

蚯蚓和微生物对土壤养分和重金属的影响

申为宝^{1,2}, 杨洪强^{1,3}

(¹山东农业大学园艺学院, 山东泰安 271018; ²山东省临沂市农业局, 山东临沂 276001; ³作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 蚯蚓和微生物是重要的土壤生物, 对提高土壤生态系统的稳定性和改变土壤养分及重金属的有效性有重要影响。本文综述了蚯蚓和微生物在改善土壤结构、调控土壤养分等方面的作用, 以及它们通过吸附、富集、沉淀、溶解、氧化还原等行为, 对重金属生物有效性产生的影响, 目的是为现代农业生产提供一定的理论依据。

关键词: 蚯蚓; 微生物; 养分; 重金属

Effects of Earthworm and Micro-organism on Soil Nutrient and Heavy Metal

SHEN Wei-bao^{1,2}, YANG Hong-qiang^{1,3}

(¹College of Horticulture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong; ²Linyi Agricultural Bureau, Linyi 276001, Shandong; ³State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, Shandong)

Abstract: Earthworm and micro-organism are very essential soil biotas. They play an important role in the stability of eco-system and the bio-availability of nutrient and heavy metals in soil. This article reviewed the function of the earthworm and the micro-organism in improving soil structure and controlling soil nutrients, as well as their effects on the bio-availability of heavy metals in soil via bio-sorption, enrichment, precipitation, dissolution and oxidation-reduction. The aim is to provide a certain theoretical basis for modern agricultural production.

Key words: Earthworm; Micro-organism; Nutrient; Heavy metal

0 引言

蚯蚓和微生物在土壤生态系统中发挥着重要的作用, 它们的存在提高了土壤容纳和供给生物所需的各种营养物质的能力^[1,2], 并能够影响重金属的有效性^[3]。但是, 长期以来, 由于人类对自然环境和资源的过度开发和强烈干预, 使得土壤中数以万计的物种消失或濒临灭绝, 生态系统稳定性减弱, 致使土壤系统出现了不同类型和不同程度的退化^[4], 特别是土壤与生物群落之间和谐共融的特性遭到破坏, 土壤质量和可持续生产的能力下降, 并且影响到农业的安全生产和人类健康。因此, 在研究土壤养分和重金属活性的过程中, 以土壤生物为中心, 把生物、土壤和环境作为一个有机功能整体, 进行系统内组成、结构及功能的研

究, 探讨系统内物流、能流和信息流的机制^[5], 促进土壤生物多样性的保护, 合理开发利用土壤生物资源, 这对现代农业具有更为重要的理论依据和现实意义。

1 蚯蚓和微生物对土壤养分的影响

1.1 蚯蚓对土壤养分状况的影响

蚯蚓是土壤中最常见的杂食性环节动物, 在土壤生态系统中具有重要的地位。一般根据生境类型及生态功能将它们分为表层种、内层种和深层种, 但3种生态类群界限不明显, 经常有一些过渡类型出现。蚯蚓通过影响土壤的物理、化学和生物学性质来影响土壤养分的循环和转化, 其影响程度受蚯蚓生态类群、种群大小、植被、母岩、气候、时间尺度以及土地利用历史的综合控制^[6]。在农田生态系统中, 大量的蚯

收稿日期: 2007-05-15; 接受日期: 2007-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (30671452)

作者简介: 申为宝 (1962-), 男, 山东日照人, 研究员, 博士研究生, 研究方向为果园土壤与果树生理。Tel: 0539-2700057; E-mail: gcxswb@126.com。通讯作者杨洪强 (1965-), 男, 山东泗水人, 教授, 研究方向为果树生理与果品安全。Tel: 0538-8249660; E-mail: hqyang@sdau.edu.cn

蚓是土壤高度肥沃的标志, 蚯蚓、土壤和种植物形成了一个相互作用的有机-无机复合整体。

1.1.1 改善土壤的结构, 增强土壤的保肥性能 Satchell^[7]报道蚯蚓是土壤结构的重要贡献者, 对土壤生态系统最大的影响是使土壤团聚化。Blanchart^[8]的田间试验表明, 巨蚯蚓 (*Megascolecidae*) 对热带草原结构破坏的土壤团聚体有显著恢复作用。未接种蚯蚓的处理中, 30 个月后, >2 mm 的大团聚体只占土壤的 12.9%; 而接种蚯蚓的处理, 6 个月后团聚体比例达到 31.7%, 30 个月后高达 60.6%, 并且蚯蚓形成的团聚体具有更高的水稳性。Edwards^[9]研究表明, 有机物料以及土壤经蚯蚓过腹后, 通过胶合作用将腐殖酸钙、植物残体或聚糖分子等胶合到一起, 形成蚯蚓粪, 而蚯蚓粪具有疏松、多孔、水稳性强、有效养分多的特点, 吸附和保肥性能良好, 并有较高的水稳性。Ketterings 等^[10]研究发现, 土壤经蚯蚓作用形成有机无机复合体, 使直径 >1 000 μm 的水稳性团聚体含量大大提高。Bossuyt^[11]同样认为, 蚯蚓活动将碳结合到稳定性更高的微团聚体中有利于对碳的长期保护, 随着老化团聚体稳定性增加, 土壤有机碳受到保护而不易分解, 提高了土壤有机质的难降解性, 对有机质的稳定性产生重要影响。同时, 蚯蚓活动的孔道充满了蚯蚓粪, 粪粒互相堆叠形成许多非毛管孔隙, 显著增强了土壤的通透能力, 改善了土壤的结构。

1.1.2 提高和稳定土壤养分元素的供应 Parkin 等^[12]报道, 蚯蚓能改变土壤的理化性质, 促进有机物的矿化, 稳定土壤养分的循环。Basker^[13]研究表明, 蚯蚓活动能提高土壤养分的有效性和养分周转率。蚯蚓作用后, 有机物的碳氮比逐渐降低, 有利于有机氮、磷、钾等养分转化为植物可利用态^[14], 缩短了养分供应的时间。大量研究证明, 经过蚯蚓“加工”过的土壤一般都具有更高的有机质、全氮、盐基交换能力, 更高含量的交换性钙、镁、钾及有效氮、磷等。Cortez 等^[15]研究提出, 蚯蚓活动大大提高了土壤中无机氮 (主要是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 的浓度; 而在秸秆还田稻麦轮作的农田接种蚯蚓后, 矿质氮, 硝态氮以及微生物量碳、氮含量均提高, 显示蚯蚓具有扩大土壤微生物量氮库和促进有机氮矿化的双重作用^[16]。蚯蚓活动由于提高了土壤的通透性, 提高了土壤的总渗透氮量, 可能造成氮的渗漏损失; 但土壤接种蚯蚓时, 秸秆表施处理虽然显著提高了土壤渗透氮量, 却并未造成肥料氮的渗漏损失^[17]。

1.1.3 通过新陈代谢活动直接向土壤中释放养分 蚯

蚓及其分泌物营养丰富, 可直接给土壤提高营养物质, 其中蚯蚓提取液 Mn 为 $1.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn 为 $3.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Ca 为 $1.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cu 为 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Mg 为 $35.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Fe 为 $7.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Na 为 $70.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、K 为 $328.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Se 为 $0.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等, 不过营养元素的种类和含量会随生长环境的不同而有所变化^[18]。Whalen 等^[19]研究表明, 蚯蚓体是一种活性很强的养分源, 蚯蚓死亡后, 4 d 内完全分解, 16 d 后 70% 的氮进入植物的茎和叶。蚯蚓通过新陈代谢活动可直接向土壤释放养分, Amador^[14]估计死亡蚯蚓释放的可利用态有机氮每年每公顷 21.1~38.6 t。

另外, 蚯蚓对植物残体的破碎作用, 可为原生动物的取食和微生物的进一步分解提供必要的条件。同时, 蚯蚓还与微生物之间存在着各种直接或间接的关系, 可通过改变微生物数量、群落结构和组成等方式, 以及促进代谢释放而与微生物共同对土壤氮、磷的循环和释放产生重要影响。Wolters^[20]报道, 蚯蚓活动具有提高土壤微生物活性, 促进有机物分解的作用, 对依赖有机物分解释放养分的有机农业尤为重要。

1.2 土壤微生物对土壤养分状况的影响

土壤微生物包括原核微生物如细菌、蓝细菌、放线菌等, 以及真核微生物如真菌、藻类、地衣等。从土壤微生物组成来看, 不同土壤中微生物类群的组成比例略有不同, 一般认为土壤细菌数量占微生物总数的 80%~84% 左右, 在土壤微生物组成中占绝对优势。真菌占 8%~11%, 放线菌占 8%~10%。但由于土壤系统的复杂性, 到目前为止, 仍有 95% 以上的微生物在种的水平上还无法分离和培养^[21]。

土壤各类微生物在土壤营养元素的转化和循环中的作用有所不同。其中, 细菌在土壤有机物和无机物的转化过程中起着主要作用, 对提高养分的有效性和利用率作用更明显; 放线菌能同化无机氮, 分解碳水化合物及脂类、单宁等难分解的物质, 把植物残体转化为土壤有机组分, 在土壤物质的转化中起一定的作用, 并且与土壤肥力以及植物病害防治有更密切的关系; 真菌积极参与土壤碳素和能源的循环过程, 同时参与有机物质的分解, 使枯落物中的蛋白质转化形成作物可直接吸收利用的可溶性氮、氨基酸和铵盐等, 同时它对无机营养的吸收也起到积极作用^[22,23]。

土壤微生物量碳、氮在土壤中的含量能够反映土壤活性有机碳和氮的储量, 可作为评价土壤生态肥力的一个重要指标^[24]。实际上, 随着生物的生长和死亡, 土壤生物碳、氮、磷等元素和养分不断地被固定或释

放, 在养分过多时, 微生物吸收丰富的无机养分贮藏到菌丝体内, 具有缓和肥效的作用; 当肥料不足时, 随着微生物的死亡, 养分又逐渐释放出来, 具有提高肥效的作用^[25]。微生物量氮是土壤有效态氮的重要来源, 而微生物量氮对环境敏感, 土壤耕作制度、栽培技术等农业措施都会对微生物量氮产生影响。研究表明, 氮肥施入土壤后很快被微生物固定, 施肥后 5 d, 微生物对化肥 ^{15}N 的固持量达到最高, 来自化肥氮的微生物量氮可占 64.1%~87.3%。在小麦苗期, 微生物释放的 ^{15}N 量可占作物吸收 ^{15}N 的 83.7%^[26]。采用 ^{15}N 示踪技术对有机、无机氮源交叉标记进行盆栽试验表明, 在水稻生育期内, 土壤微生物量氮占全氮的 2.20%~4.00%; 微生物固定的尿素氮为 4.01~15.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占施用尿素氮的 1.76%~8.83%; 固定的秸秆氮为 0.97~2.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占施用秸秆氮的 1.69%~4.98%^[27]。Azam^[28] 研究报道, 土壤微生物量氮占土壤全氮的 0.5%~15.3%, 平均为 5%~6.4%, 在数量上低于或接近于作物的吸氮量。

另外, 微生物通过促进土壤团聚体的形成, 影响了土壤养分的供应。研究表明, 微生物主要是借助它们的菌丝将土壤颗粒彼此机械的缠绕在一起以及依靠微生物的代谢产物(多糖和其它有机物)对土壤颗粒的胶结作用而形成稳定性团聚体^[29]。据 Martin^[30] 估计, 真菌形成的团聚体 50% 依靠菌丝的直接缠绕, 另 50% 靠菌丝分泌物的黏结。冯固等^[31] 研究表明, 丛枝菌根菌丝可通过菌丝分泌物黏结和菌丝网络对土壤颗粒的缠绕而促进水稳性团聚体的形成, 其中菌丝对土壤中 5~2 mm 水稳性大团聚体形成的贡献率达 100%。

土壤酶活性与土壤有机质、全氮、全磷及碱解氮等养分含量呈显著正相关, 土壤酶的种类及活性可反映土壤养分的供应状况^[32], 而土壤酶来源于土壤中动物、植物和微生物细胞的分泌物及其残体的分解物, 其中微生物是土壤酶主要来源。Groffman 等^[33] 报道, 在人为和自然因素的干扰下, 土壤酶活性与土壤微生物数量、微生物多样性、微生物生物量和土壤动物数量等呈显著或极显著正相关。

2 蚯蚓和微生物对重金属有效性的影响

随着工业生产的发展, 土壤重金属污染问题日益严重。重金属污染不仅使土壤质量下降, 而且影响农产品的质量, 危害人体健康。其中, 镉是因污染

面积和毒性最大而倍受关注的重金属^[34]。重金属进入土壤后, 通过溶解、沉淀、凝聚、络合、吸附等各种反应, 形成不同形态的重金属, 而土壤中重金属的形态决定了它的移动性和生物利用率。重金属的生物利用率受土壤性质、生物类型、重金属间的交互作用等因素的影响, 凡是影响重金属在土壤中分布的因素都会影响生物利用率。在影响土壤镉的各种土壤因素中, pH、Eh、有机质、CEC、质地、 CaCO_3 含量和电导率等因素的影响最为重要, 这些因素与可提取态土壤镉和植物镉含量之间的相关性都达到了极显著水平^[35]。

2.1 蚯蚓对重金属有效性的影响

蚯蚓是影响土壤性质的主要动物, 它可通过取食、作穴和排泄等活动或其代谢物对土壤性质和土壤重金属的化学行为产生直接或间接的影响。

土壤 pH 是影响土壤中重金属生物有效性的的重要因素, 而蚯蚓活动可改变土壤的酸碱性, 进而可改变土壤重金属的有效性。不同类型的土壤引入不同种类的蚯蚓后, 土壤的 pH 具有明显的差异。酸性红壤接种蚯蚓后, pH 降低 0.03~0.18 个单位, 而高砂土的 pH 则略有升高^[36]。“赤子爱胜蚓”处理鸡粪, 可使 pH 降低 0.7~0.9 个单位^[37]。另外, 蚯蚓活动可以分泌出大量含有一COOH、—CO 等活性基团的胶黏物质, 胶黏物质通过络合、螯合重金属推动了土壤重金属的活化。

重金属的有效性与其存在形态密切相关, 水溶态、交换态的植物有效性较高, DTPA 提取态与植物吸收也有良好的相关性。蚯蚓活动可显著提高土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 的含量, 而对 DTPA-Cd 和 $\text{H}_2\text{O-Cd}$ 无显著影响; 蚯蚓活动促进黑麦草对 Cd 的吸收, 但吸收的 Cd 积累于黑麦草根部分^[38]。俞协治等^[36] 报道, 接种蚯蚓可显著提高红壤中 DTPA-Cu 和 $\text{CaCl}_2\text{-Cu}$ 的含量, 而 $\text{H}_2\text{O-Cu}$ 含量则变化不大; 在 Cd 处理红壤中 $\text{H}_2\text{O-Cd}$ 的含量增加最为显著, $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 和 DTPA-Cd 含量则略有降低; 但蚯蚓对高砂土中 Cu 和 Cd 的各形态含量没有明显影响。

2.2 土壤微生物对重金属有效性的影响

由于土壤中的微生物数量众多, 代谢活动旺盛, 表面活性强, 微生物本身以及微生物与各种有机、无机胶体的相互作用对重金属进行生物吸附、富集、沉淀、溶解、氧化还原等行为, 对重金属的生物有效性及重金属的毒性都会产生深刻的影响。

由于微生物细胞壁表面有羧基、巯基等基团, 细胞膜具有各类型吸附专性蛋白。因此, 重金属可在细

胞壁、膜表面富集, 而微生物在细胞的表面富集与细胞膜成分的改变可减轻重金属毒性的破坏作用, 在重金属进一步的诱导下, 菌体会产生由结构基因与调节基因组成的抗性基因, 通过多途径的联合作用对重金属的毒性进行解毒^[39]。Desjardin^[40]用含葡萄糖的营养液在 30℃ 下培养含六价铬的土壤, 从中分离出还原 Cr⁶⁺ 的菌种链霉菌属的嗜热一氧化碳链霉菌 (*thermocarboxydus*), 当细菌细胞群集或附着到悬浮固体颗粒上, *thermocarboxydus* 将 Cr⁶⁺ 还原为 Cr³⁺, 使 Cr 的活性及毒性降低。Kurek 等^[41]报道, 几种细菌细胞对 Cd²⁺ 的吸附能力远比蒙脱石和砂土大, 且死细胞对 Cd²⁺ 的吸附能力比活细胞的强。

微生物能够改变金属离子在环境中的存在形态, 其代谢产物还能沉淀、螯合金属离子, 某些细菌如硫酸还原细菌可以产生 H₂S, 将重金属离子还原为 CdS 而沉淀^[42]。但真菌会使土样中水溶性 Pb、Cd 量都逐渐增加^[43]; 根瘤菌也有活化土壤 Cd 的作用, 红壤和褐土接种根瘤菌后, 专性吸附态和氧化锰结合态 Cd 含量降低 1~1.5 mg·kg⁻¹, 交换态和有机结合态 Cd 的含量增加 0.4~0.5 mg·kg⁻¹^[44]。

3 研究展望

近年来, 国内外在土壤生物多样性和多功能性对土壤养分转化、循环和重金属活化所起的作用方面, 做了大量研究工作。随着生物技术和相关学科的交叉研究, 特别是现代农业的迫切需求, 更应重视并进一步发挥土壤生物的作用, 加强土壤动物与土壤微生物的研究, 以下两方面值得进一步研究并有望取得明显进展。

3.1 与土壤上生长的各类农作物相比, 人们对土壤动物和微生物本身以及它们在土壤中的作用认识还不够深入。需要进一步明确各类土壤中的土壤生物(动物和微生物)类型、种群特征、演化规律、优势类型或种群等, 并应用分子生态学的原理和技术研究土壤生物多样性、土壤生物群落结构演替规律以及土壤生物与生态系统稳定性的关系, 探讨重金属与土壤生物之间的相互的影响以及各类土壤(包括污染土壤)中的土壤动物和微生物的关系; 还需要研究土壤动物(蚯蚓和线虫等)与微生物的代谢产物, 以及它们对土壤养分转化和循环、重金属的存在结构和分子形态、作物根系生长发育等的影响。

3.2 目前, 生产中还不能很好地利用土壤有益动物和微生物, 土壤生物应用技术研究还不够完备。需要筛

选并接种对重金属污染抗性强的蚯蚓及微生物种群, 结合超富集植物的利用, 找出污染土壤的植物+蚯蚓+土壤微生物的修复系统的最佳组合; 需要像动植物育种那样, 研究与挖掘土壤小动物(如蚯蚓和有益线虫等)和土壤微生物种质资源, 筛选或培育能够更有效地促进土壤养分的循环和转化以及改变土壤重金属有效性的专用类型或品种; 还需要根据土壤特征和不同作物的土壤肥力要求, 建立土壤生物的生态肥力数据库及管理信息系统, 探讨蚯蚓及土壤有益微生物的引入方式和途径, 以及土壤生物在土壤修复、保护地土壤管理、克服重茬障碍及作物缺素症等方面的作用和应用技术。

References

- [1] 黄初龙, 张雪萍. 蚯蚓环境生态作用研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1466-1470.
Huang C L, Zhang X P. Research progress on environmental and ecological functions of earthworm. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1466-1470. (in Chinese)
- [2] Singh J S, Raghunansi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, 1989, 338: 499-500.
- [3] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根相互作用对土壤-植物系统中 Cd 迁移转化的影响. 环境科学学报, 2007, 27(2): 228-234.
Cheng J M, Yu X Z, Huang M H. Effect of earthworm-mycorrhiza interaction on transformation of Cd from soil to plant. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 228-234. (in Chinese)
- [4] 赵吉. 土壤健康的生物学监测与评价. 土壤, 2006, 38(2): 136-142.
Zhao J. Biological monitoring and assessment of soil health. *Soils*, 2006, 38(2): 136-142. (in Chinese)
- [5] 韩玉萍, 宋光煜, 杨万勤. 土壤生态学的理论体系及其研究领域. 生态学杂志, 2000, 19(4): 53-56.
Han Y P, Song G Y, Yang W Q. Theoretical system and research fields of soil ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(4): 53-56. (in Chinese)
- [6] 张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用. 生物多样性, 2007, 15(2): 142-153.
Zhang W X, Chen D M, Zhao C C. Functions of earthworm in ecosystem. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 142-153. (in Chinese)
- [7] Satchell J E. *Earthworm Ecology from Darwin to Vermiculture*. London: Chapman and Hall Ltd. Cambridge, 1983: 1-178.
- [8] Blanchart E. Restoration by earthworms (*Megascolecidae*) of the

- macroaggregate structure of a destructured savanna soil under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(12): 1587-1594.
- [9] Edwards C A. The Importance of earthworms as key representatives of the soil fauna. In: Edwards C A, ed. *Earthworm Ecology (2nd Edition)*. Boca Raton: CRC Press, 2004: 3-9.
- [10] Ketterings Q M, Blair J M, Marinissen J C Y. Effect of earthworms on soil aggregate stability and carbon and nitrogen storage in a legume cover crop agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29: 401-408.
- [11] Bossuyt H, Six J, Hendrix P F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 251-258.
- [12] Parkin T B, Berry E. Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1765-1771.
- [13] Basker A, Maceregor A N, Kirkman J A. Influence of soil ingestion by earthworms and the availability in soil: an incubation experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 1992, 14: 300-303.
- [14] Amador J A, Gorres J H, Savin M C. Carbon and nitrogen dynamics in *Lumbricus terrestris* (L.) burrow soil: Relationship to plant residues and macropores. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1755-1762.
- [15] Cortez J, Billes G, Bouché M B. Effect of climate, soil type, earthworm activity on nitrogen transfer from a nitrogen-15-labelled decomposing material under field conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 318-327.
- [16] 李辉信, 胡 锋, 沈其荣, 陈小云, 仓 龙, 王 霞. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤碳、氮动态和作物产量的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1637-1641.
- Li H X, Hu F, Shen Q R, Chen X Y, Cang L, Wang X. Effect of earthworm inoculation on soil carbon and nitrogen dynamics and on crop yield with application of corn residues. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1637-1641. (in Chinese)
- [17] 王 霞, 李辉信, 胡 锋, 王丹丹. 蚯蚓活动对麦田生态系统中土壤氮素渗漏的影响. *土壤学报*, 2004, 41(6): 987-990.
- Wang X, Li H X, Hu F, Wang D D. Effects of earthworms on nitrogen leaching in wheat field agro-ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 987-990. (in Chinese)
- [18] 李典友, 潘根兴, 向昌国, 褚清河, 丁玉川. 土壤中蚯蚓资源的开发应用研究及展望. *中国农学通报*, 2005, 21(10): 340-347.
- Li D Y, Pan G X, Xiang C G, Chu Q H, Ding Y C. Study and progress on exploitability and application of earthworm resource in soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(10): 340-347. (in Chinese)
- [19] Whalen J K, Parmelee P W, McCartney D A, VanArsdale J L. Movement of N from decomposing earthworm tissue to soil, microbial and plant N pools. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 487-492.
- [20] Wolters V. Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31: 1-19.
- [21] 章家恩, 刘文高, 胡 刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 140-143.
- Zhang J E, Liu W G, Hu G. The relationship between quantity index of soil microorganisms and soil fertility of different land use systems. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2): 140-143. (in Chinese)
- [22] Nannipieri P, Ascher J, Ceccherini M T, Landi L, Pietrameller G, Renella G. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 655-670.
- [23] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍植. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展. *土壤通报*, 2006, 37(1): 170-176.
- Hu Y L, Wang S L, Yan S K. Research advances on the factors influencing the activity and community structure of soil microorganism. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 170-176. (in Chinese)
- [24] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Soil Research*, 1992, 30: 195-207.
- [25] 杜相革, 董 民, 曲再红, 史咏竹. 有机农业和土壤生物多样性. *中国农学通报*, 2004, 20(4): 80-83.
- Du X G, Dong M, Qu Z H, Shi Y Z. Organic agriculture and soil biodiversity. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(4): 80-83. (in Chinese)
- [26] 韩晓日, 郭鹏程, 陈恩凤, 邹德乙. 土壤微生物对施入肥料氮的固持及其动态研究. *土壤学报*, 1998, 35(3): 412-418.
- Han X R, Guo P C, Chen E F, Zou D Y. Immobilization of fertilizer nitrogen by soil microbes and its changes. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 412-418. (in Chinese)
- [27] 仇少君, 彭佩钦, 李 玲, 刘 强, 荣湘民. 盆栽条件下红黄泥微生物量氮和固定态铵的动态变化. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 524-531.
- Qiu S J, Peng P Q, Li L, Liu Q, Rong X M. Dynamics of soil microbial biomass nitrogen and fixed ammonium in reddish clayey soil during pot experiment. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 524-531. (in Chinese)
- [28] Azam F, Yousaf M, Hussain F, Malik K A. Determination of biomass N in some agricultural soils of Punjab, Pakistan. *Plant and Soil*, 1989, 113: 223-228.

- [29] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 415-421. (in Chinese)
- [30] Martin J P, Martin W P, Page J B. Soil aggregation. *Advance in Agronomy*, 1995, 7: 1-37.
- [31] 冯 固, 张玉凤, 李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响. 水土保持学报, 2001, 15(4): 99-102.
Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 99-102. (in Chinese)
- [32] 庞学勇, 刘 庆, 刘世全, 吴 彦, 林 波, 何 海. 川西亚高山针叶林植物群落演替对生物学特性的影响. 水土保持学报, 2004, 18(3): 45-48.
Pang X Y, Liu Q, Liu S Q, Wu Y, Lin B, He H. Influence of plant community succession on soil biological properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 45-48. (in Chinese)
- [33] Groffman P M, McDowell W H, Myer J C, Merriam J L. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1339-1348.
- [34] 杨苏才, 南忠仁, 曾静静. 土壤重金属污染现状与治理途径研究进展. 安徽农业科学, 2006, 34(3): 549-552.
Yang S C, Nan Z R, Zeng J J. Current situation of soil contaminated by heavy metals and research advances on the remediation techniques. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2006, 34(3): 549-552. (in Chinese)
- [35] 夏运生, 王凯荣, 张格丽. 土壤镉生物毒性的影响因素研究进展. 农业环境保护, 2002, 21(3): 272-275.
Xia Y S, Wang K R, Zhang G L. Research advances in influence factors of phytotoxicity of cadmium in soil. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3): 272-275. (in Chinese)
- [36] 俞协治, 成杰民. 蚯蚓对土壤中铜、镉生物有效性的影响. 生态学报, 2003, 23(5): 922-928.
Yu X Z, Cheng J M. Effect of earthworm on bio-availability of Cu and Cd in soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 922-928. (in Chinese)
- [37] 杨世关, 刘亚纳, 张百良. 赤子爱胜蚓处理鸡粪的试验研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 55-57.
Yang S G, Liu Y N, Zhang B L. Experiment on eisenia foetida for pre-compost of chook manure. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 55-57. (in Chinese)
- [38] 成杰民, 俞协治, 黄铭洪. 蚯蚓-菌根在植物修复镉污染土壤中的作用. 生态学报, 2005, 25(6): 1256-1263.
Cheng J M, Yu X Z, Huang M H. Roles of earthworm-mycorrhiza interactions on phytoremediation of Cd contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1256-1263. (in Chinese)
- [39] 叶锦韶, 尹 华, 彭 辉. 微生物抗重金属毒性研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(4): 1-4.
Ye J S, Yin H, Peng H. Advance on study of the resistance to heavy metal by microorganisms. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(4): 1-4. (in Chinese)
- [40] Desjardin V. Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils. *Waste Management*, 2002, 22(2): 195-200.
- [41] Kurek E, Czavan J, Bollag J M. Sorption of cadmium by microorganisms in competition with other soil constituents. *Applied Environment and Microbiology*, 1982, 43(5): 1011-1015.
- [42] 曹裕松, 李志安, 邹 碧. 根际环境的调节与重金属污染土壤的修复. 生态环境, 2003, 12(4): 493-497.
Cao Y S, Li Z A, Zou B. Regulation of rhizosphere and remediation of polluted soil by heavy metal. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 493-497. (in Chinese)
- [43] 李荣林, 沈寿国, 陈 浩, 李优琴. 微生物对土壤中 Pb、Cd 的溶解作用研究. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 124-126.
Li R L, Shen S G, Chen H, Li Y Q. Solubility of lead (Pb) and cadmium (Cd) in soil by microorganisms. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl.): 124-126. (in Chinese)
- [44] 陈雯莉, 黄巧云, 郭学军. 根瘤菌对土壤铜、锌和镉形态分配的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1278-1282.
Chen W L, Huang Q Y, Guo X J. Effects of rhizobia on morphological distribution of Cu, Zn and Cd in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1278-1282. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)