cd 与有机碳和易氧化有机碳可能有相同的来源。施用不同有机肥后, As 与有机碳、易氧化有机碳均没有显著的相关关系, 这是由于 3 种有机肥中 As 含量均很低, 与有机碳和易氧化有机碳没有同源性和共迁移。

本试验中, 施用有机肥后, 由于土壤中有有机碳、易氧化有机碳和重金属 Cd、Cu、Zn 等存在共迁移, 而且易氧化有机碳的迁移会增加重金属的迁移, 因此施有机肥除要关注有机碳和易氧化有机碳迁移对环境的潜在影响外, 还要关注有机碳特别是易氧化

有机碳迁移引起的重金属迁移对环境的影响。

3 讨论

向土壤中施加有机肥直接增加了碳的投入, 改变了可以被微生物利用的碳源和氮源以及微生物的活性, 进而影响土壤中有有机碳的转化与固定(龙攀等, 2015)。在本试验条件下, 连续 4 年施用不同量的鸡粪、猪粪、污泥 3 种有机肥后, 有机碳、易氧化有机碳主要积累在土壤表层, 随着土壤深度的增加, 有机碳、易氧化有机碳含量逐渐降低, 且各处理之间的差异逐渐减小。这与 Song 等(2015)、周玲等(2013)、Kumar 等(2016)的研究结果一致。这是由于土壤表层接受有机肥, 有机碳来源丰富, 投入量大于分解量所致。赵玉皓等(2016)通过长期定位试验也发现, 施加有机肥与施加化肥相比, 显著地提高了表层土壤有机碳和易氧化有机碳的含量。

易氧化有机碳稳定性差、移动较快, 而且与有机碳相比, 易氧化有机碳对农业耕作措施等反应更加敏感, 相对于有机碳来说更易发生迁移(王朔林等, 2015a; 张洋等, 2015; 张雪等, 2016)。在本试验条件下, 连续施用不同有机肥后易氧化有机碳在土壤剖面中向下迁移明显, 施用高量的有机肥后, 易氧化有机碳可迁移至 60~90 cm 土层中。周玲等(2013)研究也表明, 长期施用有机肥能显著提高 0~60 cm 各土层中易氧化有机碳的含量。相对于土壤易氧化有机碳含量, 其占土壤总有机碳的比例可以更好地反映土壤有机碳的活性及长期施用有机肥对土壤碳行为的影响(张帅等, 2015)。张瑞等(2013)、吴萍萍等(2015)的研究表明, 长期施用有机肥显著提高易氧化有机碳含量和易氧化有机碳在总有机碳中的比例。本研究表明, 连续施用不同量猪粪、污泥后, 土壤各层中易氧化有机碳占有有机碳的比例均增加, 而且猪粪、污泥处理的土壤剖面中易氧化有机碳占有有机碳的比例均高于鸡粪处理, 说明猪粪、污泥中的易

氧化有机碳迁移能力高于鸡粪。研究表明,集水区中有机碳的含量受降雨量和周围土壤中有机碳等影响(Evans *et al.*, 2005)。近年来河流中活性有机碳含量也呈明显升高趋势(Freeman *et al.*, 2004)。土壤剖面中的易氧化有机碳会随径流迁移到水体当中(李玲等, 2012),在迁移过程中还会与农药、重金属等发生吸附、络合反应,对水体造成潜在的污染风险(李太魁等, 2012),因此施用高量有机肥时应当引起关注。

土壤中重金属的行为会受到土壤 pH、有机质、CEC 等理化性质的影响,土壤有机碳含多种官能团能够吸附、络合重金属,进而影响重金属的迁移(毛志刚等, 2014; Ren *et al.*, 2015; 段德超等, 2016)。有研究发现,随着畜禽粪便施用量的增加,重金属 Cu、Zn 等含量在土壤剖面垂直分布中明显增加(王成贤, 2011)。Risikesh 等(2011)研究发现,长期施用畜禽粪便后土壤中不同重金属元素与有机碳之间表现出强烈的正相关关系。Wang(2008)等通过对徐州市某地的土壤进行分析,发现土壤中的有机碳对重金属的迁移有着重要的影响,且 Cu、Zn 与有机碳呈显著正相关关系。在本试验条件下,连续 4 年施用不同种类有机肥后,土壤剖面中 Cu、Zn、Cd 分布与易氧化有机碳分布呈极显著正相关。施用有机肥提高土壤剖面中易氧化有机碳含量的同时,也提高了土壤剖面中 Cu、Zn、Cd 的含量,这说明 Cu、Zn、Cd 可能与易氧化有机碳存在共迁移现象。

4 结 论

连续 4 年施用不同种类有机肥后,有机肥带入的有机碳主要积累在 0~15 cm 土层,但易氧化有机碳在土壤剖面中迁移明显,施用高量有机肥后易氧化有机碳可以迁移到 60~90 cm 土层。

连续 4 年施用不同量猪粪、污泥后,土壤剖面各层土壤中易氧化有机碳占有有机碳的比例均显著增加,且施用猪粪和污泥后土壤剖面中易氧化有机碳占有有机碳的比例均高于施用鸡粪。

连续 4 年施用不同种类有机肥后,土壤剖面中有机碳、易氧化有机碳与土壤剖面中 Cu、Zn、Cd 含量存在显著正相关关系。

参考文献

陈同斌, 陈志军. 2002. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响. 应用生态学报, **13**(2): 183-186.

- 段德超, 戴露莹, 徐 劼, 等. 2016. 某冶炼厂周边土壤碳组分与铜形态的相关性. 环境科学学报, **36**(8): 3027-3032.
- 冯小亮, 刘秀秀, 吕东波. 2017. 农业发展中的有机肥利用现状及问题. 农业与技术, **37**(22): 2-3.
- 黑 亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 2007. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应. 环境科学, **28**(4): 852-858.
- 花可可, 朱 波, 王小国. 2013. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征. 农业工程学报, **29**(5): 81-88.
- 季一诺, 赵志忠, 吴 丹, 等. 2016. 海南东寨港红树林沉积物中重金属的分布及其生物有效性. 应用生态学报, **27**(2): 593-600.
- 李 玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 2012. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用. 应用生态学报, **23**(5): 1407-1414.
- 李金峰, 聂兆君, 赵 鹏, 等. 2016. 畜禽粪便配施对冬小麦产量及 Cu、Zn、As 在植株累积和土壤中垂直分布的影响. 江苏农业科学, **44**(4): 137-140.
- 李太魁, 王小国, 朱 波. 2012. 紫色土可溶性有机碳的吸附-解吸特征. 农业环境科学学报, **31**(4): 721-727.
- 李太魁, 杨小林, 寇长林, 等. 2016. 可溶性有机碳在紫色土中的吸附及影响因素分析. 生态环境学报, **25**(11): 1836-1841.
- 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 等. 2012. 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价. 环境科学, **33**(7): 2368-2375.
- 柳 敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 2006. 土壤活性有机碳. 生态学杂志, **25**(11): 1412-1417.
- 龙 攀, 隋 鹏, 高旺盛, 等. 2015. 不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响. 中国农业大学学报, **20**(3): 153-160.
- 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 2014. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 环境科学, **35**(1): 186-193.
- 王成贤, 石德智, 沈超峰, 等. 2011. 畜禽粪便污染负荷及风险评估——以杭州市为例. 环境科学学报, **31**(11): 2562-2569.
- 王朔林, 王改兰, 赵 旭, 等. 2015a. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响. 植物营养与肥料学报, **21**(1): 104-111.
- 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 2015b. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响. 生态学杂志, **34**(5): 1223-1228.
- 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 2015. 白土活性有机碳组分对不同施肥措施的响应. 生态学杂志, **34**(12): 3474-3479.
- 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 2010. 鸡粪和垃圾有机肥对苜蓿菜生长及土壤重金属积累的影响. 农业环境科学学报, **29**(7): 1302-1309.
- 张 瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 2013. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响. 环境科学, **34**(1): 277-282.
- 张 帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 2015. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响. 环境科学, **36**(2): 661-668.
- 张 田, 许 浩, 茹淑华, 等. 2017. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异. 环境科学,

- 38(12): 5247–5255.
- 张雪, 韩士杰, 王树起, 等. 2016. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化. 生态学杂志, **35**(2): 282–289.
- 张洋, 刘月娇, 倪九派, 等. 2015. 柑橘/大球盖菇间作对三峡库区紫色土活性有机碳库的影响. 草业学报, **24**(5): 53–65.
- 赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 2016. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分. 生态学杂志, **35**(7): 1826–1833.
- 郑顺安, 陈春, 郑向群, 等. 2013. 污染土壤不同粒级团聚体中铅的富集特征及其与叶类蔬菜铅吸收之间的相关性. 农业环境科学学报, **32**(3): 556–564.
- 周玲, 张世熔, 李婷, 等. 2013. 基于灰渣和猪粪制造的有机无机复混肥对土壤易变性有机碳的影响. 农业环境科学学报, **32**(11): 2231–2238.
- Evans CD, Monteith DT, Cooper DM. 2005. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution*, **137**: 55–71.
- Freeman C, Fenner N, Ostle NJ, *et al.* 2004. Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. *Nature*, **430**: 195–198.
- Kumar SA, Sudhir K. 2016. Distribution of organic carbon in particle size fractions of a red soil under long-term fertilization. *Asian Journal of Soil Science*, **11**: 90–94.
- Ren Z, Tella M, Bravin MN, *et al.* 2015. Effect of dissolved organic matter composition on metal speciation in soil solutions. *Chemical Geology*, **398**: 61–69.
- Risikesh T, Kauraw DL, Muneshwar S. 2011. Profile distribution of micronutrient cations in a Vertisol as influenced by long-term application of manure and fertilizers. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, **59**: 239–244.
- Song ZW, Zhu P, Gao HJ, *et al.* 2015. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon content and aggregate composition under continuous maize cropping in Northeast China. *Journal of Agricultural Science*, **153**: 236–244.
- Trenfield MA, McDonald S, Kovacs K, *et al.* 2011. Dissolved organic carbon reduces uranium bioavailability and toxicity. 1. Characterization of an aquatic fulvic acid and its complexation with uranium[VI]. *Environmental Science & Technology*, **45**: 3075–3081.
- Wang XS. 2008. Correlations between heavy metals and organic carbon extracted by dry oxidation procedure in urban roadside soils. *Environmental Geology*, **54**: 269–273.
-
- 作者简介 王怡雯, 女, 1994年生, 硕士研究生, 从事土壤污染控制与修复研究。E-mail: 834657914@qq.com
- 责任编辑 魏中青
-