

# 蚯蚓粪对杨树幼苗根系特性及氮素利用率的影响

肖勇强<sup>1</sup>, 井大炜<sup>1</sup>, 邢尚军<sup>2</sup>, 马海林<sup>2</sup>, 杜振宇<sup>2</sup>, 刘方春<sup>2</sup>

(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)等处理对一年生欧美I—107杨根系形态特征、根系吸收面积及氮素利用率的影响。结果表明,与CF处理相比,VC+CF处理显著提高了杨树幼苗的根系总根长、比根长、根系表面积、根系体积和根尖数,而根系直径却明显降低,其中根系总根长分别比CK、CF和VC处理提高161.70%、52.80%和14.79%;同时,VC+CF处理还显著提高了根系总吸收面积、活跃吸收面积和根、茎、叶干物质量以及氮、磷、钾养分吸收量,并且使氮素利用率达到59.07%,分别比CF和VC处理提高57.35%和27.09%。此外,施肥对杨树幼苗地上部的增长速度明显快于根系。同VC+CF处理相比,VC处理对杨树苗根系形态特征、根系吸收面积及氮素利用率的影响较小。综合分析认为,蚯蚓粪与化肥配施对杨树幼苗的根系特性改善和养分吸收作用效果最佳。

**关键词:** 欧美I—107杨; 蚯蚓粪; 根系形态特征; 根系吸收面积; 氮素利用率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0262-05

中图分类号: S157.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.052

## Effects of Vermicompost on Root Characteristics and Nitrogen Use Efficiency of Poplar Seedlings

XIAO Yong-qiang<sup>1</sup>, JING Da-wei<sup>1</sup>, XING Shang-jun<sup>2</sup>, MA Hai-lin<sup>2</sup>, DU Zhen-yu<sup>2</sup>, LIU Fang-chun<sup>2</sup>

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

**Abstract:** A pot experiment was conducted to study the root morphological characteristics, root absorption area and nitrogen use efficiency of poplar seedlings under the four treatments of 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(50% and 50% of nitrogen was provided by vermicompost and urea, respectively). Results showed that in comparison with the CF treatment, the VC+CF treatment significantly increased the total root length, root surface area, root volume and the number of root tips, but obviously decreased the root average diameter. The total root length in the VC+CF treatment was increased by 161.70%, 52.80% and 14.79% in comparison with the CK, CF and VC treatments, respectively. At the same time, the VC+CF treatment dramatically increased the total absorption area and active absorption area of root system. Not only the dry matter accumulation of root, stem and leaf, but also the absorption amount of nitrogen, phosphorus and potassium was remarkably enhanced by the use of VC+CF. Furthermore, the nitrogen use efficiency was 59.07% in VC+CF treatment, indicative of 57.35% and 27.09% increases over the CF and VC treatments, respectively. Additionally, the growth rate of aboveground was significantly faster than underground owing to the application of fertilization. However, in the VC treatment, less effect on root morphological characteristics, root absorption area and nitrogen use efficiency of poplar seedlings was observed than that in the VC+CF treatment. In conclusion, vermicompost co-applied with inorganic fertilizer had better effect on root characteristics and nutrient uptake of poplar seedlings.

**Keywords:** *Populus × euramericana* cv. 'Neva'; vermicompost; root morphological characteristics; root absorption area; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2013-06-02

修回日期: 2013-07-29

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: 肖勇强(1992—),男(汉族),湖南省祁东县人,本科,研究方向为生态与园林建筑。E-mail: xiaoyq007@163.com。

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

根系形态决定植株获得养分和水分的能力,所以根系与产量形成之间的关系一直是作物产量形成研究中的热点问题,作物生产中采取的许多栽培管理措施实质上都是通过影响根系来控制个体和群体的发育,从而达到增产的目的<sup>[1]</sup>。总根长、根表面积、根体积、根尖数和平均根直径等指标反应了作物根系的形态特征,而这些形态特征与作物的产量密切相关<sup>[2]</sup>。

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<sup>[3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。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<sup>[5-6]</sup>,而应用于人工林施肥的研究较少,尤其是关于蚯蚓粪对人工林根系特征的影响尚未见报道。杨树(*Populus*)是中国华北地区和江淮流域广泛栽培的速生用材树种。但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木根系吸收能力和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木根系特性。为此,本研究选用经蚯蚓吞食牛粪后产生的蚓粪为供试原料,开展了蚯蚓粪与化肥配施对1年生I—107欧美杨根系形态特征、吸收面积、养分吸收量及氮素利用率的研究,为探讨施用蚯蚓粪对杨树幼苗根系特性及肥料利用率的影响提供理论依据,并且为杨树幼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,不施肥(CK);处理 2,单施化肥(CF),分别为尿素 7.72 g,过磷酸钙 13.00 g 和氯化钾 4.12 g;处理 3,蚯蚓粪(VC);处理 4,蚯蚓粪提供 50%的氮,化肥提

供 50%的氮(VC+CF),其中尿素为 3.86 g,过磷酸钙为 6.50 g,氯化钾为 2.06 g。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 测定项目与方法

2012 年 10 月 18 日(杨树幼苗落叶前)先用水冲洗所有的根系,然后逐一将根系放在一个盛有少量水的长方形平盘中,小心地将根分开,避免根重叠和堆积,然后采用 WinRHIZ2003b 根系分析系统对根系进行扫描,并分析计算出总根长、根表面积、体积、根尖数和平均直径;根系总吸收面积和活跃吸收面积的测定采用甲烯蓝吸附法<sup>[7]</sup>;以完整无损伤的根系为材料,用排水法在量筒中测定其根系体积,把 0.000 2 mol/L 甲烯蓝溶液分别倒在 3 个编号的小烧杯里,每杯中溶液量约 10 倍于根的体积,然后把根系顺次浸入有甲烯蓝溶液的烧杯中,每杯中浸入 1.5 min,最后测光密度,查标准曲线,并计算出根的吸收面积和活跃吸收面积。另外,分根、茎、叶对杨树取样,在杀青、烘干后称其干重,分别采用  $H_2SO_4-H_2O_2$ —蒸馏法、钒钼黄比色法和火焰光度计法测定其氮、磷和钾的含量,并计算杨树幼苗对养分的总吸收量、氮素利用率和比根长。

### 1.4 统计方法

采用 SAS 软件对数据进行基本处理,采用单因素方差分析不同处理间的差异,并用多重比较(LSD法,  $p < 0.05$ )分析不同施肥处理对根系形态(总根长、表面积、体积、根尖数、平均直径和比根长)、根系吸收面积指标及氮素利用率的影响,同时对根系各指标与氮素利用率关系进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对杨树幼苗根系形态特征的影响

根系长度指标可反映根系与土壤的接触面积并反映出根系在土壤中的伸展空间<sup>[8]</sup>,比根长、根系表面积、根系体积同样可以反应根系的发育状况。由表 1 可知,各施肥处理均显著增加了杨树幼苗根系的总根长、比根长、表面积和体积,而 VC+CF 处理的提高幅度最大,并显著高于其他处理(除比根长与 VC 处理无显著差异以外),其中根系总根长分别比 CK、CF 和 VC 处理提高 161.70%、52.80%和 14.79%;VC 处理的根系总根长、比根长和根系表面积均显著

高于 CF 处理,而根系体积与 CF 处理差异不显著。

根系的强弱,除了与根长、根系体积和根量有关外,还与根的平均直径有关。由表 1 可见,CF 处理提高了根系的平均直径,但与 CK 未达到显著差异,而 VC 和 VC+CF 处理均显著低于 CK,尤其是 VC+CF 处理。表明施用蚯蚓粪能促进根系变细,这有利于增加根系的表面积,扩大根系对水分和养分的吸收空间。

根尖既包括须根根尖,也包括根毛根尖、须根数和根毛数越多,根系与土壤接触的面积就越大,固定的土壤体积就越大,保持的水分也就越多,同时根系的有效吸收面积就越多<sup>[9]</sup>。VC+CF 处理的根尖数最高,分别比 CK,CF 和 VC 处理提高 12.64%,14.60%和 19.88%,差异均达到显著水平,而 CK,CF 和 VC 处理之间无显著差异。由此可见,蚯蚓粪与化肥配施对杨树幼苗根系形态特征的作用效果最佳。

表 1 不同处理对杨树幼苗根系形态特征的影响

处理	总根长/cm	比根长/(cm·g <sup>-1</sup> )	根系表面积/cm <sup>2</sup>	根系体积/cm <sup>3</sup>	根尖数	平均直径/cm
CK	1 492.45±113.72d	161.87±0.71b	2 835.04±139.08d	28.09±1.42c	878±45b	0.84±0.02a
CF	2 556.12±154.16c	158.96±0.26b	3 496.13±125.46c	48.56±1.18b	863±39b	0.87±0.03a
VC	3 402.39±128.65b	167.28±0.52a	3 752.82±103.29b	46.14±1.25b	825±21b	0.72±0.02b
VC+CF	3 905.76±101.02a	168.64±0.39a	4 124.65±146.87a	52.72±0.94a	989±32a	0.65±0.03c

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 不同处理对杨树幼苗根系吸收面积的影响

植物是活跃的吸收和合成器官,根系总吸收面积能反映根系吸收水分、养分能力的大小,而根系活跃吸收面积则能在一定程度上反映根系活力的情况<sup>[10]</sup>。由表 2 可见,施肥可不同程度地增加杨树幼苗根系的总吸收和活跃吸收面积,各处理的总吸收面积和活跃吸收面积的变化规律是:VC+CF>VC>CF>CK,并且各处理之间差异均达到显著水平,表明施用蚯蚓粪的两个处理对杨树幼苗根系吸收面积的增加幅度显著大于单施化肥处理,其中 VC+CF 处理更显著,

其总吸收面积和活跃吸收面积分别比 CF 处理增加 73.25%和 117.98%,分别比 VC 处理增加 28.60%和 36.54%。

活跃吸收面积/总吸收面积的百分比与比吸收面积、比活跃吸收面积具有相似的变化趋势:VC+CF 处理最高,并显著高于其他处理;其次是 VC 处理,显著高于 CF 和 CK 处理,而 CF 和 CK 处理差异不显著。综合来看,蚯蚓粪与化肥配施能更显著地增加杨树幼苗的总吸收面积和活跃吸收面积,从而能更好地促进根系对水分和养分的吸收。

表 2 不同处理对杨树幼苗根系吸收面积的影响

处理	总吸收面积/m <sup>2</sup>	活跃吸收面积/m <sup>2</sup>	活跃吸收面积与总吸收面积比/%	比吸收面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	比活跃吸收面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
CK	6.51±0.43d	2.67±0.25d	41.01±0.33c	0.71±0.01c	0.29±0.02c
CF	11.29±0.76c	4.56±0.52c	40.39±0.14c	0.70±0.01c	0.28±0.01c
VC	15.21±0.39b	7.28±0.41b	47.86±0.29b	0.75±0.02b	0.36±0.02b
VC+CF	19.56±0.62a	9.94±0.27a	50.82±0.16a	0.84±0.03a	0.43±0.01a

## 2.3 不同处理对杨树幼苗氮素利用率的影响

不同处理对杨树幼苗根、茎和叶干物质量及氮素利用率的影响如表 3 所示。由表 3 可以看出,杨树干物质主要积累在茎干中,其次是叶片,根部干物质量最小。各施肥处理可不同程度的提高杨树幼苗根、茎和叶的干物质量,以 VC+CF 处理的效果最为明显,其根、茎和叶的干物质量分别是 CK 的 2.51,7.82 和 4.49 倍,分别比 CF 处理提高 44.03%,33.09%和 28.97%。可见,蚯蚓粪与化肥配施对杨树幼苗干物质量积累具有明显的促进作用。从干物质中的养分含量可知,VC+CF 处理的全氮、全磷和全钾含量均

是最高,并显著高于其他处理;其次是 VC 处理。施用蚯蚓粪的两个处理能明显提高杨树幼苗总的养分吸收量,并显著高于单施化肥处理,其中 VC+CF 处理最显著,其氮、磷和钾的总养分吸收量分别比 CF 处理提高 47.27%,70.14%和 72.89%。CF,VC 和 VC+CF 处理的氮素利用率分别为 37.54%,46.48%和 59.07%,以 VC+CF 处理为最高,分别比 CF 和 VC 处理提高 57.35%和 27.09%。可见,在不同的施肥处理中,VC+CF 处理在促进杨树幼苗植株对氮、磷和钾养分的吸收及提高氮素利用率方面的效果最明显。

表 3 不同处理对杨树幼苗氮素利用率的影响

处理	干物质量(g/株)			养分含量/(g·kg <sup>-1</sup> )			养分吸收量(g/株)			氮素利用率/%
	根	茎	叶	N	P	K	N	P	K	
CK	9.22d	14.96d	9.41c	8.46c	2.61c	6.86c	0.28d	0.09d	0.23d	—
CF	16.08c	87.92c	32.79b	11.82b	3.52b	6.72c	1.62c	0.48c	0.92c	37.54
VC	20.34b	99.47b	40.18a	12.09b	3.76b	7.85b	1.93b	0.60b	1.26b	46.48
VC+CF	23.16a	117.01a	42.29a	13.05a	4.49a	8.71a	2.38a	0.82a	1.59a	59.07

2.4 不同处理之间根系各指标及氮素利用率的相关性分析

根系不同指标与氮素利用率之间的相关关系及其相关系数(表 4)表明,根系总根长与比根长、总吸收面积和活跃吸收面积显著相关( $p<0.05$ ),与平均直径显著负相关( $p<0.05$ );比根长与根系生物量、平均直径显著负相关( $p<0.05$ );根系表面积与总吸收面积、活性吸收面积显著相关( $p<0.01$ );总吸收面

积、活跃吸收面积与平均直径显著负相关( $p<0.05$ ),说明根系越细,越能增加根系的总吸收面积和活跃吸收面积;氮素利用率与比根长、根系表面积显著相关( $p<0.01$ ),与总吸收面积、活跃吸收面积显著相关( $p<0.05$ )。这表明根系各指标之间是相互影响、相互制约的,也进一步说明增加根系的比根长、表面积、总吸收面积和活跃吸收面积能明显提高杨树幼苗对氮素的吸收利用效率。

表 4 不同处理之间根系各指标及氮素利用率的相关性分析

项 目	总根长	根系生物量	比根长	根系表面积	根系体积	根尖数	平均直径	总吸收面积	活跃吸收面积	氮素利用率
总根长	1.00									
根系生物量	0.75	1.00								
比根长	0.91*	-0.89*	1.00							
根系表面积	0.83	0.76	0.69	1.00						
根系体积	0.78	0.81	0.39	0.84	1.00					
根尖数	0.42	0.40	0.43	0.47	0.34	1.00				
平均直径	-0.89*	-0.82	-0.98**	-0.81	-0.54	-0.56	1.00			
总吸收面积	0.87*	0.74	0.79	0.99**	0.87	0.54	-0.89*	1.00		
活跃吸收面积	0.90*	0.76	0.81	0.98**	0.84	0.57	-0.91*	0.98**	1.00	
氮素利用率	0.81	0.81	0.97**	0.99**	0.65	0.37	-0.72	0.96*	0.94*	1.00

注: \* 表示显著性相关( $p<0.05$ ); \*\* 表示极显著性相关( $p<0.01$ )。

3 讨论

黄高宝等<sup>[11]</sup>研究认为,作物通过某种机制感知根际养分变化,然后通过启动体内特定基因的表达和相应的生理生态反应,最终引起根系的形态和生理特性变化,来增加养分的吸收。因此,植物对养分的吸收以及最终产量的形成是根系形态特征和生理特性共同影响的结果。根系总长度是描述根系在土壤介质中吸收水分和养分能力的重要参数之一,反映了根系在土壤中的伸展空间<sup>[12]</sup>。比根长是指单位质量根系的总根长,是表征根系形态与生理功能的一个重要指标。根系表面积是根系与环境介质直接接触的重要指标,是植物对养分水分吸收能力的重要决定因子<sup>[13]</sup>;根系表面积越大,与土壤介质接触的机会就越多,其吸收养分的能力就越强。根系体积和表面积一样反映了根系的发育状况<sup>[14]</sup>。试验表明,蚯蚓粪与化肥配施较单施化肥能明显提高杨树幼苗的根系总根长、比根长、根系表面积、根系体积和根尖数,并显著扩大了根系的总吸收面积和活跃吸收面积。这一方

面可能是由于蚯蚓粪与化肥配施不仅提供了丰富的有机碳,并且能更好地调节土壤 C/N 比,从而对土壤有机无机复合状况及腐殖质结合形态有较好的作用效果,同时还能降低土壤容重、增强土壤的通透性,所以能明显改善土壤理化性状,为根系的生长提供了一个良好的环境;另一方面可能是因为配施蚯蚓粪能有效地调节氮素的供应速度,并明显延长了供肥时间,更有利于根系的生长,从而能较好地满足杨树幼苗在年生长进程中对养分的需求。李彦生等<sup>[15]</sup>在大豆上的研究表明,施用氮素会明显促进根系的生长,而过多的氮素反而会抑制根系的发育。这与本研究结果基本一致。

根系形态特征的改善和根系吸收面积的增加,能增强根系对水分和养分的吸收能力。这一结论在本试验中得到进一步的证明:同单施化肥相比,蚯蚓粪与化肥配施显著提高了杨树幼苗的 N,P,K 含量,并且明显增加了根、茎和叶的生物量。根据功能平衡假说,植物在对地上和地下资源的竞争能力上存在着平衡,在施肥情况下,光合产物将更多地分配到地上部。

本试验结果基本符合这一理论,由表3可知,对照的根/冠比为0.38,而各施肥处理的根/冠比只有0.13~0.15,可见,根/冠比均处于较低值,这可能是由于本研究是在高20 cm、边长30 cm的塑料盆中进行的,对杨树幼苗的根系生长造成了一定的抑制作用,而对地上部的影响相对较小所致;同时可得出施肥对地上部的增长速度明显快于根系,这与于立忠等<sup>[16]</sup>在日本落叶松上的研究结果基本一致。本试验还发现,配施蚯蚓粪显著提高了氮素利用率,这与朱菜红等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。这主要是因为配施蚯蚓粪使土壤微生物获得了充足的C源和N源,有利于提高微生物数量和活性<sup>[18]</sup>,从而使更多的化肥氮被同化到微生物体内或被转化为较稳定的有机含氮代谢物而得以保存,所以能有效减少化肥氮的损失。同时,从相关性分析可知,氮素利用率与根系表面积、比根长、总吸收面积和活跃吸收面积分别达到了极显著或显著相关,因此,配施蚯蚓粪能明显增强根系对养分的吸收能力,提高肥料利用率。也进一步说明比根长大小与土壤资源的有效性密切相关<sup>[19]</sup>。此外,配施蚯蚓粪可显著增加杨树幼苗的根系体积,而从相关性分析看出,氮素利用率与根系体积之间并无必然联系,这主要是因为根系体积虽然决定了植物根系截获能力的大小<sup>[20]</sup>,所以根系体积的大小对杨树幼苗的氮素利用率影响较小。

## 4 结论

同单施化肥相比,蚯蚓粪与化肥配施处理能显著提高杨树幼苗的根系总根长、根系表面积、根系体积和根尖数,而根系直径却明显降低,其中根系总根长分别比对照、单施化肥和蚯蚓粪处理提高161.70%,52.80%和14.79%;同时,蚯蚓粪与化肥配施处理还显著提高了根系总吸收面积、活跃吸收面积和根、茎、叶干物质量以及氮、磷、钾养分吸收量,并且使氮素利用率达到59.07%,分别比单施化肥和蚯蚓粪处理提高57.35%和27.09%。此外,施肥对杨树幼苗地上部的增长速度明显快于根系。与蚯蚓粪化肥配施处理相比,蚯蚓粪处理对杨树苗根系形态特征、根系吸收面积及氮素利用率的影响较小。由此可见,蚯蚓粪与化肥配施对杨树幼苗的根系特性改善和养分吸收作用效果最佳。此外,相关性分析表明,氮素利用率与比根长、根系表积极显著相关( $p < 0.01$ ),与总吸收面积、活跃吸收面积显著相关( $p < 0.05$ ),这进一步说明增加根系的比根长、表面积、总吸收面积和活跃吸收面积能明显提高杨树幼苗对氮素的吸收利用效率。

## [参考文献]

- [1] Costa C, Dwyer L M, Hamilton R I, et al. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2000,92(4):621-627.
- [2] 刘晓冰,王光华. 根系研究的现状与展望(下)[J]. *世界农业*, 2001,26(9):42-44.
- [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] 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.
- [8] 李会科,郑秋玲,赵政阳,等. 黄土高原果园种植牧草根系特征的研究[J]. *草业学报*, 2008,17(2):92-96.
- [9] 张秀娟,梅莉,王政权. 细根分解研究及其存在的问题[J]. *植物学通报*, 2005,22(2):246-254.
- [10] 宋海星,王学立. 玉米根系活力及吸收面积的空间分布变化[J]. *西北农业学报*, 2005,14(1):137-141.
- [11] 黄高宝,张恩和,胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001,7(3):293-297.
- [12] Graham R D, Gregorio G. Breeding for nutritional characteristics in cereals[J]. *Novartis Foundation Symposium*, 2001,236:205-218.
- [13] 阎素红,杨兆生,王俊娟,等. 不同类型小麦品种根系生长特性研究[J]. *中国农业科学*, 2002,35(8):906-910.
- [14] 周梦红,程积民,万惠娥,等. 云雾山本氏针茅群落根系分布特征[J]. *草地学报*, 2008,16(3):267-271.
- [15] 李彦生,杜明,刘晓冰,等. 氮素用量对菜用大豆生殖生长期根系及鲜荚产量的影响[J]. *大豆科学*, 2012,31(1):47-51.
- [16] 于立忠,丁国泉,史建伟,等. 施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响[J]. *应用生态学报*, 2007,18(5):957-962.
- [17] 朱菜红,董彩霞,沈其荣,等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010,16(2):282-288.
- [18] 王淑平,周广胜,孙长占,等. 土壤微生物量氮的动态及其生物有效性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003,9(1):87-90.
- [19] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000,81(1):275-280.
- [20] 曾宪坤. 磷的农业化学(I)[J]. *磷肥与复肥*, 1999(1):69-78.