

蚯蚓密度与土壤化学肥力主要参数之间的定量关系

马倩¹, 刁霏霏², 杜鑫², 陈日远¹, 林启美^{2*}, 赵小蓉², 李贵桐²

(1. 北京嘉博文生物科技有限公司, 北京市有机废弃物资源化工程技术研究中心, 北京 100015;

2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要: 为研究蚯蚓密度与土壤化学肥力主要参数之间的定量关系, 利用数据分析蚯蚓密度与 pH 值、电导率 (EC)、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、有效钾、有效钙、有效镁及阳离子交换量 (CEC) 之间的定量关系。结果显示, 蚯蚓密度与 pH 值呈极显著的负相关关系 ($P < 0.001$), 与有机质、全氮和全磷含量呈极显著的正相关关系 ($P < 0.002$), 与其他指标的相关性比较弱。研究表明, 根据这种关系可以将蚯蚓密度与土壤化学肥力主要指标的定量关系分为 5 个等级, 可为准确地评价蚯蚓对土壤化学肥力的影响提供参考。

关键词: 土壤; 蚯蚓; pH; EC; CEC; 有机质; 矿质养分

土壤化学肥力是指土壤肥力的所有化学要素, 常见的指标包括 pH 值、阳离子交换量 (CEC)、电导率 (EC)、有机质、全氮、有效氮、有效磷、速效钾等, 其中, 活性氢离子参与土壤几乎所有的化学及生物化学过程^[1]; 阳离子交换量直接反映土壤的保肥供肥性能, 取决于土壤胶体的种类和数量; 土壤有机质是土壤肥力的核心和“灵魂”, 不仅提供大量的氮、磷、硫等矿质营养元素, 而且也是矿质土粒团聚形成优良团聚体的黏结物质, 同时还是维持土壤微生物多样性和活性的基础; 土壤氮、磷、钾是作物矿质营养三要素, 其供给能力在很大程度上决定了作物的产量和品质。以上化学性状受到多种因素的影响, 其中蚯蚓是较为重要的影响因素之一^[2-4]。

蚯蚓是土壤中最常见的大型动物之一, 在土壤物质和能量循环转化过程中发挥了不可或缺的作用, 土壤中蚯蚓种群及其数量与土壤诸多化学性状存在着密切的联系。一方面蚯蚓活动改善土壤通气状况, 能够促进有机物的好氧分解^[5]; 另一方面蚯蚓摄食颗粒状有机物质, 通过分解有机物质获取能

量, 从而加快土壤碳、氮、磷等的循环转化^[6-7]。一般来说, 有机质含量越高, 土壤中蚯蚓密度就越大^[8-9]。蚯蚓能够吞食矿质土粒, 在蚯蚓肠道内矿物质分解加快, 其中的矿质养分被释放出来, 因此, 蚯蚓能够提高矿质养分的有效性, 具体表现在蚯蚓粪中含有十分丰富的矿质养分^[10-11]。王斌等^[12]报道, 接种蚯蚓可显著地提高土壤 pH 值, 并使其逐渐接近于中性, 同时也增强土壤的缓冲能力。

综上所述, 关于蚯蚓对土壤化学性状的影响已经有不少研究, 但土壤蚯蚓密度与土壤化学肥力主要参数之间的定量关系并不明确。本研究结合文献数据提取, 探寻土壤蚯蚓密度与土壤化学肥力主要参数之间的定量关系, 并建立基于土壤化学肥力评价的土壤中蚯蚓密度等级指标, 以期为准评价蚯蚓对土壤化学性状的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

通过知网和 Web of Science, 输入关键词 (蚯蚓、土壤、pH 值、EC、CEC、有机质、全氮、有效氮、有效磷、速效钾) 搜索, 提取表格中的相关数据, 并利用 GetData Graph Digitizer 2.24 提取图中的相关数据。其中, 蚯蚓数量采用手拣测定, 样方面积长 50 cm、宽 50 cm, 土层深度 20 cm, 计算单位面积蚯蚓密度 (条·m⁻²)。

分别于 2019 年夏季和 2020 年夏季在山东省栖霞市苹果园, 云南省大理市喜洲古镇石榴、蓝

收稿日期: 2021-11-30; 录用日期: 2022-02-26

基金项目: 北京嘉博文生物科技有限责任公司项目“山东栖霞苹果园土壤蚯蚓指数”。

作者简介: 马倩 (1988-), 博士研究生, 从事有机废弃物资源化利用及土壤改良等研究工作。E-mail: maqian7766@126.com。

通讯作者: 林启美, E-mail: linqm@cau.edu.cn。

莓、苹果、梨、猕猴桃、车厘子果园,四川省成都市蒲江县猕猴桃和丑柑果园以及湖北省十堰市郧阳县橘子、桃子、蓝莓、葡萄、杨梅果园,根据果树类型、果园管理方法、土壤类型等,每个地区选取6个典型果园,每个果园选取3~5个采样点,测定土壤中蚯蚓密度,并采用《土壤农业化学分析方法》^[13]测定土壤pH值、有机质、全氮等相关化学性状指标。

1.2 数据处理与统计方法

文献提取的数据与本研究已经获得的数据结合,采用SPSS 25.0进行Pearson相关性分析。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓密度与土壤pH值的定量关系

总体来看,土壤pH值介于3.34~8.64之间,蚯蚓密度与pH值之间存在极显著的负相关关系(图1)($P<0.001$),其他研究者也获得相似的结果^[5]。但是,pH值<5和pH值>7.5的土壤,蚯蚓密度比较低;土壤pH值介于5~7.5之间,蚯蚓密度变异非常大,这意味着只要供给足够的有机物质,土壤中蚯蚓密度可达到比较高的水平,说明这种酸碱度的土壤适宜蚯蚓的生长繁殖^[14]。当然,蚯蚓也能够耐受较酸或较碱的环境,在比较酸或比较碱的土壤中,也能够发现一些类群的蚯蚓生长繁殖,如果食物充足,蚯蚓密度能够达到比较高的水平。这就是在pH值为3.69的土壤中,蚯蚓密度也能达到358条·m⁻²(图1)。一般来说,pH值从酸性或碱性向中性变化时,土壤中蚯蚓的数量会逐渐增加^[15]。但蚯蚓并不是完全被动地适应土壤酸碱环境,在一定范围内也能够影响土壤pH值。李艺

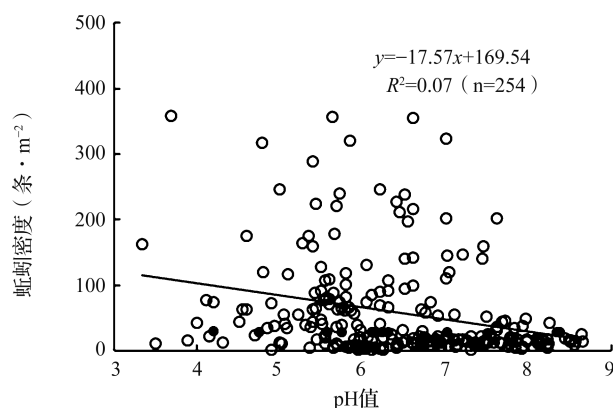


图1 土壤中蚯蚓密度与土壤pH值的关系

注:●数据来自本研究,○数据来自文献[7, 17-34]。

坚等^[16]报道,蚯蚓可提高土壤pH值1.57个单位,缓解土壤酸化,这可能是由于蚯蚓活化矿质养分,增加土壤钙、镁等碱土金属养分含量,从而提高土壤pH值。

2.2 蚯蚓密度与土壤EC之间的定量关系

蚯蚓密度与土壤EC(0.03~2.12 dS·m⁻¹)之间呈显著的正相关关系(图2)($P<0.05$),但是,当EC比较低(<0.1 dS·m⁻¹)或比较高(>1.5 dS·m⁻¹)时,土壤中蚯蚓密度均比较低,一般都小于20条·m⁻²。前者可能是由于土壤缺乏矿质养分;后者显然是由于土壤盐渍化所产生的危害,尽管蚯蚓喜欢矿质营养丰富的土壤,但盐分过多对蚯蚓也有毒害作用^[35]。由图2可知,在土壤EC为0.1~1.5 dS·m⁻¹时,如果食物充足,土壤中蚯蚓密度可达到比较高的水平。

土壤EC可指示土壤中矿质养分或营养盐的含量,大部分农作物适宜的土壤EC为0.4~1 dS·m⁻¹,蚯蚓也是如此。首先,土壤中的营养盐是蚯蚓生长繁殖必需的成分,蚯蚓吞食土粒不仅获取有机物质,同时也获得矿物质。因此,EC比较高的土壤,矿质养分比较丰富,有利于蚯蚓生长繁殖。其次,矿质养分含量丰富的土壤,植物生长繁茂,输入土壤的有机物质比较多,蚯蚓食物也比较多,蚯蚓密度也比较高。另外,蚯蚓活动也影响土壤EC。郑亚楠等^[36]报道,蚯蚓活动加快土壤水分蒸发,从而加剧了可溶性盐的积聚。也有一些研究结果显示,林下养殖蚯蚓可降低土壤的EC和pH值,减轻土壤盐渍化程度,提高土壤肥力^[37-39]。

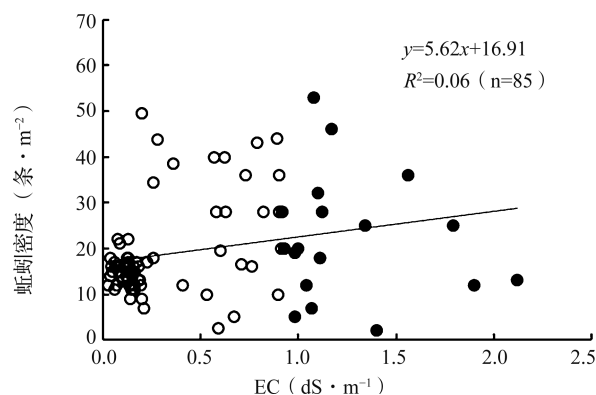


图2 土壤中蚯蚓密度与土壤EC的关系

注:●数据来自本研究,○数据来自文献[40-41]。

2.3 蚯蚓密度与土壤有机质含量的关系

蚯蚓密度与土壤有机质含量(0.03~87.92 g·kg⁻¹)呈极显著的正相关关系($P<0.001$)(图3),其他

一些研究者也获得了类似的研究结果^[5-6],随着土壤有机质含量的提高,蚯蚓密度几乎直线增加。总体来看,土壤有机质含量越高,蚯蚓密度就越大。但是同一有机质含量的土壤,蚯蚓密度差异明显。如本研究蚯蚓密度 $1 \sim 358$ 条 $\cdot$ m⁻²,变异系数115.57%,说明样本的蚯蚓密度差异非常大;土壤有机质 $0.03 \sim 87.92$ g $\cdot$ kg⁻¹,变异系数72.27%,比蚯蚓密度的变异系数小得多,这也体现出蚯蚓密度显著的变异性。尤其是当土壤有机质含量 >10 g $\cdot$ kg⁻¹时,蚯蚓密度的差异更大,说明有机质含量并非是蚯蚓生长繁殖的唯一限制因素,还有水分、温度等其他因素制约蚯蚓的生长繁殖。众所周知,蚯蚓通过吞食土粒获得食物,其中包括有机物

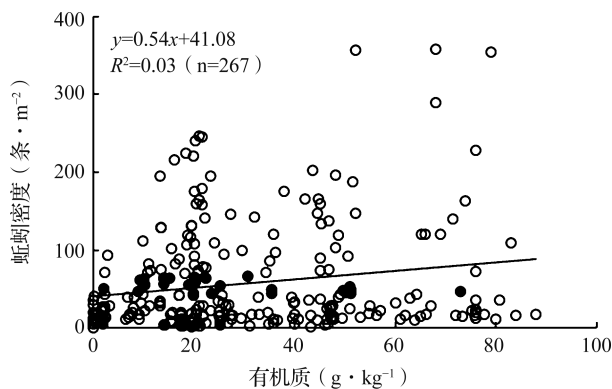


图3 土壤蚯蚓密度与土壤有机质的关系

注: ●数据来自本研究, ○数据来自文献[7, 16-24, 26-27, 29, 32-33, 39-40, 43-51]。

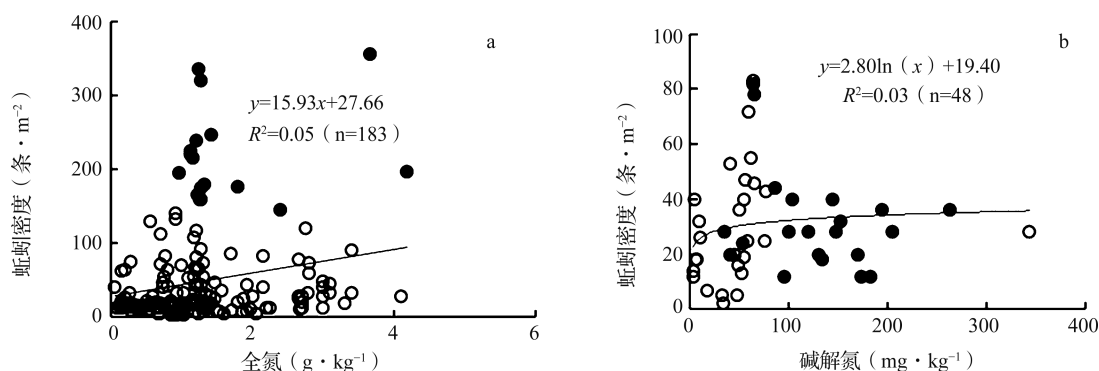


图4 土壤蚯蚓密度与土壤全氮及碱解氮的关系

注: ●数据来自本研究, ○数据来自文献[7, 16, 19-20, 22-24, 27-28, 31, 40, 44, 48, 50]。

2.5 蚯蚓密度与土壤全磷及有效磷含量的关系

蚯蚓密度与土壤全磷含量($0.02 \sim 1.50$ g $\cdot$ kg⁻¹)呈极显著的正相关关系(图5a)($P < 0.001$),但与土壤有效磷含量的相关性较弱($P < 0.10$)(图5b)。总体来看,蚯蚓密度随着土壤全磷和有效磷含量的提高而

增加,但是当有效磷含量 >150 mg $\cdot$ kg⁻¹,蚯蚓密度比较低。土壤全磷和有效磷含量取决于成土母质、施肥、植被等多种因素,尤其是土壤有效磷含量在很大程度上取决于磷肥的施用量,长期大量施用磷肥,导致磷素累积、土壤有效磷含量很高,如我国一些菜田

2.4 蚯蚓密度与土壤全氮及碱解氮含量的关系

蚯蚓密度与土壤全氮含量($0.96 \sim 4.19$ g $\cdot$ kg⁻¹)呈极显著的正相关关系(图4a)($P < 0.002$),而与碱解氮含量没有显著的相关性($P < 0.50$)(图4b)。张玉峰等^[52]也报道蚯蚓密度与全氮含量呈显著的正相关关系。在全氮含量 $0 \sim 1.5$ g $\cdot$ kg⁻¹、碱解氮含量 $0 \sim 70$ mg $\cdot$ kg⁻¹范围内,随着其含量的提高,蚯蚓密度几乎直线增加,但超过 70 mg $\cdot$ kg⁻¹,蚯蚓密度逐渐降低。当土壤全氮含量为 $1 \sim 2$ g $\cdot$ kg⁻¹、碱解氮含量为 $50 \sim 100$ mg $\cdot$ kg⁻¹时,土壤中蚯蚓密度变化非常大,可以达到非常高的密度,也可能很低,这说明除了氮素之外,还有其他因素影响蚯蚓的生长繁殖。显然,蚯蚓密度与土壤全氮及碱解氮含量的关系十分复杂。氮是蛋白质成分,是蚯蚓必需的营养元素,但是,氮素过多也不利于蚯蚓生长繁殖,这可能与矿质氮如铵过多对蚯蚓的伤害有关^[53]。蚯蚓粪的氮素含量比较高,蚯蚓多,蚯蚓粪也多,土壤全氮和碱解氮含量都比较高^[10, 54]。蚯蚓可促进固氮菌的固氮作用,促进有机氮矿化,提高全氮和碱解氮含量^[55-56];而蚯蚓也能够增强反硝化脱氮作用,从而降低土壤有效氮含量^[57-58]。因此,蚯蚓对土壤的氮素赋存状态具有一定的调节功能。

土壤的有效磷含量甚至超过 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [59]。众所周知, 磷也是蚯蚓生长繁殖必需的营养元素, 蚯蚓主要通过消化土壤中颗粒状有机物质获得磷素。一般来说, 土壤有机质与有机磷含量的变化一致, 有机质高的土壤, 有机磷含量也较高, 同时全磷和有效磷含量也较高, 且土壤比较肥沃, 蚯蚓的食物较

丰富, 蚯蚓密度可以达到比较高的水平。但是, 有效磷含量很高的土壤, 并不意味着有机质含量也比较高, 由于农业生产过度依赖化肥, 有机肥投入比较少, 土壤有机质含量极有可能比较低, 致使蚯蚓密度比较低。另外, 蚯蚓活动可加快有机磷矿化和无机磷溶解等活动 [60-62], 从而提高土壤有效磷含量 [63-64]。

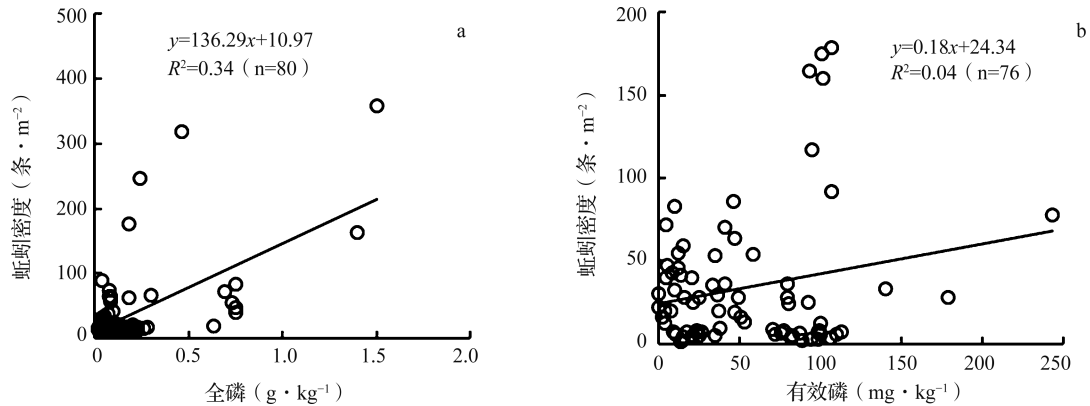


图5 土壤中蚯蚓密度与土壤全磷及有效磷的关系

注: ●数据来自本研究, ○数据来自文献 [17-18, 20, 26, 28, 31, 50]。

2.6 蚯蚓密度与土壤钾、钙、镁含量的关系

总体看来, 蚯蚓密度与土壤钾、钙、镁等矿物质营养元素含量的相关性非常微弱 (图6), 尽管

与土壤全钾含量 ($0.15 \sim 21.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 呈极显著的正相关关系 (图6a) ($P < 0.001$), 但实际上在很大程度上取决于6个样点的数值, 如果去掉这些样

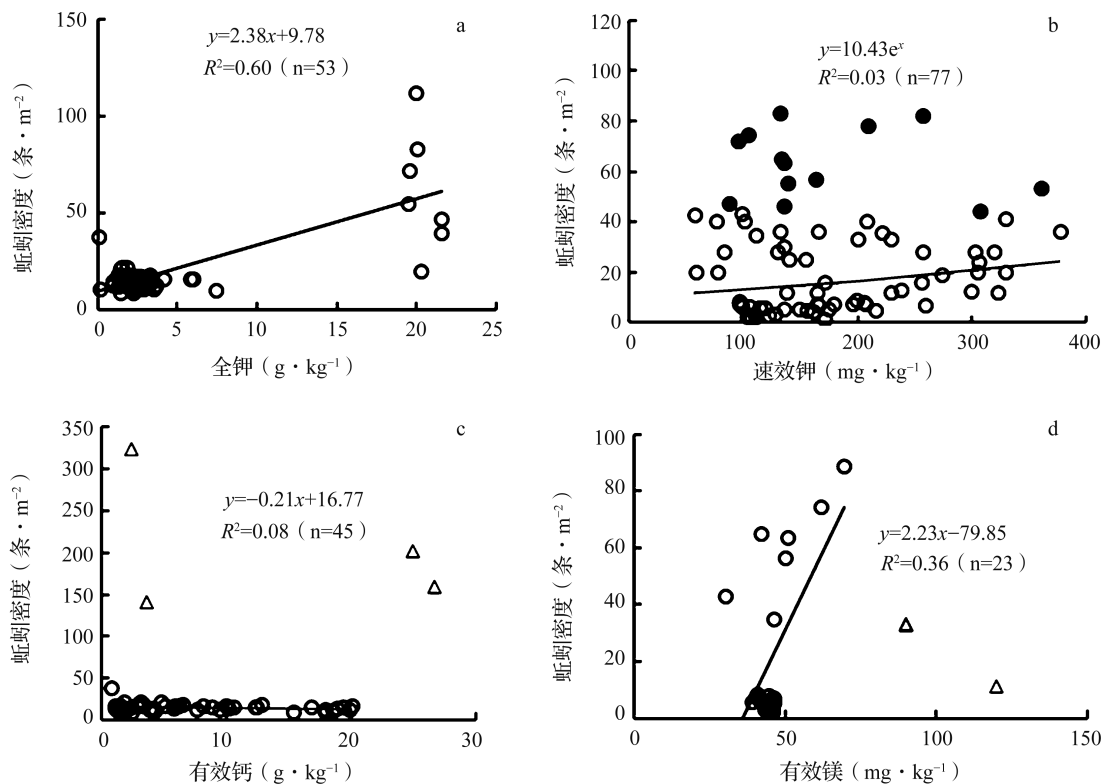


图6 蚯蚓密度与土壤全钾、速效钾、有效钙和有效镁含量的关系

注: ●数据来自本研究, ○数据来自文献 [17-18, 22-23, 26, 32], △数据为异常值。

本, 蚯蚓密度与土壤全钾含量没有显著的相关性; 与土壤有效钾的含量也没有显著的相关性。3 个样点强烈地影响蚯蚓密度与土壤有效镁含量的关系, 如果去掉这 3 个样点, 蚯蚓密度与有效镁呈极显著的正相关线性关系 ($P<0.005$), 随土壤有效镁含量的增加, 蚯蚓密度有所提高 (图 6d)。土壤钾、钙、镁等矿质营养元素含量主要取决于成土母质、质地及施肥等因素, 尽管钾、钙、镁是蚯蚓生长繁殖必需的矿质营养元素, 蚯蚓可通过表皮及肠道吸收, 但需要量并不大, 因此, 蚯蚓密度并不随着这些土壤矿质养分含量的增加而提高。但是, 也有研究发现, 土壤中蚯蚓密度与土壤溶液 Ca^{2+} 有关, Ca^{2+} 浓度越高, 蚯蚓数量越多^[65], 本研究也发现类似的趋势, 这可能反映出蚯蚓对钙的需要量比较大。另一方面, 蚯蚓吞食矿质土粒, 活化其中的矿质养分, 提高速效钾、钙、镁等矿质养分含量^[14], 但是这种影响的幅度可能很小, 很难发现它们之间存在定量的关系。

2.7 蚯蚓密度与土壤 CEC 的关系

蚯蚓密度与土壤 CEC 没有显著的相关性 ($P>0.5$) (图 7), 土壤 CEC 比较高和比较低的时候, 土壤蚯蚓密度均比较低; 只有当土壤 CEC 在 $15\text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右时, 蚯蚓密度差异比较大, 最高可达 $324\text{ 条} \cdot \text{m}^{-2}$, 这意味着此时如果有机物质供给充足, 蚯蚓密度可以达到比较高的水平。土壤 CEC 主要取决于土壤有机质及黏土矿物的种类和数量, 有机质含量越高, 2:1 型的黏土矿物越多, 土壤 CEC 就越高, 土壤也越肥

沃^[66-67]。显然, 有机质越多, 蚯蚓密度也越大。一方面, 蚯蚓通过影响土壤有机质矿化与腐殖质化作用, 从而影响土壤有机质组分及其含量, 进而影响土壤 CEC^[68]; 另一方面, 蚯蚓粪含有丰富的有机物质, CEC 比较高, 蚯蚓多, 蚯蚓粪也多, 土壤 CEC 也会提高^[10]。因此, 接种蚯蚓常常可提高土壤 CEC^[29]。但是, 如果土壤黏土矿物比较多, 可能并不利于蚯蚓的生长繁殖, 这可能是 CEC 比较高的土壤, 蚯蚓密度并不高的原因。蚯蚓密度与土壤 CEC 的关系取决于土壤 CEC 的来源与贡献, 如果主要来源于有机质, 二者之间应存在显著的正相关关系, 但如果源自黏土矿物, 则这种关系可能比较弱。

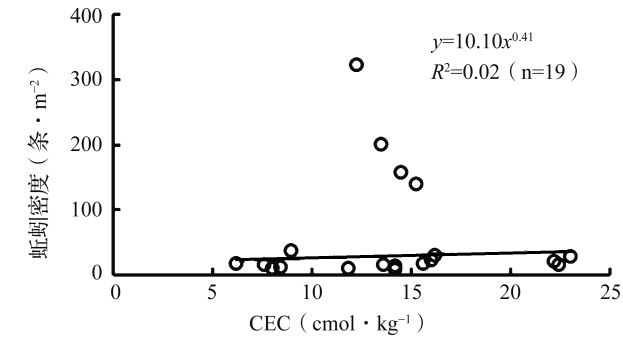


图 7 土壤中蚯蚓密度与土壤 CEC 的关系

注: ○数据来自文献 [22, 26, 28]。

2.8 蚯蚓密度与土壤化学肥力主要指标的关系

根据现有的单因子定量分析结果, 将蚯蚓密度与土壤化学肥力主要指标分为 5 个级别 (表 1)。

表 1 蚯蚓密度与土壤化学肥力主要指标的定量关系分级

指标	等级				
	1	2	3	4	5
蚯蚓密度 ($\text{条} \cdot \text{m}^{-2}$)	>99	99 ~ 71	70 ~ 41	40 ~ 11	<11
pH	6.0 ~ 7.0	5.0 ~ 5.9, 7.1 ~ 7.5	5.0 ~ 5.9, 7.1 ~ 7.5	5.0 ~ 5.9, 7.1 ~ 7.5	<5.0, >7.5
EC ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.8 ~ 1.2	0.1 ~ 0.7, 1.3 ~ 1.5	0.1 ~ 0.7, 1.3 ~ 1.5	0.1 ~ 0.7, 1.3 ~ 1.5	<0.1, >1.5
有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	>54	54 ~ 41	40 ~ 26	25 ~ 11	<11
全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.0 ~ 1.5	0.5 ~ 0.9, 1.6 ~ 2.0	0.5 ~ 0.9, 1.6 ~ 2.0	0.5 ~ 0.9, 1.6 ~ 2.0	<0.5, >2.0
碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	60 ~ 80	0 ~ 59, 81 ~ 100	0 ~ 59, 81 ~ 100	0 ~ 59, 81 ~ 100	>100
全磷 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	>1.00	1.00 ~ 0.61	0.60 ~ 0.31	0.30 ~ 0.11	<0.11
有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	90 ~ 120	2 ~ 89, 121 ~ 150	2 ~ 89, 121 ~ 150	2 ~ 89, 121 ~ 150	<2, >150

续表

指标	等级				
	1	2	3	4	5
全钾 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	>19	19 ~ 15	14 ~ 8	7 ~ 2	<2
速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	100 ~ 250	0 ~ 99, >250	0 ~ 99, >250	0 ~ 99, >250	0 ~ 99, >250
有效镁 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	50 ~ 80	<50	<50	<50	>80
CEC ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	12 ~ 15	<12, >15	<12, >15	<12, >15	<12, >15

3 结论

本研究显示, 蚯蚓密度与土壤化学肥力主要参数之间存在复杂的关系, 土壤 pH 值 (3.34 ~ 8.64)、EC ($0.03 \sim 2.12 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$)、有机质 ($0.03 \sim 87.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全氮 ($0.96 \sim 4.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全磷 ($0.02 \sim 1.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全钾 ($0.15 \sim 21.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 含量在一定范围时, 蚯蚓密度与其均呈极显著相关, 说明一定范围的土壤化学肥力适宜蚯蚓生长繁殖, 超过某一界限后则不再适宜。但是, 由于缺乏完整的数据, 无法进行多元因素分析探索各个因子对蚯蚓密度的关系和重要性。根据现有的单因子定量分析结果, 可以将蚯蚓密度与土壤化学肥力主要指标分为 5 个级别 (表 1)。显然, 这种分级具有片面性, 缺乏充足的理论依据, 还需要进行深入而广泛的研究。

参考文献:

[1] 吕贻忠, 李保国. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006, 353.

[2] Fründ H C, Graefe U, Tischer S. Earthworms as bioindicators of soil quality [J]. In Biology of Earthworms. Edited by Karaca A. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 24: 261-278.

[3] Fusaro S, Gavinelli F, Lazzarini F, et al. Soil biological quality index based on earthworms (QBS-e). A new way to use earthworms as bioindicators in agroecosystems [J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 1276-1292.

[4] Nadolny H, Santos A, Demetrio W, et al. Recommendations for assessing earthworm populations in Brazilian ecosystems [J]. Soil Science, 2020, 55: e01006.

[5] Yatso K N, Lilleskov E A. Effects of tree leaf litter, deer fecal pellets, and soil properties on growth of an introduced earthworm (*Lumbricus terrestris*): implications for invasion dynamics [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 94: 181-190.

[6] Ferlian O, Thakur M P, Castaneda-Gonzalez A, et al. Soil chemistry turned upside down: a meta-analysis of invasive earthworm effects on soil chemical properties [J]. Ecology, 2020, 101 (3): e02936.

[7] Guéi A M, N'Dri J K, Zro F G B, et al. Relationships between soil morpho-chemical parameters and earthworm community attributes

in tropical agro-ecosystems in the Centre-West region of Côte d'Ivoire, Africa [J]. Tropical Ecology, 2019, 60: 209-218.

[8] 张宁, 廖燕, 孙福来, 等. 不同土地利用方式下的蚯蚓种群特征及其与土壤生物肥力的关系 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (2): 364-372.

[9] Huang W, González G, Zou X M. Earthworm abundance and functional group diversity regulate plant litter decay and soil organic carbon level: a global meta-analysis [J]. Applied Soil Ecology, 2020, 150: 103473.

[10] Lim S L, Wu T Y, Lim P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics [J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 2015, 95 (6): 1143-1156.

[11] van Groenigen J M, van Groenigen K J, Koopmans G F, et al. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis [J]. Geoderma, 2019, 338: 528-535.

[12] 王斌, 李根, 陈欢, 等. 蚯蚓作用下土壤化学组成和性状的动态变化 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (3): 273-277.

[13] 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.

[14] Curry J P, Schmidt O. The feeding ecology of earthworms—a review [J]. Pedobiologia, 2020, 50 (6): 463-477.

[15] Singh S, Sharma A, Khajuria K, et al. Soil properties changes earthworm diversity indices in different agro-ecosystem [J]. BMC Ecology, 2020, 20 (1): 27.

[16] 李艺坚, 谢学方, 孔令泽, 等. 蚯蚓养殖对幼龄胶园土壤养分及橡胶树根系生长的影响 [J]. 热带作物学报, 2018, 39 (12): 2331-2335.

[17] d'Hose T, Coughnon M, Vlieghe A D, et al. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 75: 189-198.

[18] Feledyn-Szewczyk B, Radzikowski P, Stalenga J, et al. Comparison of the effect of perennial energy crops and arable crops on earthworm populations [J]. Agronomy, 2019, 9 (11): 675.

[19] García-Pérez J A, Alarcón-Gutiérrez E, Perroni Y, et al. Earthworm communities and soil properties in shaded coffee plantations with and without application of glyphosate [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 83: 230-237.

[20] Li J, Zhang Z, Wang H, et al. Urban land-use impacts on composition and spatiotemporal variations in abundance and

- biomass of earthworm community [J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31: 325–331.
- [21] López-Hernández D, Hernández L, Ojeda A, et al. Impact of land protection in soil quality properties and in earthworm biomass in Venezuelan savannas [J]. Journal of Soil Science & Plant Nutrition, 2014, 14 (4): 927–941.
- [22] Masin C, Rodríguez A R, Zalazar C, et al. Approach to assess agroecosystem anthropic disturbance: statistical monitoring based on earthworm populations and edaphic properties [J]. Ecological Indicators, 2020, 111 (2): 105984.
- [23] Nait-Kaci M B, Hedde M, Bourbia S M, et al. Hierarchization of factors driving soil macrofauna in North Algeria groves [J]. Biotechnology Agronomy Society & Environment, 2014, 18 (1): 11–18.
- [24] Nweke I A. Effect of compost and earthworm production on soil properties, growth and dry matter yield of maize in crude oil degraded soil [J]. Journal of Soil Science & Environmental Management, 2017, 8 (1): 1–10.
- [25] Radaei M, Izadi M. Response of earthworm's biomass and soil properties in different afforested type areas in the North Iran [J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2016, 5 (1): 47.
- [26] Rajkhowa D J, Bhattacharyya P N, Sarma A K, et al. Diversity and distribution of earthworms in different soil habitats of assam, North-East India, an Indo-Burma biodiversity hotspot [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2015, 85 (2): 389–396.
- [27] Ransom T S, Billak B J. Differences in soil characteristics between field and forest may influence the distribution of an invasive earthworm [J]. Invertebrate Biology, 2015, 134 (1): 78–87.
- [28] Rivest M, Whalen J K, Rivest D. Variation of soil microbial and earthworm communities along an agricultural transect with tree windbreak [J]. Agroforestry Systems, 2020, 94: 1639–1649.
- [29] Sankar A S, Patnaik A. Impact of soil physico-chemical properties on distribution of earthworm populations across different land use patterns in southern India [J]. The Journal of Basic and Applied Zoology, 2018, 79 (1): 50.
- [30] Schaik L V, Palm J, Klaus J, et al. Potential effects of tillage and field borders on within-field spatial distribution patterns of earthworms [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 228: 82–90.
- [31] Schorpp Q, Schrader S. Earthworm functional groups respond to the perennial energy cropping system of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) [J]. Biomass & Bioenergy, 2016, 87: 61–68.
- [32] Tondoh J E, Dimobe K, Guéi A M, et al. Soil health changes over a 25-year chronosequence from forest to plantations in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) landscapes in southern Côte d'Ivoire: Do earthworms play a role? [J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 23.
- [33] Varga J, Kanińska R, Spisiak J. Impact of land use and geological conditions on selected physical soil properties in relation to the earthworm abundance and biomass along an altitudinal gradient in Slovakia [J]. Soil Science Annual, 2018, 69 (3): 160–168.
- [34] Walsh C L, Johnson-Maynard J L. Earthworm distribution and density across a climatic gradient within the Inland Pacific Northwest cereal production region [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 104: 104–110.
- [35] Sánchez E G, Muñoz B, Garvín M H, et al. Ecological preferences of some earthworm species in southwest Spain [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29 (3–4): 313–316.
- [36] 郑亚楠, 支金虎, 刘海江, 等. 不同改良措施对沙化土壤水分、pH值和电导率的影响 [J]. 塔里木大学学报, 2020, 32 (3): 61–71.
- [37] 韩桂鸥, 李霞, 刘洪庆, 等. 林下养殖蚯蚓对盐碱地土壤和苗木生长的影响 [J]. 天津农业科学, 2016, 22 (4): 79–82.
- [38] 张翰林, 郭惠宝, 白娜玲, 等. 蚯蚓对连作与轮作西瓜土壤细菌群落、微生物量和酶活性的影响 [J]. 上海农业学报, 2020, 36 (6): 85–90.
- [39] 钞锦龙, 郝小梅, 胡磊, 等. 棚龄、灌溉方式对大棚土壤盐分及pH的影响 [J]. 山西农业科学, 2021, 49 (1): 59–63.
- [40] Kourtell G N, Kribaa M, Okki M. Interaction between soil physicochemical parameters and earthworm communities in irrigated areas with natural water and wastewaters [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2017, 2017 (5): 1–16.
- [41] Wu Y P, Zhang Y, Bi Y M, et al. Biodiversity in saline and non-saline soils along the Bohai sea coast, China [J]. Pedosphere, 2015, 25 (2): 307–315.
- [42] Lubbers I M, Pulleman M M, van Groenigen J W. Can earthworms simultaneously enhance decomposition and stabilization of plant residue carbon? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 105: 12–24.
- [43] Dekemati I, Imon B, Vinogradov S, et al. The effects of various tillage treatments on soil physical properties, earthworm abundance and crop yield in Hungary [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104334.
- [44] Giannitsopoulos M L, Burgess P J, Rickson J. Effects of conservation tillage drills on soil quality indicators in a wheat-oilseed rape rotation: organic carbon, earthworms and water-stable aggregates [J]. Soil Use and Management, 2020, 36 (1): 139–152.
- [45] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156 (156): 140–147.
- [46] Henneron L, Bernard L, Hedde M, et al. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35 (1): 168–181.
- [47] Laznik Z, Trdan S. Evaluation of different soil parameters and

- wild boar (*Sus scrofa* L.) grassland damage [J]. Italian Journal of Animal Science, 2014, 13 (4): 759–765.
- [48] Li N, Wang C, Li X, et al. Effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on preventing *Fusarium oxysporum* infection in the strawberry plant [J]. Plant and Soil, 2019, 443 (1): 139–153.
- [49] Woniak A, Gos M. Yield and quality of spring wheat and soil properties as affected by tillage system [J]. Plant Soil and Environment, 2014, 60 (4): 141–145.
- [50] Niswati A, Yusnaini S, Utomo M, et al. Long-term organic mulching and no-tillage practice increase population and biomass of earthworm in sugarcane plantation [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018, 215: 012034.
- [51] Zhu X, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 39–46.
- [52] 张玉峰, 伍玉鹏, 孙倩, 等. 山东半岛与辽东半岛蚯蚓生物多样性研究 [J]. 中国农业大学学报, 2014, 19 (4): 67–73.
- [53] 那立苹, 李宇婷, 何纪强, 等. 施氮后蚯蚓对植物吸氮及微生物固氮的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (2): 343–350.
- [54] Bedano J C, Vaquero F, Domínguez A, et al. Earthworms contribute to ecosystem process in no-till systems with high crop rotation intensity in Argentina [J]. Acta Oecologica, 2019, 98: 14–24.
- [55] 张衡, 朱永恒, 韩斐. 蚯蚓活动对铜尾矿废弃地土壤养分的影响 [J]. 水土保持通报, 2015, 35 (6): 178–181.
- [56] Orezek K, Zaluski D. Chemical properties of soil and occurrence of earthworms in response to soil compaction and different soil tillage in cereal [J]. Journal of Elementology, 2020, 25 (1): 153–168.
- [57] Chen C, Ejack L, Chenier M R, et al. Earthworm functional groups are related to denitrifier activity in riparian soils [J]. Pedosphere, 2021, 31 (3): 413–422.
- [58] Singh R, D'Alessio M, Jahangeer M, et al. Nitrogen removal in vermifiltration: mechanisms, influencing factors, and future research needs [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281: 111868.
- [59] 叶花, 魏荔, 赵小蓉, 等. 京郊典型农田土壤易流失氮素组分及含量特征与差异 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (5): 925–929.
- [60] Zarei M, Khosravi A. Effect of organic and inorganic additives on some chemical properties of vermicompost, earthworm's biomass and reproduction [J]. Iran Agricultural Research, 2018, 37 (2): 35–44.
- [61] Mupambwa H A, Mkeni P N S. Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (11): 10577–10595.
- [62] 王丹丹, 巫丽俊, 戴莹, 等. 蚯蚓对锌污染土壤养分状况及锌形态的影响 [J]. 土壤, 2013, 45 (6): 1048–1054.
- [63] 刘德辉, 胡峰, 胡佩. 蚯蚓活动对红壤磷素有效性的影响及其活化机理研究 [J]. 生态学报, 2003, 23 (11): 2299–2306.
- [64] 赵杰, 樊莉丽, 吴明作, 等. 养殖蚯蚓对黄泛沙质平原杨树人工林土壤及生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41 (4): 39–46.
- [65] Holland J E, Bennett A E, Newton A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610: 316–332.
- [66] Fu B, Chen L, Huang H Y, et al. Impacts of crop residues on soil health: a review [J]. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2021, 33 (1): 164–173.
- [67] Macias F, Camps-Arbestain M. A biogeochemical view of the world reference base soil classification system Homage to Ward Chesworth [J]. Advances in Agronomy, 2020, 160: 295–342.
- [68] 赵翔. 襄阳市农田土壤阳离子交换量的测定及分析 [J]. 环境与发展, 2016, 28 (1): 53–55.

The quantitative relationships between earthworm density and the major parameters of soil chemical fertility

MA Qian¹, DIAO Fei-fei², DU Xin², CHEN Ri-yuan¹, LIN Qi-mei^{2*}, ZHAO Xiao-rong², LI Gui-tong² (1. Beijing Goldenway Bio-tech Co. Ltd., Engineering Research Center for Recycling Organic Waste, Beijing 100015; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: In order to investigate the quantitative relationships between earthworm density and the major parameters such as pH, electrical conductivity (EC), organic matter, total nitrogen, alkali nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, available potassium, available Ca, available Mg and cation exchange capacity (CEC) were analyzed to establish the quantitative relationships between earthworm density and the collected data. It was found that earthworm density was significantly and negatively related with soil pH ($P < 0.001$), while significantly and positively related with organic matter and total nitrogen and phosphorus ($P < 0.002$). There were not significant relationships among earthworm density and other parameters. Five classes could be divided according to the relationships, which may be valuable for estimating the impacts of earthworm on soil chemical fertility.

Key words: soil; earthworm density; pH; EC; CEC; organic matter; mineral nutrients