植物营养与肥料学报 2014,20(1):164-171
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0118

不同土表管理措施对梨树根系分布特征的影响

姜海波,赵静文,张乃文,王 红,董彩霞*,徐阳春
(南京农业大学资源与环境科学学院,江苏南京 210095)

摘要: 梨树根系在土壤中的分布状况直接影响施肥的效果,采用壕沟法研究不同土表管理措施下梨树根长、根表面积、根体积和不同径级根系特征指标的水平及垂直分布。结果表明,1)梨树根系水平方向主要集中在距树干30—90 cm范围内,垂直方向主要集中在20—60 cm土层中;2)行间种植三叶草与覆膜处理下梨树根长、根表面积、根体积均高于清耕对照;3)3种土表处理下,不同径级根系间都以0～1 mm径级根长、根数量最多,根体积最小,以1～3 mm径级根表面积最大。行间三叶草处理下总根长、根表面积最大,根体积最小。因此建议梨树施肥在水平方向距主干30—90 cm,垂直深度20—60 cm土层为宜,可促进梨树根系的生长,又可提高肥料利用率。

关键词: 梨树;土表管理措施;根系
中图分类号: S661.2.601 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0164-08

Effects of different soil surface management on distribution characteristics of pear roots

JIANG Hai-bo, ZHAO Jing-wen, ZHANG Nai-wen, WANG Hong, DONG Cai-xia*, XU Yang-chun
(*College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: The effectiveness of fertilization relies on the distribution of pear tree roots in soil heavily. Excavating method was used to study the horizontal and vertical distributions of root length, root surface area, root volume and root distribution characteristics of different with diameters under three different soil surface management (open, growing clover, plastic mulching). Results show that the horizontal distribution of tree roots is mainly concentrated in the 30-90 cm from the trunk, and the vertical distribution is centralized in the 20-60 cm deep of soil layer. The root length, root surface area and root volume for inter-planting white clover and plastic mulching are higher than those of the control treatment. Under the three soil surface management, the root length and biomass of 0-1 mm are the highest in different diameter classes, and the root surface area of 1-3 mm is the highest. The total length and surface area of roots in the inter-planting white clover treatment are the largest, while the root volume is the least. Based on the results, we can recommend the fertilization in the horizontal distribution of 30-90 cm and in the vertical distribution of 20-60 cm may promote root growth of pear trees and the utilization of fertilizers.

Key words: pear tree; soil surface management; root

根系是植物直接与土壤接触的器官,具有固定植株、吸收水分和养分,合成、分泌、运输和贮藏营养和代谢物质等基本功能,是技术管理、接收和发出生物信号的主要作用体[1],直接影响着果树的产量[2-4]。大量研究表明,根系的生长发育受植物种类特性、土壤水分、土壤温度、氧气、土壤养分等的影响[4-7]。Asady 和 Smucker 研究认为这些因素是相互影响的,难以分开[8]。由于果树根系受到土壤理化性状、生物生态因素及其树体等其它方面的综合影响,加上果树根系分布于地下,结构复杂、体系庞大,致使人们对其研究远不如地上部深入、系统和全面。土壤管理措施对果树根系生长发育有

收稿日期: 2013-04-21 **接收日期:** 2013-10-16
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-29-15)资助。
作者简介: 姜海波(1985—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事梨树矿质营养研究。E-mail: 2010103129@njau.edu.cn
* 通信作者 E-mail: cxdong@njau.edu.cn.

重要的影响，Gregory 发现免耕处理土壤表层根长密度最大[9]。Tanasescu 和 Paltineanu 研究表明，滴灌条件下小于1 mm 根明显增多[10]。郝仲勇等研究结果表明，苹果树的根系随深度和距树干距离的增大而减小，直径大于2 mm 的根占质量比重大，而直径小于2 mm 的根占根长比重大[11]。农业生产中土表管理措施对果树生长的影响是通过根系起作用的，土表管理措施的好坏直接决定了果树生长发育和生产水平。本文主要研究不同土表管理措施下梨园根系的数量、组成及分布规律，以期揭示管理措施对梨树根系生长的作用，探索和完善土、肥、水管理技术体系，进一步提高梨果产量和改善果实品质。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验区位于江苏省睢宁县梨园示范基地（33°54.688′ N，117°59.431′ E），地处黄淮冲击平原南部，属暖温带半湿润季风气候，年平均气温14℃、降水量800 mm、无霜期210 d、日照2200 h。土壤类型为沙壤土，主栽品种为新兴梨，树龄8 年，栽植密度3 m×5 m。供试土壤0—30 cm 土层土壤有机质含量12.36 g/kg、全氮0.94 g/kg、速效磷18.79 mg/kg、速效钾183.31 mg/kg、pH 值7.25。

1.2　试验设计

试验于2009 年进行，设清耕（CK）、行间种植三叶草（T1）和覆膜（T2）3 种土表管理措施处理，其中地膜覆盖处理选用厚度为0.015 mm 的无色透明聚乙烯塑料膜，于每年11 月底更换地膜，行间三叶草采用行间种植，行内清耕，草带宽1.5 m。每个处理3 次重复，小区面积0.15 hm^2，田间管理条件一致。

1.3　采样与分析

于2011 年6 月在3 个处理小区各选1 株代表平均生长势的梨树，均在阳面行间采用壕沟剖面分层分段挖掘的方法取样[12]（如图1）。以距离树干10 cm 处为中心，沿水平方向在0—150 cm 范围内挖剖面，每隔30 cm 连续采集土样，宽度为50 cm。垂直方向取样深度为0—100 cm，每隔20 cm 取一个样，即取样尺寸为30 cm×50 cm×20 cm。将各层土样中的所有根系拣出，用水冲洗干净，取出杂物、死根后，将根系直径分为＜1 mm（Ⅰ），1～3 mm（Ⅱ），＞3 mm（Ⅲ）3 个径级[13]，采用根系扫描仪（LA1600 scanner，Canada）获得根系图像，用根系分析软件（Winrhizo 2003b，Canada）对相关指标如根系长度、根表面积、根体积等进行分析，并将各根系指标换算为单位体积根长（mm/cm^3）、根表面积（mm^2/cm^3）和根体积（mm^3/cm^3）。

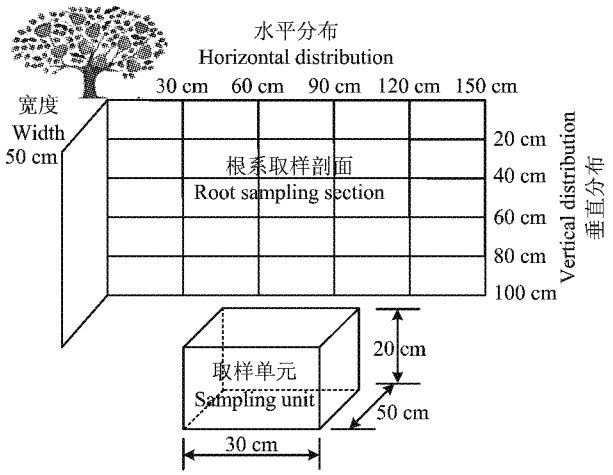

图1　根系调查示意图

Fig.1　The sketch of root investigation

1.4　数据处理

所得结果为各处理的平均值，用 Excel 进行数据处理，SPSS 16.0 软件进行统计分析，LSD 法多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同土表管理措施对根系分布特征的影响

2.1.1 根长　从表1 可以看出，各处理根系在水平方向主要分布在距树干0—120 cm 范围内，其中行间三叶草（T1）与覆膜（T2）处理以90—120 cm 根系分布最多，占总根量的23.6% 和23.3%；而对照（CK）处理在0—30 cm、30—60 cm 和60—90 cm 范围内根系均较多，三者之间差异较小。而在120—150 cm 范围根长最小，T1、T2 和CK 处理分别占总根量的13%、15% 和13%。在垂直方向，各处理的根长随土层深度的增加呈现出先增加后降低的趋势，根系主要集中在20—60 cm 范围内。行间三叶草处理在20—40 cm 土层内根量最多，占总根量的32%；而覆膜处理在土层40—60 cm 内根量最多，占总根量的25%。综合分析，行间三叶草对总根长的影响程度最大，比覆膜和对照分别增加了21.5% 和39.7%，覆膜处理比对照增加了15%。

2.1.2 根表面积　梨树的根表面积在水平方向与垂直方向均呈现出先增大后减小的趋势（表2）。水平方向上，行间三叶草（T1）、覆膜（T2）与对照（CK）处理在距离主干30 cm 范围内根系表面积最大，分

表1 不同土表管理措施对根长的影响（mm/cm^3）

Table 1 Effects of different soil surface management on root length

水平分布 Horizontal distribution	处理 Treatment	垂直分布 Vertical distribution				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
0—30 cm	CK	40.79	36.6	44.7	30.6	4.06
	T1	51.7	48.4	50.4	45.2	4.50
	T2	37.7	45.8	55.7	29.7	4.32
30—60 cm	CK	35.9	39.5	52.4	26.8	7.55
	T1	34.6	66.8	60.0	29.4	8.18
	T2	57.7	32.2	41.6	25.4	7.51
60—90 cm	CK	25.2	26.8	58.4	40.3	5.74
	T1	38.6	74.6	53.2	47.2	5.78
	T2	33.3	41.2	43.1	30.2	6.25
90—120 cm	CK	6.66	31.8	40.9	43.0	9.51
	T1	43.9	83.2	47.0	49.2	6.58
	T2	45.6	39.4	57.2	37.8	6.58
120—150 cm	CK	5.34	23.9	24.1	26.5	9.98
	T1	22.7	30.0	35.6	31.4	6.21
	T2	26.3	23.8	40.6	27.4	5.58

注(Note)：CK—清耕 Cleaning tillage；T1— 行间种植三叶草 Inter-planting white clover；T2— 覆膜 Plastic mulching.

表2 不同土表管理措施对根表面积的影响（cm^2/cm^3）

Table 2 Effects of different soil surface management on root surface area

水平分布 Horizontal distribution	处理 Treatment	垂直分布 Vertical distribution				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
0—30 cm	CK	0.0158	0.0226	0.0291	0.0114	0.0019
	T1	0.0173	0.0314	0.0227	0.0166	0.0027
	T2	0.0286	0.0283	0.0303	0.0118	0.0027
30—60 cm	CK	0.0144	0.0192	0.0217	0.0064	0.0038
	T1	0.0111	0.0290	0.0269	0.0108	0.0040
	T2	0.0185	0.0208	0.0123	0.0078	0.0036
60—90 cm	CK	0.0072	0.0099	0.0250	0.0112	0.0026
	T1	0.0127	0.0323	0.0212	0.0144	0.0029
	T2	0.0253	0.0187	0.0129	0.0090	0.0031
90—120 cm	CK	0.0019	0.0105	0.0181	0.0156	0.0041
	T1	0.0147	0.0287	0.0204	0.0131	0.0034
	T2	0.0116	0.0149	0.0148	0.0108	0.0037
120—150 cm	CK	0.0033	0.0070	0.0089	0.0080	0.0051
	T1	0.0075	0.0086	0.0121	0.0114	0.0049
	T2	0.0064	0.0161	0.0099	0.0073	0.0041

注(Note)：CK—清耕 Cleaning tillage；T1—行间种植三叶草 Inter-planting white clover；T2—覆膜 Plastic mulching.

别占总表面积的 23.8%、30.5% 和 28.4%。而在距主干 120—150 cm 范围内,各处理根系表面积均较小,分别占总表面积的 11.7%、13.2% 和 11.3%,而且各处理的根系总表面积为行间三叶草(T1) > 覆膜(T2) > 对照(CK)。在垂直方向上,梨树根系表面积表现出先增加后降低趋势,但行间三叶草与覆膜处理在 20—40 cm 土层根系表面积最大,分别占总根表面积的 34.1% 和 29.7%;对照处理在 40—60 cm 土层最大,占总根表面积的 36%。

2.1.3 根体积　表 3 显示,对照(CK)、行间三叶草(T1)、覆膜(T2) 3 个处理下梨树根系体积在水平方向上离主干 30 cm 范围内最大,分别占总体积的 34.1%、28.8% 和 38.3%;离主干 120—150 cm 范围内根系体积最小,CK、T1、T2 分别为 9.7%、10% 和 10.4%,可能是与离主干越近,粗根越多,根的体积越大有关。而在垂直方向上,行间三叶草与覆膜处理下根体积在 20—40 cm 范围内最大,分别比对照增加了 116.5% 和 81.5%。与对照相比,行间三叶草和覆膜处理下根系体积总量较大,分别比对照增加了 31.2% 和 12.3%,可以看出行间三叶草处理下根系体积最大,根系具有更大的水分、养分吸收空间,具有更好的生长潜势。

表 3　不同土表管理措施对根体积的影响 ($\times 10^{-4} cm^3/cm^3$)

Table 3　Effects of different soil surface management on root volume

水平分布 Horizontal distribution	处理 Treatment	垂直分布 Vertical distribution				
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
0—30 cm	CK	8.36	7.62	12.33	3.36	0.73
	T1	4.63	17.38	8.17	4.83	1.00
	T2	9.13	13.89	13.11	3.75	1.03
30—60 cm	CK	4.18	7.45	7.12	1.20	1.50
	T1	2.82	10.04	9.57	3.16	1.77
	T2	4.70	10.71	2.88	1.89	1.47
60—90 cm	CK	1.65	2.89	8.53	2.46	0.95
	T1	3.31	11.14	6.74	3.51	0.99
	T2	6.10	6.75	3.05	2.16	1.11
90—120 cm	CK	0.45	2.76	6.40	4.53	1.40
	T1	3.90	7.86	7.06	2.76	1.70
	T2	2.36	4.51	3.06	2.45	1.62
120—150 cm	CK	1.02	1.65	2.60	1.90	2.07
	T1	1.97	1.96	3.28	3.29	1.97
	T2	1.24	4.70	1.92	1.56	1.68

注(Note): CK—清耕 Cleaning tillage; T1— 行间种植三叶草 Inter-planting white clover; T2— 覆膜 Plastic mulching.

2.2　不同土表管理措施对不同径级根系分布特征的影响

2.2.1 根长　图 2 显示,从水平方向来看,各处理均以 0 ~ 1 mm 根径的根长最大,1 ~ 3 mm 次之, >3 mm 根茎根长最小。覆膜(T2)处理最大程度地提高了 0 ~ 1 mm 径级内的根长,行间三叶草(T1)次之。在垂直方向上,根长仍以 0 ~ 1 mm 径级内最多,1 ~ 3 mm 径级内次之,大于 3 mm 径级内最小。0 ~ 1 mm 径级内,根系主要以 20—80 cm 范围内最多,行间种植三叶草处理在 20—40 cm 和 60—80 cm 范围内较多,占 0 ~ 1 mm 径级根长总量的 24.3% 和 27.9%;覆膜处理在 0—20 cm 范围内最多,占该径级总根长的 30.6%。

2.2.2 根体积　不同径级下根体积表现出与根长相反的趋势,以大于 3 mm 直径的根系体积最大,0 ~ 1 mm 直径的根系体积最小,其中行间三叶草(T1)与覆膜(T2)处理下根体积均低于对照(CK)处理(图 3)。在水平方向上,根体积以 0—30 cm 范围最大,120—150 cm 范围最小。其中在 >3 mm 径级内,行间三叶草与覆膜处理比对照处理降低了 4% 和

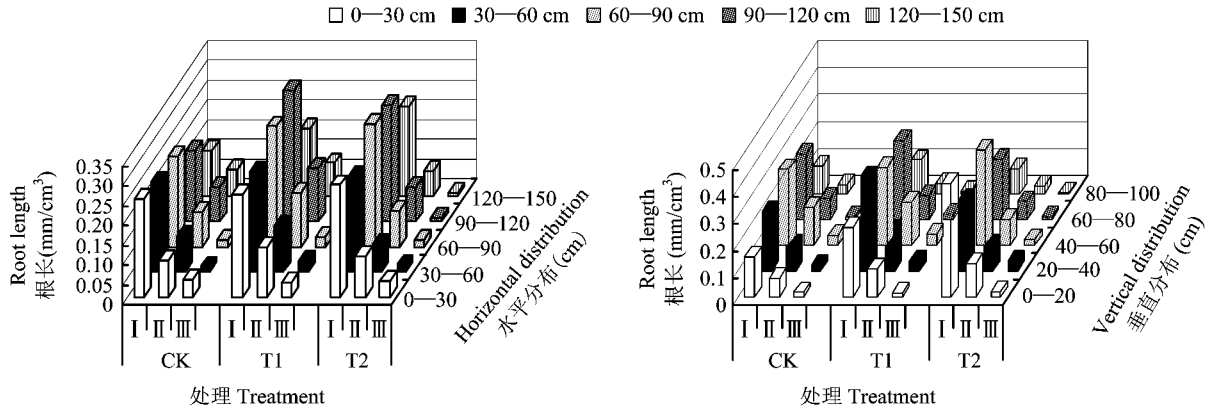

图2 不同径级根系根长的水平与垂直分布

Fig. 2 Horizontal and vertical distributions of root length for different root diameters

[注(Note): CK—清耕 Cleaning tillage; T1— 行间种植三叶草 Inter-planting white clover; T2— 覆膜 Plastic mulching. Ⅰ—0～1 mm 径级 0-1 mm root diameter; Ⅱ—1～3 mm 径级 1-3 mm root diameter; Ⅲ— >3 mm 径级 >3 mm root diameter.]

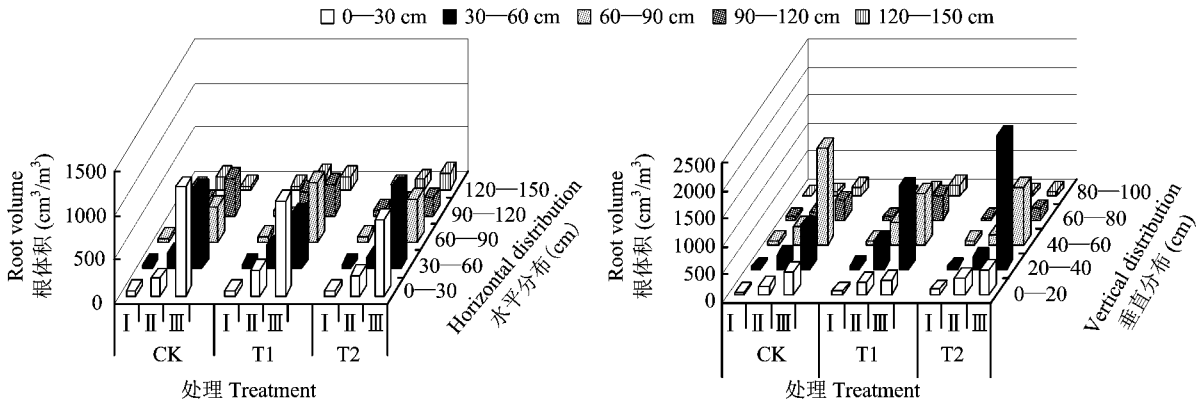

图3 不同径级根系根体积的水平与垂直分布

Fig. 3 Horizontal and vertical distributions of root volume for different root diameters

[注(Note): CK—清耕 Cleaning tillage; T1— 行间种植三叶草 Inter-planting white clover; T2— 覆膜 Plastic mulching. Ⅰ—0～1 mm 径级 0-1 mm root diameter; Ⅱ—1～3 mm 径级 1-3 mm root diameter; Ⅲ —>3 mm 径级 >3 mm root diameter.]

12.8%。根体积随垂直深度的增加呈现出先增加后降低的趋势,其中以20—60 cm土层范围内根体积最大,行间三叶草、覆膜与对照3个处理分别占总根体积的68.5%、73.3%和69.2%。在大于3 mm径级内,行间三叶草与覆膜处理下在垂直方向20—40 cm范围内根体积最大,而对照处理在40—60 cm范围内根体积最大。

2.2.3 根表面积 不同处理不同径级下根表面积在各个水平方向上差异较小(图4)。在水平方向上,行间三叶草(T1)和覆膜(T2)处理均增加了0～1 mm茎级的根系表面积,分别比对照(CK)增加28%和26%。1～3 mm径级内根总表面积以行间种植三叶草最大,分别比对照和覆膜处理增加了45%和51%。在垂直方向上,根系表面积以20—60 cm范围内最大;在此范围内,行间三叶草与覆膜处理比对照处理的根表面积大。不同径级比较,以1～3 mm径级的根表面积最大,大于3 mm的次之,0～1 mm的最小。

2.2.4 根数量 总的来看,3种土表管理措施下梨树根系均为根径小于1 mm的根系数量最多,1～3 mm的根系数量较少,大于3 mm的根系数量最少(图5)。水平方向上,行间三叶草(T1)与覆膜(T2)处理0～1 mm的根较多,直径大于3 mm的根较少;而对照(CK)处理根径小于1 mm的小根相对较少,大于3 mm的大根相对较多。水平方向上,小于1 mm的根系主要集中在距离主干30—90 cm范围内;距离主干120—150 cm范围内根量最少。根径1～3 mm和大于3 mm的根系主要分布在距离主干

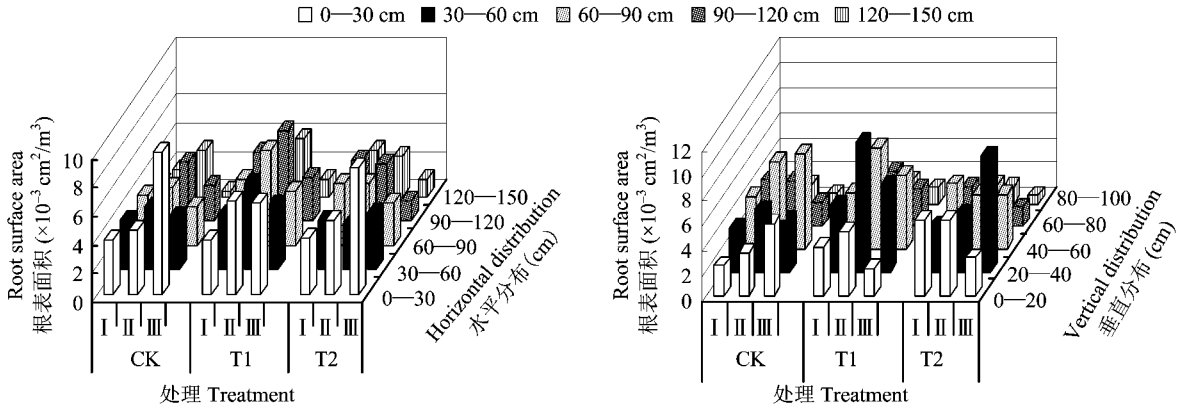

图 4　不同径级根系根表面积的水平与垂直分布

Fig. 4　Horizontal and vertical distributions of root surface area for different root diameters

[注(Note): CK—清耕 Cleaning tillage; T1— 行间种植三叶草 Inter-planting white clover; T2— 覆膜 Plastic mulching. Ⅰ—0～1 mm 径级 0-1 mm root diameter; Ⅱ—1～3 mm 径级 1-3 mm root diameter; Ⅲ—>3 mm 径级 >3 mm root diameter.]

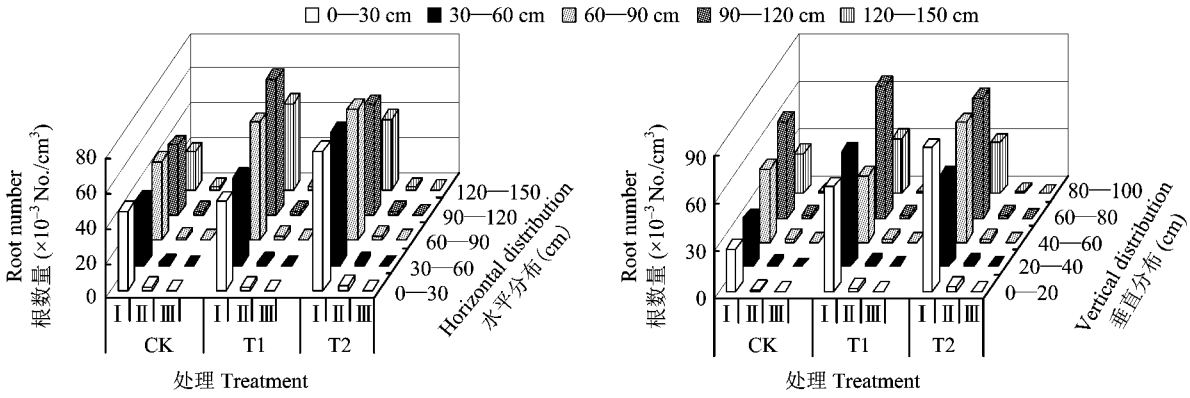

图 5　不同径级根系根数量的水平与垂直分布

Fig. 5　Horizontal and vertical distributions of root number for different root diameters

[注(Note): CK—清耕 Cleaning tillage; T1— 行间种植三叶草 Inter-planting white clover; T2— 覆膜 Plastic mulching. Ⅰ—0～1 mm 径级 0-1 mm root diameter; Ⅱ—1～3 mm 径级 1-3 mm root diameter; Ⅲ—>3 mm 径级 >3 mm root diameter.]

30 cm 范围内,其中行间三叶草(T1)、覆膜(T2)与对照(CK)处理分别占 1～3 mm 总根量的 24.5%、21.5% 和 31.4%;占大于 3 mm 总根量的 45.7%、33.3% 和 48%。垂直方向上, 0～1 mm 的根系数量随土层深度增加表现出先增加后降低的趋势; 1～3 mm 的根系数量以 20—40 cm 土层较多,80—100 cm 最少;大于 3 mm 的根系主要集中在 0—20 cm 土层范围内,80—100 cm 较少,其中行间三叶草与覆膜处理下 0～1 mm 径级的根系数量高于对照处理。

3　讨论与结论

梨树根系的数量、类型及分布状况对树体吸收水分和矿质元素起着至关重要的作用。根系分布范围广、数量多, 根角跨度大,即意味着占据土壤空间较大,根系吸收营养面积大,吸收养分多,供给地上部的矿质元素随之增加,地上部各个器官生长健壮,梨的产量、质量就会提高[14]。梨树根系的空间分布特征往往是多种土壤环境因子共同作用的结果,也是反映植物地下部分协调生长的重要指标。植物根系的生长发育及其分布特征与根系所处的土壤结构和根系周围的微立地环境相关[15]。Farrish[16]研究发现,土壤局部条件的不适,常引起该部位根系密度的大幅度降低,导致根系分布不均匀。王冉等[17]的研究表明,不同施肥方法苗木根系生长指标不同,指数施肥处理的苗木根系生长及其各形态指标均高于平均施肥处理。Sokalska[18]的研究表明灌溉增加了根系的数量。本文研究结果表

明,梨树根系在水平方向上主要分布在距树干30—120 cm范围内,该区域根系数量约占总根量的2/3;梨树根长密度、根表面积与根体积在垂直方向上均集中分布在0—60 cm土层内,与该土层土壤温、湿度适宜,通气状况良好,土壤养分充足,适合根系生长有关;也因为深层次土壤紧实度较大会阻碍根系的向下生长,这一结果与李玉鼎、樊巍等[19-20]的研究结果一致。李玉鼎等[19]在宁夏引黄灌区调查苹果根系的垂直分布状况,结果为0—20 cm土层的根系比例为5%左右,20—50 cm土层的根系比例为20.2%,50—80 cm土层的根系比例为42.9%,80—100 cm土层的根系比例为31.9%;樊巍[20]等对苹果、小麦复合系统根系分布格局与生长动态的研究表明,4年生苹果根系垂直分布可达100 cm,其主要分布在20—60 cm土层,可占总根量的80%。本研究发现,行间三叶草与覆膜处理下根长密度、根体积与根表面积均高于对照,是由于行间种植三叶草与覆膜处理下,土壤蚯蚓数量、微生物数量等微环境及土壤理化性状发生改变,有利于梨树根系的生长发育[21]。在表层土壤中,覆膜条件下梨树根长密度、根表面积、根体积均高于对照处理,由于覆膜改善了土壤的水分和温度环境,提高了根系活力,从而增加了根系生长速度,使根系数量增多[22-23]。在整个空间分布下,行间三叶草处理下梨树总根长、根总表面积和根总体积最大,一方面三叶草具有强大的根系,根系生长过程中的凋落物,根系分泌物等可以疏松土壤,较土壤结构得到改善,降低了梨树根系穿透阻力,使根系生长迅速。取样过程中在梨树根系密度最大区域发现三叶草根系的存在;另一方面是由于三叶草具有固氮作用,能够增加土壤有机质和养分含量[24-26],为梨树根系生长提供营养来源,促进根系生长,在取样过程中通过形态学上的差别来区分梨树根系和三叶草根系,避免样品混入三叶草根系影响对梨树根系的统计。

细根是根系中木质化程度较低,直接与根尖连接,具有吸收水分和养分功能的那部分根系。本文结果表明,梨树根系数量以小于1 mm的根系最多,1～3 mm次之,3 mm以上的最少。根系数量、组成和分布情况与梨树产量有密切关系,Caldwell等[27]研究认为,根系的动态主要是细根的动态,维持细根的生理生态功能主要是保持细根的吸收能力,本研究结果表明,在梨园根系中,根径小于1 mm细根数量占总根量的95%,维持如此庞大的细根数量和极强的根系生理活性能够有效吸收和固定养分,为地上部生长提供强有力的动力[28],保证了梨树水分、养分的供应和正常生长,而且行间三叶草、覆膜处理与对照处理相比,0～1 mm的根系的根长、根表面积和数量较多,大于3 mm的粗根数量较少,说明行间三叶草与覆膜处理能够相对增加梨树的吸收根。细根的数量在垂直方向上主要集中在20—60 cm土层,水平方向上主要集中在距树干30—90 cm范围内,说明根系的生理活动主要集中在此区域。因此,距树干30—90 cm,在土壤20—60 cm土层内的根系生理活性的高低对梨树地上部的生长极为重要,提高此范围内根系生理活性可促进地上部生长。大多数果农习惯施肥于表层,这样会造成表层土壤肥沃,而底层土壤缺肥,诱导果树根系向上生长,不利于根系下扎,造成根系上翻现象,进而导致果树抗旱性和抗寒性差。因此在生产上,依据梨树根系的分布特征,施肥时以距主干30—90 cm,施肥深度20—60 cm为宜,这样既可以促进梨树根系的生长,提高根系生理活性,又可减少肥料流失,提高肥料利用率。

参考文献:

[1] 杨洪强, 束怀瑞. 苹果根系研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Yang H Q, Shu H R. Apple root reseach[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[2] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiol., 1995, 109: 9-13.

[3] Lynch J P, Brown K M. Topsoil foraging: an architectural adaptation to low phosphorus availability[J]. Plant Soil, 2001, 237: 225-237.

[4] Lehmann J. Subsoil root activity in tree-based cropping systems [J]. Plant Soil, 2003, 225: 319-331.

[5] Smit A L. Bengough A G, Engels C *et al*. Root methods. A handbook[M]. Berlin: Springer, 2000. 147-233.

[6] Johnson J M-F, Allmaras R R, Reicosky D C. Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizsdeposits using the national grain-yield database[J]. Agron. J., 2006, 98: 622-636.

[7] 薛丽华, 段俊杰, 王志敏, 等. 不同水分条件对冬小麦根系时空分布、土壤水利用和产量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5296-5305.
Xue L H, Duan J J, Wang Z M *et al*. Effects of different irrigation regimes on spatial-temporal distribution of roots, soil water use and yield in winter wheat[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30 (19): 5296-5305.

[8] Asady G H, Smucker A J M. Compaction and root modifications of soil aeration[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53: 251-254.

[9] Gregory P J. Root growth and activity[A]. Boote K J, Bennett J

M, Sinclair T R, Paulsen G M (eds). Physiology and determination of crop yield[M]. Madison, Wisconsin: Am. Soc. Agron., 1994. 65-93.

[10] Tanasescu N, Paltineanu C. Root distribution of apple tree under various irrigation systems within the hilly region of Romania[J]. Int. Agrophy., 2004, 18: 175-180.

[11] 郝仲勇, 杨培岭, 刘洪禄, 姚春梅. 苹果树根系分布特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3 (6): 63-66.
Hao Z Y, Yang P L, Liu H L, Yao C M. Experimental investigation on root system distribution of apple tree[J]. J. China Agric. Univ., 1998, 3 (6): 63-66.

[12] 王进鑫, 王迪海, 刘广全. 刺槐和侧柏人工林有效根系密度分布规律研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24 (12): 2208-2214.
Wang J X, Wang D H, Liu G Q. Distribution characteristics of effective root density in the planted *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* forest site[J]. Acta Bot. Bor.-Occid. Sin., 2004, 24 (12): 2208-2214.

[13] Bohm W. 根系研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 8-73.
Bohm W. Methods of studying root systems[M]. Beijing: Science Press, 1985. 8-73

[14] 徐艳如. 桃根系分布特点及其对不同施肥处理的反应[D]. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文,2011.
Xu Y R. Peach root distribution character and its response to different kinds of fertilizer[D]. Tai'an: Ms thesis of Shandong agricultural university, 2011.

[15] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents[J]. PNAS, 1997, 94: 7362-7366.

[16] Farrish K W. Spatial and temporal fine root distribution in three Louisiana forest soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1991, 55(6): 1752-1757.

[17] 王冉, 李吉跃, 张方秋, 等. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31 (1): 98-106.
Wang R, Li J Y, Zhang F Q *et al*. Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(1): 98-106.

[18] Sokalska D I, Haman D Z, Szewczuk A, Sobota J, Deren D. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system[J]. Agric. Water Manag., 2009, 96: 917-924.

[19] 李玉鼎, 刘彦宁, 吴国平, 马晖. 宁夏灌区苹果根系生长动态的观察[J]. 园艺学报, 1993, 20(4): 394-396.
Li Y D, Liu Y N, Wu G P, Ma H. Observation of growth processes of apple tree's root systems in the irrigated areas of Ningxia[J]. Acta Hort. Sin., 1993, 20(4): 394-396.

[20] 樊巍, 卢琦, 高喜荣. 果农复合系统根系分布格局与生长动态研究[J]. 生态学报, 1999, 19 (6): 860-863.
Fan W, Lu Q, Gao X R. Distribution pattern and growing dynamics of the roots system in apple wheat intercropping system[J]. Acta Ecol. Sin., 1999, 19(6): 860-863.

[21] 李艳丽, 赵化兵, 谢凯, 等. 不同土壤管理方式对梨园土壤微生物及养分含量的影响[J]. 土壤, 2012, 44 (5): 788-793.
Li Y L, Zhao H B, Xie K *et al*. Effects of different soil managements on pear orchard soil biological properties and nutrient contents[J]. Soils, 2012, 44(5): 788-793.

[22] 李艳丽, 董彩霞, 徐阳春. 土壤管理方式对梨园土壤性状及树体生长的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(6): 75-81.
Li Y L, Dong C X, Xu Y C. Effects of different soil management on soil properties and pear tree growth[J]. J. Nanjing Agric. Univ., 2012, 35(6): 75-81.

[23] 欧毅, 王进, 王银合, 等. 覆盖对山地甜柿园土壤性状及树体生长结果的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14 (2): 158-162.
Ou Y, Wang J, Wang Y H *et al*. Effect of mulch on soil characteristics, tree growth and fruiting in mountain persimmon orchard[J]. Acta Agric. Bor.-Occid. Sin., 2005, 14(2): 158-162.

[24] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤养分的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34 (2): 477-478.
Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y *et al*. Effects of interplanting of herbage on soil nutrient of non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau[J]. Acta Hort. Sin., 2007, 34(2): 477-478.

[25] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2007, 16 (2): 32-39.
Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y *et al*. Effects of interplanted herbage on soil properties of non-irrigated apple orchards in the Loess Plateau[J]. Acta Prat. Sin., 2007, 16(2): 32-39.

[26] 李永娥. 冬枣园间作白三叶草对枣园生态和树体生长的效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2006.
Li Y E. Studies of intercropping white clover grazing in Chinese winter date orchard on ecology benefit and tree growth[D]. Tai'an: Ms thesis of Shandong Agricultural University, 2006.

[27] Aldwell M M, Pearcy R W. Exploitation of environmental heterogeneity by plants: Ecophysiological processes above and below Ground[M]. San Diego: Academic Press, 1994.

[28] 李彩霞, 孙景生, 周新国, 等. 隔沟交替灌溉条件下玉米根系性状及结构分布[J]. 生态学报, 2011, 31 (14): 3956-3963.
Li C X, Sun J S, Zhou X G *et al*. Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(14): 3956-3963.