

秦白杨 1 号新品种扦插技术研究

张 路,樊军锋\*

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**筛选优化适于秦白杨扦插繁殖的最佳条件,提高秦白杨扦插成活率。试验通过设计  $L_9(3^4)$  正交试验,选取扦插时间、插穗长度、生根粉浓度、灌溉次数 4 个因素,在不同因素水平下,观察秦白杨扦插成活率及其生长量,采用极差分析法对试验数据进行分析,得到扦插时间在 3 月 17 日、插穗长度 18 cm、生根粉浓度 3.2 g/L、灌溉次数 4 次为增加秦白杨生长量的最佳扦插条件;扦插时间在 3 月 22 日、插穗长度 18 cm、生根粉浓度 3.2 g/L、灌溉次数 4 次为提高秦白杨成活率的最佳扦插条件。本试验是秦白杨扦插技术的初步研究,以期能为构建秦白杨种苗繁育有效技术提供重要依据。

**关键词:**秦白杨;扦插;直观分析法;因素

**中图分类号:**S792.11      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2018)04-0111-05

Cutting Technology of the Poplar Cultivar Qinbaiyang

ZHANG Lu, FAN Jun-feng\*

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The objectives of this study were to screen the best conditions for the optimization of cutting propagation a poplar cultivar Qinbaiyang, and to enhance the survival rate of the cuttings. Orthogonal test design  $L_9(3^4)$  was adopted with four variables of cutting time, cutting length, concentration of the rooting powder (ABT), irrigation times. The survival rate and growth of Qinbaiyang cottage were observed under the different factor levels. Range analysis method was use to analyze the data obtained. The optimal conditions favorable to the growth of the seedlings were found as cutting time: March 17, 1 length of cuttings: 8 cm, ABT concentration: 3.2 g/L, irrigation times: 4 times; while those favorable for the survial rate of the cuttings were cutting time: on March 22, 18 cm length of cuttings, ABT concentration of 3.2 g/L, 4 times of irrigation. This preliminary result would provide technological support for the breeding poplar cultivar Qinyang.

**Key words:** Qinbaiyang; cutting; intuitive analysis; factor

白杨派(Sect. *Populus*) 树种为我国西北乡土杨树种,是重要的工业用材林和生态防护林树种,其发挥着巨大的经济效益、生态效益和社会效益<sup>[1-2]</sup>。白杨派内种间杂交可配性高,配合力较好,种间杂交能力强且具有分布广、抗逆性强等特征<sup>[3]</sup>。秦白杨品种为西北农林科技大学历时 12 a 时间的杂交选育,并于 2014 年春通过陕西省林木良种审定,其是

从 I-101(意大利银白 *P. alba*) $\times$ 84K(南韩银腺 *P. alba* $\times$ *P. glandulosa*)优势杂交组合中选育出的优良品种,具有材质优良、抗寒、抗旱性强等优点<sup>[4-5]</sup>。

在杨树生产过程中,有性繁殖在杨树生产中曾有应用。但由于子代性状分离严重,很快被淘汰,生产中全为无性繁殖,其中研究最多的就是扦插繁殖<sup>[6]</sup>。扦插繁殖是根据植物细胞的全能性原理,采

收稿日期:2017-11-01    修回日期:2018-01-08  
基金项目:“十三五”国家重点研发计划林业资源培育及高效利用技术创新重点专项(SQ2016YFNC030041)。  
作者简介:张 路,男,在读硕士,研究方向:林木遗传育种林业生物技术。E-mail:1466763338@qq.com  
\* 通信作者:樊军锋,男,博士,教授,研究方向:杨树新品种选育及油松遗传改良。E-mail:fanjf28@163.com

用植物的营养器官进行无性繁殖的技术,具有简单易行、繁殖系数高、苗木初期生长快等特点<sup>[7-8]</sup>。为了加快秦白杨优良品种的生产与推广,实现西北地区杨树丰产林的营建,本试验从扦插时间、插穗长度、生根粉浓度、灌溉次数 4 个影响秦白杨扦插生长的因素设计正交试验,拟筛选出秦白杨扦插繁育的最佳条件,从而提高其扦插苗生长量及成活率,为秦白杨大面积的推广提供理论依据。

## 1 试验区概况

试验地位于陕西省周至县富仁乡境内,其属于西北农林科技大学林学院渭河试验站。该地区属于暖温带气候,地处 34°12'N,108°17'E,海拔 400 m 左右,年日照时数 1 999 h,极端最低气温-18.1℃,极端最高气温 42.4℃,年平均气温 13.3℃,年降水量 715 mm,无霜期 219 d,年平均相对湿度为 72%,土壤系渭河冲积形成的沙质壤土,保水性能较差。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料 with 处理

试验材料为秦白杨 1 号杨(I-101×84K),分别于 3 月 16 日、3 月 21 日、3 月 27 日,挑选取苗高为 2.5~3.0 m 且直径约为 1.5~2.0 cm 的 1 年生苗干作种条,剪取插穗,并将插穗浸泡于水中 12 h,使插穗不会因为缺水而失去活力,充分吸水后用于扦插。试验选取扦插时间、插穗长度、生根粉浓度、灌溉次数 4 个因素,每个因素设置 3 个水平,采用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交表设置正交试验(表 1)。(材料均采自西北农林科技大学渭河试验站)

### 2.2 试验方法

杨树大田扦插育苗时间一般为 3 月中旬<sup>[9-10]</sup>。插穗长度适宜范围在 10~25 cm,于扦插前一天剪

取插穗,并将插穗浸泡于水中。插穗扦插前用不同浓度的生根粉浸泡插条形态学下端 1 h,扦插过程中将形态学下端插入土壤,并确保地面上留有嫩芽,使插穗可以正常生长。插穗扦插后马上灌溉基水并于 5 月上旬之前完成所有灌溉次数。试验共 9 个处理,每处理取 30 个插穗。

表 1 正交试验 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)设计

Table 1 The design of orthogonal test L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)

处理	扦插时间	插穗长度/cm	生根粉浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	灌溉次数
1	1(3 月 17 日)	1(12)	1(0.00)	1(2)
2	1(3 月 17 日)	2(15)	2(1.60)	2(3)
3	1(3 月 17 日)	3(18)	3(3.20)	3(4)
4	2(3 月 22 日)	1(12)	2(1.60)	3(4)
5	2(3 月 22 日)	2(15)	3(3.20)	1(2)
6	2(3 月 22 日)	3(18)	1(0.00)	2(3)
7	3(3 月 28 日)	1(12)	3(3.20)	2(3)
8	3(3 月 28 日)	2(15)	1(0.00)	3(4)
9	3(3 月 28 日)	3(18)	2(1.60)	1(2)

### 2.3 数据调查与处理

杨树插穗一般在 5 月中旬完成生根,于 6 月份调查扦插成活率<sup>[11]</sup>;由于株高和地径是反映苗木生长量的 2 个重要指标<sup>[9]</sup>,在 10 月上旬苗木封顶,停止生长,用测高尺测量株高,数显卡尺测量地径,试验数据采用正交试验设计极差分析法并应用 Excel 和 SPSS20.0 分析软件进行统计和分析。

成活率=

$$\frac{\text{成活株数}}{\text{扦插总株数}} \times 100\%$$

(1)

## 3 结果与分析

通过设计 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验,对秦白杨 1 号杨进行不同因素水平处理,统计插穗的成活率,并计算各因素水平处理下秦白杨 1 号杨的平均株高和平均地径,分析不同处理秦白杨的生长差异(表 2)。

表 2 不同试验处理测定结果

Table 2 Results of different tests

处理	扦插时间	插穗长度/cm	生根粉浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	灌溉次数	平均株高/m	平均地径/cm	扦插成活率/%
1	1(3 月 17 日)	1(12)	1(0.00)	1(2)	1.53±0.55	1.09±0.29	70.00
2	1(3 月 17 日)	2(15)	2(1.60)	2(3)	2.07±0.80	1.27±0.53	70.00
3	1(3 月 17 日)	3(18)	3(3.20)	3(4)	2.40±0.79	1.45±0.44	93.33
4	2(3 月 22 日)	1(12)	2(1.60)	3(4)	2.03±0.67	1.09±0.40	80.00
5	2(3 月 22 日)	2(15)	3(3.20)	1(2)	1.90±0.63	1.34±0.35	76.67
6	2(3 月 22 日)	3(18)	1(0.00)	2(3)	1.75±0.72	1.31±0.40	100.00
7	3(3 月 28 日)	1(12)	3(3.20)	2(3)	1.55±0.56	1.06±0.31	80.00
8	3(3 月 28 日)	2(15)	1(0.00)	3(4)	1.59±0.78	1.15±0.39	76.67
9	3(3 月 28 日)	3(18)	2(1.60)	1(2)	1.80±0.93	1.12±0.51	83.33

### 3.1 不同因素及水平对成活率的影响

由表 2 看出,不同因素及水平处理对秦白杨的

扦插成活率有明显差异,对调查数据进行极差分析。由于均值  $k_i$  反映该因素水平  $i$  对成活率的影响,且

成活率越高越好,可以得到,选择扦插时间为 3 月 22 日、插穗长度 18 cm、生根粉浓度 3.2 g/L、灌溉次数 4 次秦白杨扦插成活率最高,为扦插的最佳条

件组合,且通过极差分析 4 个因素的影响效果有明显差异,极差越大,影响越大,得到灌溉次数为影响扦插成活率的主要因素(表 3)。

表 3 不同因素水平对扦插成活率极差分析结果

Table 3 The range analysis results of different factor levels on survival rate of cuttings					
处理	扦插时间	插穗长度/cm	生根粉浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	灌溉次数	扦插成活率/%
1	1(3 月 17 日)	1(12)	1(0.00)	1(2)	70.00
2	1(3 月 17 日)	2(15)	2(1.60)	2(3)	70.00
3	1(3 月 17 日)	3(18)	3(3.20)	3(4)	93.33
4	2(3 月 22 日)	1(12)	2(1.60)	3(4)	80.00
5	2(3 月 22 日)	2(15)	3(3.20)	1(2)	76.67
6	2(3 月 22 日)	3(18)	1(0.00)	2(3)	100.00
7	3(3 月 28 日)	1(12)	3(3.20)	2(3)	80.00
8	3(3 月 28 日)	2(15)	1(0.00)	3(4)	76.67
9	3(3 月 28 日)	3(18)	2(1.60)	1(2)	83.33
K <sub>1</sub>	233.33	230.00	246.67	230.00	
K <sub>2</sub>	256.67	250.00	233.33	223.34	
K <sub>3</sub>	240.00	250.00	250.00	276.66	
k <sub>1</sub>	77.77	76.66	82.22	76.66	
k <sub>2</sub>	85.55	83.33	77.77	74.44	
k <sub>3</sub>	80.00	83.33	83.33	92.22	
极差(R)	7.78	6.67	5.56	17.78	

3.2 不同因素及水平对生长量的影响

由表 2 可知,不同因素及水平处理对秦白杨的平均株高和平均地径有明显差异,采用极差分析法分别对株高和地径的数据进行评价(表 4、表 5),由于均值  $k_i$  反映该因素水平  $i$  对株高或地径的影响,且株高和地径值越大越好,得到扦插时间在 3 月 17 日、插穗长度 18 cm、生根粉浓度 3.2 g/L、灌溉次数

4 次秦白杨株高和地径值最大,为最佳扦插组合水平。

极差反映各因素对株高和地径的影响大小,由表 4 看出对株高的影响由主到次依次为扦插时间、生根粉浓度、灌溉次数、插穗长度;表 5 可以得到对地径的影响由主到次依次为灌溉次数、扦插时间、生根粉浓度、插穗长度。

表 4 不同因素水平对株高极差分析结果

Table 4 The range analysis results of different factor levels on plant height					
处理	扦插时间	插穗长度/cm	生根粉浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	灌溉次数	平均株高/m
1	1(3 月 17 日)	1(12)	1(0.00)	1(2)	1.53±0.55
2	1(3 月 17 日)	2(15)	2(1.60)	2(3)	2.07±0.80
3	1(3 月 17 日)	3(18)	3(3.20)	3(4)	2.40±0.79
4	2(3 月 22 日)	1(12)	2(1.60)	3(4)	2.03±0.67
5	2(3 月 22 日)	2(15)	3(3.20)	1(2)	1.90±0.63
6	2(3 月 22 日)	3(18)	1(0.00)	2(3)	1.75±0.72
7	3(3 月 28 日)	1(12)	3(3.20)	2(3)	1.55±0.56
8	3(3 月 28 日)	2(15)	1(0.00)	3(4)	1.59±0.78
9	3(3 月 28 日)	3(18)	2(1.60)	1(2)	1.80±0.93
K <sub>1</sub>	6.00	5.23	4.87	5.11	
K <sub>2</sub>	5.68	5.37	5.69	5.56	
K <sub>3</sub>	4.94	6.02	5.85	5.95	
k <sub>1</sub>	2.00	1.74	1.62	1.70	
k <sub>2</sub>	1.89	1.79	1.89	1.85	
k <sub>3</sub>	1.64	2.00	1.95	1.98	
极差(R)	0.36	0.26	0.33	0.28	

4 结论与讨论

扦插繁殖是木本植物最经济、简单的育苗方式,也是杨树产业化育苗的常用方法,受许多环境因子

和内在因子的影响,包括湿度、温度、光照条件、插穗年龄、自身遗传性等<sup>[12]</sup>。本试验选取扦插时间、插穗长度、生根粉浓度、灌溉次数 4 因素,每因素设置 3 个水平,采用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交表设计正交试验,试验测

表 5 不同因素水平对地径极差分析结果

Table 5 The range analysis results of different factor levels on ground diameter

处理	扦插时间	插穗长度 /cm	生根粉浓度 /(g·L <sup>-1</sup> )	灌溉次数	平均地径 /cm
1	1(3 月 17 日)	1(12)	1(0.00)	1(2)	1.09±0.29
2	1(3 月 17 日)	2(15)	2(1.60)	2(3)	1.27±0.53
3	1(3 月 17 日)	3(18)	3(3.20)	3(4)	1.45±0.44
4	2(3 月 22 日)	1(12)	2(1.60)	3(4)	1.09±0.40
5	2(3 月 22 日)	2(15)	3(3.20)	1(2)	1.34±0.35
6	2(3 月 22 日)	3(18)	1(0.00)	2(3)	1.31±0.40
7	3(3 月 28 日)	1(12)	3(3.20)	2(3)	1.06±0.31
8	3(3 月 28 日)	2(15)	1(0.00)	3(4)	1.15±0.39
9	3(3 月 28 日)	3(18)	2(1.60)	1(2)	1.12±0.51
K <sub>1</sub>	3.81	3.55	3.55	3.24	
K <sub>2</sub>	3.74	3.64	3.48	3.76	
K <sub>3</sub>	3.33	3.69	3.85	3.88	
k <sub>1</sub>	1.27	1.18	1.18	1.08	
k <sub>2</sub>	1.24	1.21	1.16	1.25	
k <sub>3</sub>	1.11	1.23	1.28	1.29	
极差(R)	0.16	0.05	0.12	0.21	

定结果表明,秦白杨扦插成活率及生长量在相同的外部环境不同因素水平下存在明显的差异,扦插时间在 3 月 17 日、插穗长度 18 cm、生根粉浓度 3.2 g/L、灌溉次数 4 次为增加生长量的最佳扦插条件;扦插时间在 3 月 22 日、插穗长度 18 cm、生根粉浓度 3.2 g/L 且灌溉次数 4 次为提高成活率的最佳扦插条件。

植物自身的遗传性状是决定扦插生根难易的重要因素,品种、种源或无性系不同,其扦插成活率往往也不同<sup>[13-15]</sup>,不同品种之间,最佳扦插繁殖条件也不相同。目前,国内关于杨树扦插繁育的报道虽然很多<sup>[16-19]</sup>,但对于新品种秦白杨系列的扦插技术研究至今无相关报道,本试验是对秦白杨扦插的初步研究,试验结果中适合秦白杨扦插的最佳条件均在试验水平的最高点,今后的试验中将进一步对试验结果进行验证,并扩大试验研究范围,增加试验因素,提高水平梯度,以期能够筛选出更加适合秦白杨扦插的条件,为秦白杨的推广提供理论依据。

参考文献:

[1] 赵曦阳,马开峰,沈应柏,等. 白杨派杂种无性系植株早期性状变异与选择研究[J]. 北京林业大学学报,2012,34(2):45-51.  
ZHAO X Y,MA K F,SHEN Y B,*et al.* Characteristic variation and selection of forepart hybrid clones of *Sect. Populus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012,34(2):45-51. (in Chinese)

[2] 房用,慕宗昭,王月海,等. 16 个杨树无性系蒸腾特性及其影响因素研究[J]. 山东大学学报,2006(6):168-172.  
FANG Y,MU Z Z,WANG H Y,*et al.* Transpiration characteristics and its influencing factors of sixteen polar clones[J]. Journal of Shandong University,2006(6):168-172. (in Chinese)

[3] 澹台湛,李鹏,赵忠,等. 白杨派杂种无性系生根特性研究[J]. 西北植物学报,2005(5):911-916.  
ZHAN T Z,LI P,ZHAO Z,*et al.* Researches on hybrids rooting properties of *Populus* clones[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2005(5):911-916. (in Chinese)

[4] 陈柳晔,史小娟,樊军锋. 秦白杨系列品种木材材性及纤维形态的研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(1):253-258.  
CHEN L Y,SHI X J,FAN J F. Study on properties and fiber morphology of Qinbaiyang series varieties woods[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(1):253-258. (in Chinese)

[5] 李泽涛. 秦白杨等 7 个林木良种通过陕西省审定[J]. 植物医生,2017,30(4):20.

[6] 齐康学,贾小明,张廷桢,等. 石蜡处理插穗提高毛白杨扦插成活与生长的研究[J]. 西北林学院学报,2001(3):23-25,28.  
QI K X,JIA X M,ZHANG T Z,*et al.* Studies on the raising hardwood cuttings survival rate and young plant growth of *Populus tomentosa* by treating cuttings with paraffin wax[J]. Journal of Northwest Forestry University,2001(3):23-25,28. (in Chinese)

[7] 叶彦辉,韩艳英,魏丽萍,等. 北京杨扦插育苗适宜密度研究[J]. 湖北农业科学,2012,51(12):2533-2535.

[8] 郭素娟. 林木扦插生根的解剖学及生理学研究进展[J]. 北京林业大学学报,1997(4):66-71.

[9] 周永学,苏晓华,樊军锋,等. 引种欧洲黑杨无性系苗期生长测定与选择[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004(10):102-106.  
ZHOU Y X,SU X H,FAN J F,*et al.* Growth determination and selection of introduced *Populus nigre* clones in seedling stage[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2004(10):102-106. (in Chinese)

[10] 周永学,樊军锋,蔺林田,等. 杨树杂种无性系苗木生长性状比较研究[J]. 西北林学院学报,2004(4):47-49,67.  
ZHOU Y X,FAN J F,LIN L T,*et al.* Comparing study on of growth traits seedling of *Populus* gross breed clone[J]. Journal of Northwest Forestry University,2004(4):47-49,67. (in

Chinese)

[11] 周永学,符毓秦,樊军锋,等. 84K 杨的生长特性及杂交可配性[J]. 东北林业大学学报,2007(10):11-12,16.  
ZHOU Y X,FU Y Q,FAN J F,*et al.* Growth characteristics and cross ability of poplar 84K[J]. Journal of Northeast Forestry University,2007(10):11-12,16. (in Chinese)

[12] 贾志远,葛晓敏,唐罗忠. 木本植物扦插繁殖及其影响因素[J]. 世界林业研究,2015,28(2):36-41.  
JIA Z Y,GE X M,TANG L Z. Research progress in cutting propagation technology for woody plants and its affecting factors[J]. World Forestry Research, 2015, 28(2): 36-41. (in Chinese)

[13] 何贵平,陈益泰,骆文坚,等. 几种阔叶树种嫩枝扦插繁殖技术研究[J]. 林业科学研,2004(6):810-814.  
HE G P,CHEN Y T,LUO W J,*et al.* Study on the technical of cutting propagation of tender branch for broad-leaf tree species[J]. Forest Research,2004(6):810-814. (in Chinese)

[14] 吴落军. 落羽杉的扦插繁殖技术与生根机理研究[D]. 南京: 南京林业大学,2007.

[15] 王顺财. 楸树嫩枝扦插繁殖技术及其生根机理研究[D]. 南京:南京林业大学,2007

[16] 袁显磊. 黑龙江不同地区杨树扦插苗生长特性的比较[J]. 防护林科技,2014(5):13-16.

[17] 韩艳英,叶彦辉,魏丽萍,等. 不同质量浓度吡啶乙酸对杨树硬枝扦插生根的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(3):81-84.  
HAN Y Y,YE Y H,WEI L P,*et al.* Effect of different concentrations of IBA on rooting capacity of hardwood cuttings of *Populus* spp. [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2012,32(3):81-84. (in Chinese).

[18] 梁军,屈智巍,李忠宁,等. 外生菌根菌和植物生长物质复合制剂对杨树扦插苗生长及抗逆性的效应[J]. 林业科学研究,2005(6):717-721.

[19] 梁立东,杜鹏飞,李守忠,等. 引进俄罗斯杨树新品种硬枝扦插生根能力研究[J]. 林业科技,2012,37(5):1-3.

(上接第 63 页)

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:32-35.

[14] MONTAGNINI F,NAIR P K R. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems [J]. Agroforestry Systems,2004,61:281-295.

[15] HAILE S G,NAIR P K,NAIR V D. Carbon storage of different soil-size fractions in Florida silvopastoral systems [J]. Journal of Environmental Quality,2007,37:1789-1797.

[16] SCHMID I,KAZDA M. Root distribution of norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils[J]. Forest Ecology and Management,2002,159:37-47.

[17] CUEVAS E,BROWN S,LUGO A E. Above and below ground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest[J]. Plant and Soil,1991, 135:257-268.

[18] 刘 聪,项文化,田大伦,等. 中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产”[J]. 植物生态学报,2011,35(5):539-550.

[19] OELBERMANN M,VORONEY R P,THEVATHASAN N V. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and Southern Canadian alley cropping system[J]. Agroforestry Systems,2006,68:27-36.

[20] NAIR P K,KUMAR B M,NAIR V D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2009a,172:10-23.

[21] NAIR P K,NAIR V D,KUMAR B M. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal [J]. Environmental Science & Policy,2009b,12:1099-1111.

[22] ALBRECHT A,KANDJI S T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2003,99:15-27.

[23] ZHANG W,AHANBIEKE P,WANG B J. Root distribution and interactions in jujube tree/wheat agroforestry system[J]. Agroforest System,2013,87:929-939.

[24] 朱首军,张卫. 渭北旱塬花椒-小麦复合系统中林木及作物根系空间分布特征研究[J]. 西北林学院学报,2005,20(1):16-19.  
ZHU S J,ZHANG W. Study on the spatial distribution root system of Chinese prickly ash and wheat agri-forestry in Wei-bei arid-plain area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(1):16-19. (in Chinese)

[25] 许华森,毕华兴,高路博,等. 晋西果农间作系统根系生态位特征[J]. 中国农学通报,2013,29:69-73.

[26] GAO L B,XU H S,BI H X,*et al.* Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China[J]. Plos One,2013,8(7),e70739.

[27] XU H S,BI H X,GAO L B,*et al.* Distribution and morphological variation of fine root in walnut-soybean intercropping systems in the Loess Plateau of China[J]. International Journal of Agriculture and Biology,2013,15:998-1002.

[28] XU H S,BI H X,XI W M,*et al.* Root distribution variation of crops under walnut-based intercropping systems in the Loess Plateau of China[J]. Pakistan Journal of Agriculture Science, 2014,51:773-778.

[29] PENGTHAMKEERATI P,MOTAVALLI P P,KREMER R J. Soil carbon dioxide efflux from a claypan soil affected by surface compaction and applications of poultry litter[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2005,109:75-86.

[30] 王来,高鹏翔,刘滨等. 农田向农林复合系统转变过程中土壤物理性质的变化[J]. 应用生态学报,2017,28(1):96-104.  
WANG L,GAO P X,LIU B,*et al.* Changes of soil physical properties during the conversion of cropland to agroforestry system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(1): 96-104. (in Chinese)

[31] CLEMMENSEN K E,BAHR A,OVASKAINEN O,*et al.* Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest[J]. Science,2013,339:1615-1618.