

施用蚯蚓粪对杨树苗根际土壤生物学特征的影响

井大炜^{1,2}

(1. 德州学院, 山东 德州 253023; 2. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014)

摘要: 通过盆栽试验,研究了CF(单施化肥)、VC(蚯蚓粪)和VC+CF(蚯蚓粪和化肥各提供50%的氮)处理对一年生欧美F-107杨根际土壤微生物数量、酶活性、根系建造水平及理化性状的影响。结果表明,VC+CF处理有利于协调土壤C/N比,并且化肥的施入补充了土壤中氮的消耗,从而明显提高了根际土壤中微生物数量及脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性,其中细菌数量分别比CK,CF和VC处理提高165.99%,67.34%和31.73%,蔗糖酶活性分别提高90.37%,45.31%和32.34%。施用蚯蚓粪有利于杨树苗细根的生长,但对地上部的增长速度显著快于地下部。此外,VC+CF处理使根际土壤pH值明显降低,显著增加了根际土壤中养分离子的有效性。与VC+CF处理相比,VC处理对根际土壤生物学特征的影响较小。因此,蚯蚓粪与化肥配施更好地改善了杨树苗根际区域的微生态环境。

关键词: 欧美F-107杨; 蚯蚓粪; 微生物数量; 酶活性; 理化性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0133-05

中图分类号: S154.34, S157.4⁺1

Effects of Vermicompost on Biological Characteristics in Rhizosphere Soil of Poplar Seedlings

JING Da-wei^{1,2}

(1. Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China; 2. Shandong Forestry Academy, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to determine the effects of four treatments, i. e., CK (neither urea nor vermicompost was applied), CF (100% of nitrogen was provided by urea), VC (100% of nitrogen was provided by vermicompost), and VC+CF (two 50% of nitrogen were provided by vermicompost and urea, respectively), on the soil microorganism population, enzyme activities, root construction and physicochemical properties in rhizosphere soil of poplar seedlings. Results showed that the VC+CF treatment was beneficial to coordinate the soil C/N ratio, and the application of inorganic fertilizer could supplement the consumption of nitrogen in the soil. Besides, the microorganism population and the activities of urease enzyme, catalase enzyme, polyphenol oxidase enzyme and invertase enzyme significantly increased. As compared with the CK, CF and VC treatments, the bacteria population in the VC+CF treatment increased by 165.99%, 67.34% and 31.73%, and the invertase enzyme increased by 90.37%, 45.31% and 32.34%, respectively. Vermicompost application had a beneficial effect on the fine root growth, and the aerial part was influenced by vermicompost greater than the under-ground part. Additionally, the VC+CF treatment obviously reduced soil pH value and significantly enhanced the efficiency of nutrient ions in the rhizosphere soil. Compared with the VC+CF treatment, the VC treatment had little effect on soil biological characteristics of one-year poplar seedlings. vermicompost co-applied with inorganic fertilizer had better effect on ecological environment in rhizosphere soil of poplar seedlings.

Keywords: *Populus × euramericana* cv. 'Neva'; vermicompost; microorganism population; enzyme activity; physicochemical properties

大量施用化肥而忽略有机肥的施用是传统农业种植模式的主要特征,长期以来导致土壤中有机质含

量严重不足,并出现地下水和蔬菜中硝态氮含量明显超标等问题^[1],已经成为一个亟待解决的环境问题。

收稿日期:2013-01-27

修回日期:2013-05-01

资助项目:山东省农业重大应用技术创新课题“杨树超高产栽培关键技术研究”

作者简介:井大炜(1982—),男(汉族),陕西省绥德县人,博士,主要从事植物营养机理研究。E-mail:jingdawei009@163.com。

而有机肥所含营养成分丰富、全面,可优化土壤微生物种群,增强土壤酶活性,改善土壤农化性状,保持土壤肥力,并且对养分具有缓释效果,与化肥相比肥效期更长、养分利用率更高^[2]。所以,有机肥和化肥配合施用已受到国内外的普遍重视。

蚯蚓粪是通过蚯蚓消化有机废弃物而产生的均匀颗粒,具有良好的团粒结构,疏松适度,通透性好,酸碱度中性,水气调和,且有保水、保肥的性能;并且其矿质养分丰富,有效成分高,有机质含量多,含有多种利于植物生长的酶、腐殖质和植物激素类物质^[3]。中国从 20 世纪 80 年代开始兴起蚯蚓养殖业,北京、天津、河北、宁夏、云南等地都建有不同规模的蚯蚓养殖场,蚯蚓粪年产量达数十万吨^[4]。可见,蚯蚓粪的应用已受到了高度关注。前人关于蚯蚓粪进行了大量的研究,但主要集中在花卉、蔬菜等园艺作物上^[5-6],而应用于人工林施肥的研究尚未见报道。目前在人工林营造和经营中由于管理措施不当,一定程度上造成了林地土壤生态环境退化、林地生产力下降的现象,急需科学有效的施肥技术来改善林地肥力。为此,本文选用经蚯蚓吞食牛粪后产生的蚯蚓粪为供试原料,开展了蚯蚓粪与化肥配施对一年生 I-107 欧美杨根际土壤的微生物数量、酶活性、根系建造水平及理化性状的研究,为探讨施用蚯蚓粪对杨树苗生物学特性的影响提供理论依据,并且为杨树苗的培育和造林提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地点设在山东省林业科学研究院试验苗圃,供试土壤为潮土,土壤速效氮 27.96 mg/kg,速效磷 26.52 mg/kg,速效钾 79 mg/kg,有机质含量为 6.83 g/kg。供试蚯蚓粪为蚯蚓吞食牛粪后的产物,全量 N、P、K 含量分别为 1.68%、1.29% 和 0.95%;所用化肥为尿素、过磷酸钙、氯化钾。杨树扦插苗品种为 I-107 欧美杨,接穗长 15~16 cm,茎粗 2 cm,重量 25~27 g。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,随机区组设计,设 4 个处理:处理 1 为不施肥(CK);处理 2 为单施化肥(CF);处理 3 为蚯蚓粪(VC);处理 4 为蚯蚓粪提供 50% 的氮,化肥提供 50% 的氮(VC+CF)。每个处理 8 盆,共计 32 盆。除 CK 外,各处理均为等养分量,N、P 和 K 含量分别为 3.55、1.56、2.48 g,各处理 P 和 K 不足部分分别用过磷酸钙、氯化钾补足。试验用盆为购自市场

的棱柱型塑料盆,盆高 20 cm,边长 30 cm。于 2012 年 4 月 6 日盆栽试验时,将肥料与土壤充分混匀后装盆,每盆装土 10.5 kg。

1.3 取样和分析测定方法

2012 年 10 月 18 日杨树落叶前采集土壤、根系和地上部样品。在土壤水分含量适中时采用剥落分离法^[7]取样,将带土植株取出,先轻轻抖落大块不含根系的土壤,然后用力将根表面附着的土壤全部抖落下来,迅速装入塑料袋内(根际土)。同时,用水冲洗挑选出的根系,用游标卡尺将根系按照 <2, 2~5, >5 mm 的粗度进行分级,然后连同地上部茎和叶一起放入 75 °C 的烘箱中烘干至恒重,并分别称其质量。根际土取样后一部分样品立即进行土壤微生物的测定,一部分土样冷冻干燥过筛后进行土壤酶活性和理化性质的测定。

土壤微生物数量采用稀释平板计数法,细菌采用牛肉蛋白胨琼脂培养基;放线菌采用改良高氏 1 号培养基;真菌采用马丁—孟加拉红培养基。脲酶测定采用苯酚钠—次氯酸钠比色法;过氧化氢酶测定采用高锰酸钾滴定法;多酚氧化酶测定采用邻苯三酚比色法;蔗糖酶测定采用 Na₂S₂O₃ 滴定法。pH 值的测定采用电位法(水土比为 2.5:1),碱解氮的测定采用碱解扩散法,速效磷的测定采用 NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法,速效钾的测定采用 NH₄Ac 浸提火焰光度法,EC 值的测定采用电导法(水土比为 5:1),CEC 的测定采用乙酸铵交换法^[8]。

1.4 统计方法

采用 Excel 2007 处理数据并制图,采用 SAS 软件进行方差分析和多重比较(LSD 法, $p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对杨树苗根际土壤微生物数量的影响

根际土壤微生物对植物生长及营养元素流动起着重要作用。土壤微生物数量是反映土壤生物活性的重要指标,土壤微生物多样性受植物类型、土壤质地与土壤管理措施等的影响^[9]。不同处理对杨树苗根际土壤微生物数量的影响如表 1 所示。可以看出,同 CK 相比,各施肥处理均显著增加了细菌数、放线菌数、真菌数和微生物总量。在各施肥处理中,VC 和 VC+CF 处理的 3 大功能微生物数量和微生物总量均显著高于 CF 处理;VC+CF 处理的细菌数、真菌数和微生物总量均是最高,并且显著高于其他处理,而放线菌数与 VC 处理差异不显著。其中,VC+

CF 处理的细菌数量分别比 CK, CF 和 VC 处理增加了 165.99%, 67.34% 和 31.73%。可见, 蚯蚓粪的施

入能明显促进杨树苗根际土壤的微生物数量, 其中蚯蚓粪与化肥配施的效果最显著。

表 1 不同处理对杨树苗根际土壤微生物数量的影响

10⁴/g

处理	细菌	放线菌	真菌	微生物总量
CK	294.72 (10.26)d	132.69 (4.78)c	2.09 (0.28)d	429.50 (0.02)d
CF	468.45 (10.04)c	186.24 (5.19)b	3.76 (0.17)c	658.45 (0.03)c
VC	595.09 (11.38)b	253.17 (6.16)a	5.25 (0.14)b	853.51 (0.06)b
VC+CF	783.92 (12.26)a	262.05 (5.85)a	6.18 (0.29)a	1 052.15 (0.08)a

注: 数据为平均值(标准差), 同一列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同处理对杨树苗根际土壤酶活性的影响

土壤酶参与土壤的许多生物化学过程和物质循环, 包括腐殖质及各种有机化合物的分解与合成、土壤养分的固定与释放以及各种氧化还原反应, 直接参与了土壤营养元素的有效化过程, 可以客观地反映土壤肥力状况^[10]。表 2 显示了不同处理对杨树苗根际土壤酶活性的影响, 可见, 各施肥处理的酶活性均显著高于 CK。在 3 个施肥处理中, VC 和 VC+CF 处理的酶活性均显著高于 CF 处理; 而 VC+CF 处理的

脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性均是最高, 并显著高于 VC 处理, 但过氧化氢酶活性与 VC 处理差异不显著。其中, VC+CF 处理对蔗糖酶活性的提高幅度最大, 分别比 CK, CF 和 VC 处理提高了 90.37%, 45.31% 和 32.34%。由此可见, 施加蚯蚓粪处理的土壤酶活性均显著高于单施化肥处理。除过氧化氢酶外, 蚯蚓粪与化肥配施处理对杨树苗根际土壤酶活性的提高幅度最明显。这与根际土壤微生物数量的变化规律相呼应。

表 2 不同处理对杨树苗根际土壤酶活性的影响

处理	脲酶/ (mg · g ⁻¹ · h ⁻¹)	过氧化氢酶/ (ml · g ⁻¹ · h ⁻¹)	多酚氧化酶/ (mg · g ⁻¹ · h ⁻¹)	蔗糖酶/ (ml · g ⁻¹ · h ⁻¹)
CK	2.31 (0.05)d	1.43 (0.05)c	0.51 (0.03)d	1.87 (0.06)d
CF	2.65 (0.06)c	1.78 (0.03)b	0.63 (0.05)c	2.45 (0.09)c
VC	2.76 (0.04)b	1.86 (0.03)a	0.72 (0.02)b	2.69 (0.07)b
VC+CF	2.93 (0.06)a	1.91 (0.05)a	0.86 (0.04)a	3.56 (0.09)a

2.3 不同处理对杨树苗根系和地上部生物量的影响

植物根系的建造水平对养分及水分的吸收有着不可忽略的作用。由图 1 可知, 从根系分级的绝对重量来看, 各施肥处理 <2, 2~5 和 >5 mm 的根系均显著大于对照。在各施肥处理中, 施加蚯蚓粪的两个处理对杨树苗根系建造水平产生了很大的影响。VC+CF 处理中 <2 mm 的根系干重最大, 均显著大于 VC 和 CF 处理, 其次是 VC 处理, 也显著大于 CF 处理。而 2~5 和 >5 mm 的根系, 3 个施肥处理之间未见显著差异。从根系总生物量来看, CF, VC 和 VC+CF 处理分别比对照增加 60.26%, 84.84% 和 104.82%; 而从地上部生物量来看, 分别比对照增加 143.86%, 216.14% 和 273.35%, 并且地上部与根系生物量的比值分别为 6.01, 6.75 和 7.20, 各处理之间均达到显著水平。

由此可见, 施肥能明显增加杨树苗的细根和根系总生物量, 但对地上部的增加速度明显更快; 而在不同的施肥处理中, 蚯蚓粪与化肥配施的效果最显著。

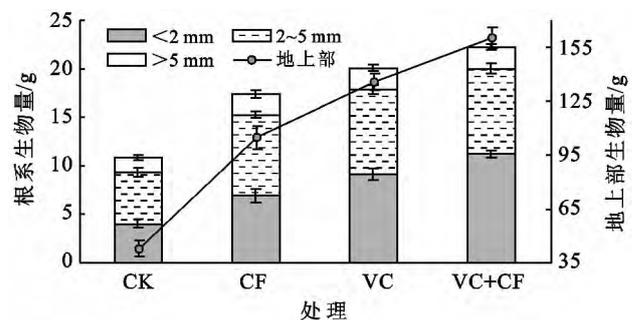


图 1 不同处理对杨树苗根系和地上部生物量的影响

2.4 不同处理对杨树苗根际土壤理化性质的影响

土壤 pH 值是土壤重要的化学性质, 也是影响土壤肥力的因素之一。它直接影响土壤养分的存在状态、转化和有效性, 因此, 对植物的生长发育有直接的影响。pH 值是代表与土壤固相处于平衡的土壤溶液中氢离子浓度的负对数, 它受外界条件、也受土壤内在性质的影响。从表 3 可知, 不同处理对杨树苗根际土壤的 pH 值产生了很大的影响。VC+CF 处理的

pH 值最低,分别比 CK,CF 和 VC 处理降低了 0.56, 0.45 和 0.24 个单位,差异均达显著性水平;其次是 VC 处理,也显著低于 CK 和 CF,而 CF 与 CK 差异不显著。土壤水溶性盐是强电解质,其导电能力的强弱可用电导率(EC)表示;在一定范围内,溶液的含盐量与 EC 值呈正相关。VC+CF 和 VC 处理还显著增加了根际土壤的 EC 值,这说明蚯蚓粪的加入对杨树苗根际环境产生了较大的影响,而单施化肥的影响不明显。根际土壤的养分含量主要取决于当年施肥量,同时也受到微生物的矿化作用和酶促反应的影响。植物根系周围土壤的养分能被植物直接吸收利用,是物质循环中最活跃的部位^[11]。VC+CF 处理的碱解

氮、速效磷和速效钾含量均是最高,且显著高于其他处理,同 CF 处理相比,分别增加了 24.05%,26.24% 和 16.13%;其次是 VC 处理,速效磷和速效钾含量均显著高于 CK 和 CF,而碱解氮含量与 CF 差异不显著,但显著高于 CK。此外,阳离子交换量(CEC)的大小基本上代表了土壤可能保持的养分数量,即保肥性的高低,故可作为评价土壤保肥能力的指标。不同处理还对杨树苗根际土壤的 CEC 产生了明显的影响,VC+CF 处理的 CEC 分别比 CK,CF 和 VC 处理提高了 19.88%,17.35% 和 8.21%。这说明蚯蚓粪与化肥配施对根际土壤养分的保持有一定的促进作用,这对杨树苗根系吸收养分同样具有重要意义。

表 3 不同处理对杨树苗根际土壤理化性质的影响

处理	pH 值	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	EC/ (mS · cm ⁻¹)	CEC/ (cmol · kg ⁻¹)
CK	8.37(0.05)a	58.29(4.32)c	31.69(2.41)d	165.47(6.02)d	0.27(0.02)c	6.49(0.16)c
CF	8.26(0.09)a	73.56(4.03)b	39.75(3.49)c	183.26(4.21)c	0.29(0.01)c	6.63(0.22)c
VC	8.05(0.07)b	79.38(3.29)b	46.22(1.07)b	196.15(6.32)b	0.33(0.01)b	7.19(0.15)b
VC+CF	7.81(0.13)c	91.25(3.18)a	50.18(2.16)a	212.82(7.05)a	0.38(0.02)a	7.78(0.29)a

3 讨论

3.1 根际土壤微生物数量、酶活性

根际是受根系活力影响的一定体积的土壤,根际的空间范围因土壤结构、微粒尺寸、含水量及土壤缓冲力的不同而不同,同时根际又是一个由植物根系、细菌、真菌、放线菌及土壤动物组成的多因素相关联的复杂系统^[12]。已有研究表明,施用有机肥或有机无机配施能提高根际土壤细菌、真菌和放线菌数量^[13]。这一结论在本试验中得到进一步证实:蚯蚓粪和蚯蚓粪化肥配施两个处理的根际土壤细菌、真菌、放线菌和微生物总量均显著高于对照和单施化肥处理。这表明施加蚯蚓粪能够促进土壤微生物的生长,主要是由于大部分微生物在土壤中实际上处于一种低营养状态,当蚯蚓粪加入土壤后,为微生物提供了新的能源,使微生物在种群数量上发生较大的改变;另一方面,蚯蚓粪本身也带入大量活的微生物,所以,蚯蚓粪的施入在某种程度上起到了“接种”的作用。

不同的施肥措施同样对根际土壤酶活性产生明显的影响。从本试验可知,蚯蚓粪或蚯蚓粪化肥配施均能显著提高根际土壤酶活性,这与武雪萍等^[14]在植烟上的研究结果一致。这主要是因为蚯蚓粪的施用不仅可以为土壤酶提供更多、更丰富的酶促基质,发挥底物诱导作用,而且还能提高腐殖质含量,而腐殖质能够通过离子交换、离子键或共价键等与土壤酶结合,固定土壤酶^[15]。本试验还发现,蚯蚓粪与化肥

配施处理的根际土壤微生物数量和土壤酶活性均高于蚯蚓粪处理。这一方面可能是因为蚯蚓粪与化肥配施有利于协调土壤 C/N 比,改善土壤理化性质,从而有助于杨树苗和土壤微生物的生长,使更多的酶伴随着旺盛的根系活动和土壤动物、微生物的生活活动而进入土壤;另一方面化肥的施入补充了土壤中氮的消耗,促进了土壤微生物的繁殖,从而提高了土壤微生物数量和土壤酶活性^[16]。此外,蚯蚓粪施用处理的根际土壤微生物数量与酶活性呈现基本一致的变化规律。说明微生物生命代谢活动的加强能够提高土壤酶活性,同时土壤酶活性的提高也促进了土壤中物质转化速率,为微生物提供养分和良好的土壤微生态环境。

3.2 根际土壤理化性质

由本试验结论可知,蚯蚓粪的施用影响了杨树苗根际土壤的养分和理化性质。首先是蚯蚓粪与化肥配施处理显著降低了杨树苗根际土壤的 pH 值。植物根系不但能够提供植物生长所需的水分和养分,而且也能通过对养分的直接吸收和对微生物的间接作用来诱导根际土壤养分组分的改变^[17],可以向生长介质中分泌质子,释放无机离子,溢泌或分泌大量的有机物,这些物质和根组织脱落物一起统称为根系分泌物。已有研究表明,根系分泌物中含有一定量的有机酸^[18]。蚯蚓粪与化肥配施显著提高了杨树苗根际土壤的微生物数量和酶活性,促进了根系的生长,尤其是明显增加了毛细根的数量,可能会诱导根系分泌物中有机酸总量的增加,从而导致根际土壤 pH 值的

变化,这也许是配施蚯蚓粪降低土壤根际 pH 值的机理之一。根际土壤 pH 值的降低,对土壤中磷和钾具有一定的溶解作用,提高了根际土壤中速效磷和速效钾的含量,从而提高了根际土壤中养分离子的浓度,导致 EC 值增加。根际土壤养分离子浓度的提高有利于植物根系对养分的吸收利用。由以上分析可知,蚯蚓粪与化肥配施导致土壤 pH 值降低,可能是杨树苗根际土壤理化性质改变的主要机理之一;而且,配施蚯蚓粪在杨树苗根际土壤中形成了“微生物数量增加、酶活性提高—根系活性增强—根系分泌物增多—pH 值降低—养分离子浓度增加—促进养分吸收”的良性循环。此外,本试验还得出,施肥对地上部的提高速度显著快于根系,这可能是由于施肥增加了土壤养分的有效性,根据功能平衡假说,植物会把更多的光合产物分配给地上部^[19-20],从而使根系的生长速度明显慢于地上部。

4 结论

蚯蚓粪与化肥配施处理有利于协调土壤 C/N 比,并且化肥的施入补充了土壤中氮的消耗,从而明显提高了根际土壤中微生物数量及脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性,其中细菌数量分别比对照、单施化肥和蚯蚓粪处理提高 165.99%, 67.34% 和 31.73%,蔗糖酶活性分别提高 90.37%, 45.31% 和 32.34%。施用蚯蚓粪有利于杨树苗细根的生长,但对地上部的增长速度显著快于地下部。此外,配施蚯蚓粪处理使根际土壤 pH 值明显降低,阳离子代换能力显著提高,并且还明显增加了根际土壤中养分离子的有效性,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加 24.05%, 26.24% 和 16.13%。与配施蚯蚓粪处理相比,蚯蚓粪处理对杨树苗根际土壤生物学特征的影响作用明显减弱。

综合分析认为,蚯蚓粪与化肥配施更好地改善了杨树苗根际土壤的微生态环境,显著提高了根际土壤中养分离子的有效性和养分保持能力,并促进了毛细根的生长。

[参 考 文 献]

- [1] 朱建国. 硝态氮污染危害与研究展望[J]. 土壤学报, 1995, 32(S): 62-69.
- [2] 徐福乐, 纵明, 杨峰, 等. 生物有机肥的肥效及作用机理[J]. 耕作与栽培, 2005(6): 8-9.
- [3] 徐魁梧, 戴杏庭. 蚯蚓人工养殖与利用新技术[M]. 南京: 南京出版社, 1998: 22-34.
- [4] 尚庆茂, 张志刚. 蚯蚓粪在番茄育苗上的应用效果[J]. 中国蔬菜, 2005(9): 10-12.
- [5] 崔玉珍, 牛明芬. 蚯蚓粪对土壤的培肥作用及草莓产量和品质的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(4): 156-157.
- [6] 胡艳霞, 孙振钧, 孙永明, 等. 蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1358-1362.
- [7] Wang X P, Zabowski D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions[M] // Plant Soil. 1998, 200: 13-20.
- [8] 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, 1999: 24-214.
- [9] Garbeva P, van Veen J A, van Elsas J D. Microbial diversity in soil: Selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness[J]. Annual Review of Phytopathology, 2004, 42: 243-270.
- [10] 冯伟, 管涛, 王晓宇, 等. 沼液与化肥配施对冬小麦根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1007-1012.
- [11] Norton J M. Carbonflow in the rhizosphere of Ponderosa pine seedlings[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(4): 149-155.
- [12] Campbell R, Greaves M P. Anatomy and community structure of the rhizosphere[M] // Lynch J M. The Rhizosphere. Chichester: John Wiley and Sons, 1990: 11-34.
- [13] 姬兴杰, 熊淑萍, 李春明, 等. 不同肥料类型对土壤酶活性与微生物数量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 123-127.
- [14] 武雪萍, 刘增俊, 赵跃华, 等. 施用芝麻饼肥对植烟根际土壤酶活性和微生物碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 541-546.
- [15] Eivazi F, Bayan M R. Select soil enzyme activities in the historic sanborn field as affected by long-term cropping systems [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34(15): 2259-2275.
- [16] 马宁宁, 李天来, 武春成, 等. 长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1766-1771.
- [17] Drever J I, Vance G F. Role of soil organic acids in mineral weathering process[M] // Pittman E D, Lewan M D. Organic Acids in Geological Process. New York: Springer-Verlag, 1994: 138-161.
- [18] 杨守军, 刘德玺, 孙玉波, 等. 根剪对冬枣根际土壤理化性状及生物学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 215-218.
- [19] 于立忠, 丁国泉, 朱教君, 等. 施肥对日本落叶松人工林细根生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 713-720.
- [20] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin[J]. Tree Physiology, 1995, 15(3): 317-325.