

根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态\*

周青云 王仰仁 孙书洪  
(天津农学院水利工程系, 天津 300384)

**【摘要】** 采用原位取土法和根系生态监测系统连续两年研究了葡萄的根系空间分布和全生育期根系生长动态,结果表明:葡萄根系在水平方向主要分布在距离树干 100 cm 的范围内,占到总根系的 80% 以上,而且在径向方向呈指数衰减;葡萄根系在垂直方向主要分布在 0~60 cm 范围的土层内,占到总根系的 75% 以上。根系分区交替滴灌条件下干燥区与湿润区根系生长是不同的,葡萄的新生根系受到土壤水分条件的限制和自身生长的影响。在整个生育期,葡萄根系分区交替滴灌两侧根系生长均呈抛物线变化。

**关键词:** 交替灌溉 葡萄根系 生长动态 微根管

**中图分类号:** S152.7<sup>+</sup>5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0059-05

Distribution Characteristic and Growing Dynamic of Grape Vine  
Roots under Alternate Partial Root Zone Drip Irrigation

Zhou Qingyun Wang Yangren Sun Shuhong  
(Department of Hydraulic Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract

The special distribution of root and root growing dynamic in the grape growth period were studied with a core sampling scheme and ET-100 system. The results showed that roots of grape vine centralized in the radial space between 0 and 100 cm, and the amount of the roots accounted for over 80% of total roots. The horizontal distribution of root density of grape vine was minus exponent. The roots of grape vine centralized in the depth between 0 and 60 cm, and the amount of the roots accounted for over 75% of total roots. Under the alternate partial root zone irrigation, the available root of grape vine grew differently in the wetted zone and in the dry zone. It was limited by soil moisture condition and its own growing. The distribution of new root of grape vine was parabola in both the wetted zone and the dry zone.

**Key words** Alternate partial root zone irrigation, Grape root, Growing dynamic, Minirhizotron

引言

研究根系如何吸收土壤水分是研究 SPAC 水分传输机理的重要问题,也是研究田间水分运动必不可少的内容之一。植物的根系分布在整个生育期都是变化的,即根系分布密度在时空上是变化的。灌水方式对于根系的生长发育有很大的影响,其中交替灌溉条件下,果树根系的空間分布及全生育期的根系生长动态都与常规灌溉条件下的根系分布存在

差异,但在许多情况下由于果树本身(树龄、产量、种类、品种)、自然条件和栽培技术的差异,一年中根系生长表现为周期性的变化。因此,了解多年生果树根系分布特征及根系生长动态,是提高交替灌溉条件下土壤水分运动模拟精度的重要问题。

由于根系生长在地面下,所以研究根系的分布比较困难,根系的研究方法主要有挖掘法、整段标本法、土钻法<sup>[1]</sup>、剖面法、玻璃壁法等破坏性大的方法。微根管法是一种非破坏性野外观察细根动态的

收稿日期: 2010-11-08 修回日期: 2011-03-07  
\* 国家自然科学基金资助项目(50679081,50679055)  
作者简介: 周青云,副教授,博士,主要从事节水灌溉原理与技术研究,E-mail: zhouqyand@126.com

方法<sup>[2]</sup>,虽然该方法不可能观测到整个根系的空间分布,但是对于观测细根的精度能满足要求,而且,这种观测方法不会破坏根系和作物。它最大的优点是在不干扰细根生长过程的前提下,能多次监测单个细根从出生到死亡,也能记录细根的生长、生产和物候等特征<sup>[3]</sup>,通过获取细根长度、密度、侧根伸长、生长深度等进行不同土壤层次细根生长动态和物候观察,了解细根生长过程。许多学者已使用微根管法对根系动态进行了研究<sup>[4~7]</sup>。

微根管法能够研究作物的根系生长,但是为了测定的准确性,应该与取土法进行对比校正。本文采用微根管法与原位取土法对比研究根系分区交替滴灌条件下葡萄根系空间分布特征及根系生长动态,为合理建立根系吸水模型及提高根系分区交替灌溉条件下土壤水分运动模拟精度奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

田间试验在甘肃省石羊河流域农业与生态节水试验站进行(N 37°50′49″, E 102°51′01″, 海拔为 1 500 m)。该地区光热资源非常丰富,全年日照时数达 3 000 h 以上,但是水资源相对匮乏,地下水埋深达 25~30 m,多年平均降水量仅为 164.4 mm,而多年

平均水面蒸发量约为多年平均降水量的 12.5 倍,即 2 000 mm 左右,试验地土壤为粘壤土。

### 1.2 试验设计与测定方法

试验在站内的葡萄园进行,葡萄行距为 2.9 m,株距为 1.8 m。试验站葡萄采用根系分区交替滴灌进行灌溉,每次灌水均保证作物根区部分处于干燥状态,本次试验中,交替灌水时间间隔约为 15 d,具体灌水时间见表 1。试验布置如图 1 所示,滴头布置在距离葡萄树 40 cm 处,滴头流量为 4 L/h,每次灌水持续时间为 12 h,一次灌水量均为 48 L。同时设置两种对照灌水方式,一种是常规灌溉方式,另一种是固定一侧灌水方式。

表 1 2005 年和 2006 年试验期间的灌水量  
Tab. 1 Irrigation during experiment in 2005 and 2006

| mm   |      |     |     |      |      |     |     |
|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|
| 年份   | 灌水日期 | 灌水量 |     | 年份   | 灌水日期 | 灌水量 |     |
|      |      | 东侧  | 西侧  |      |      | 东侧  | 西侧  |
| 2005 | 5－10 | 9.2 |     | 2006 | 5－16 | 9.2 |     |
|      | 5－25 |     | 9.2 |      | 5－31 |     | 9.2 |
|      | 6－10 | 9.2 |     |      | 6－12 | 9.2 |     |
|      | 6－26 |     | 9.2 |      | 6－25 |     | 9.2 |
|      | 7－12 | 9.2 |     |      | 7－18 | 9.2 |     |
|      | 7－31 |     | 9.2 |      | 8－17 | 9.2 |     |

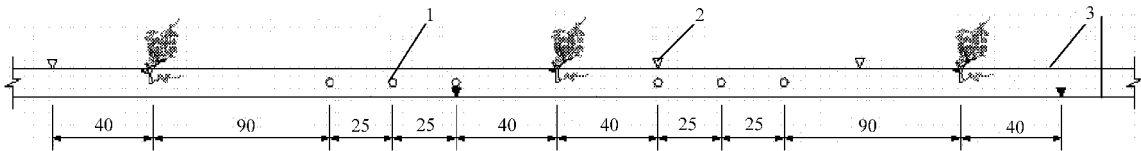


图 1 田间试验布置(单位:cm)  
Fig. 1 Field experiment arrangement  
1. Diviner2000 测管 2. 滴头 3. 毛管

#### 1.2.1 根密度空间分布

于 2005 年 9 月 18 日和 2006 年 9 月 12 日,两次用原位取样量测的方法测定葡萄根系的空间分布情况。在东、西、南、北、东北、西北、东南、西南 8 个方向测定根系的分布情况,取样位置如图 2 所示。试验采用分层取样的方法进行测定,每层为 15 cm,取样大小为 20 cm×20 cm×15 cm,靠近主秆的取样大小为高 15 cm 的棱柱形,取样深度为直到没有葡萄根系为止,在取样过程中,观察到 90 cm 以下几乎没有根系,2005 年取样深度为 105 cm,2006 年取样深度为 120 cm。在南、北方向的取样范围是行距的 1/2,即距离树干约 140 cm,东北、西北、东南、西南四个方向也约为 140 cm,东、西两方向取为株距的 1/2,约 90 cm。取样后依次标记,进行洗根,然后进行扫描分析(Regent Instruments Inc., Canada),得

到直径小于 2 mm(直径小于 2 mm 的根系为吸水根)的根系长度,根系长度除以取样土体体积,由此得到各取样点的根系长度密度。

#### 1.2.2 根系生长动态

ET-100 型根系生态监测系统(即采用微根管技术测定根系生长情况)采用的是非破坏性的测定技术。系统主要由微根管、标定手柄、照相机和计算机组成。试验中,微根管的安装角与水平呈 30°角,管长 200 cm。试验前,在湿润区和干燥区各埋设一个微根管,微根管与葡萄行方向平行,距离葡萄树干 25 cm,试验设有两个重复;常规滴灌条件下埋设一个微根管;固定一侧滴灌条件下,在固定干燥区和固定湿润区各埋设一个微根管。试验的目的是获得 2006 年 5~9 月整个生育期的根系生长动态。试验前,首先用仪器对已知长度的正方形进行拍照,率定

图片所代表的实际长度,试验过程中照相机焦距不变,用 Win Rhizotron 2005a 软件( Regent Instruments Inc. )分析所采集的图片,可以提供根长度、平均直径、投影面积、表面积、根体积、分类数量、每个直径类的根尖数量等。在屏幕上通过图形方式显示根长度分布、面积、体积、根尖数量等,同时提供分析数据的文件,通过计算获得沿管壁的单位面积根长密度。

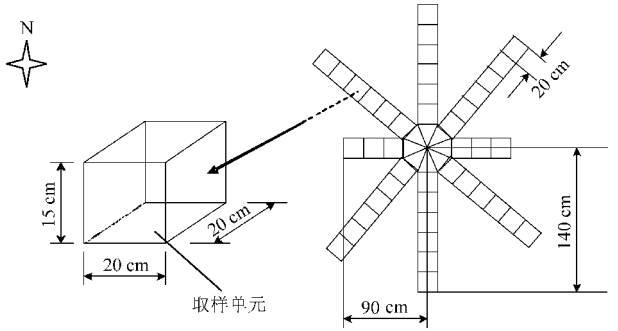


图2 8个方向取样  
Fig.2 Sampled in eight directions

2 结果与讨论

2.1 葡萄树根系密度空间分布特征

2.1.1 一维径向根系密度分布

图3是2005年和2006年两棵葡萄树根系的径向根长密度分布,从图中可以看出,径向根长密度符合指数衰减规律,葡萄树的根系主要分布在径向距离0~100 cm范围内,该范围内根系占到整个根系的80%以上,而且2006年0~40 cm土层范围内根系密度增加很多,主要原因有两个方面:一方面是葡萄根系自身生长的影响;另一方面是土壤水分条件的影响,2005年和2006年的灌水量虽然相等,但2006年的降雨量为186 mm,而2005年的降雨量为56 mm,2006年土壤水分条件要优于2005年的土壤水分条件。

2.1.2 一维垂向根系密度分布

葡萄的吸水根系主要分布在0~60 cm深的土层内。2005年0~60 cm深的土层根系占该方向0~105 cm土层根系的比例分别为:东85.81%,西83.09%,南92.06%,北88.44%,东北77.29%,东南79.75%,西北80.86%,西南92.87%。2006年0~60 cm深的土层根系占该方向0~120 cm土层根系的比例分别为:东85.85%,西89.27%,南84.07%,北87.30%,东北86.81%,东南76.24%,西北74.18%,西南77.84%。这主要是受土壤质地的影响,在60 cm以下土壤质地为料浆石,根系很难穿透。

2.2 交替滴灌条件下葡萄不同根区根系生长特征

2006年5月14日开始用根系生态监测系统测

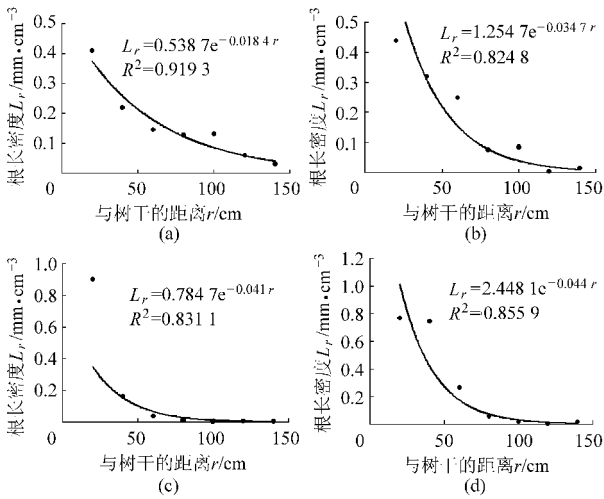


图3 葡萄树径向根长密度分布  
Fig.3 Radial distribution of grape vine root density  
(a) 2005年,树北 (b) 2005年,树南  
(c) 2006年,树北 (d) 2006年,树南

定根系生长,图4是45 cm深度处观测的葡萄细根在全生育期的生长状况,在初期由于根系没有接触到管壁,因而直到6月10日也没有观测到细根,随着根系的生长,细根慢慢接触到管壁。新生的葡萄根系为乳白色,葡萄幼根褐色是由于死亡或衰弱的内皮层细胞的细胞液中释放酚类化合物氧化的结果,从图中可以看出,白色幼根经过20~30 d的生长后颜色变暗,此时认为细根死亡或者对作物吸水贡献较小,前苏联的研究认为木栓化的根系吸水是白色根系的30%,对磷的吸收降低到1%~4%<sup>[8]</sup>。Richards<sup>[9]</sup>研究认为,构成葡萄根系框架的根系直径变化范围是6~100 mm;直径为2~6 mm的根系会向水平和垂直方向生长;在小范围内延伸的根系的直径范围是1~2 mm,这些细根生长速度较快,但会在几周内死亡或消失,只要土壤条件合适,会被新的细根代替,这些细根也是主要的吸水根系。

葡萄白色幼根木栓化常发生在距离根尖1到几厘米的区域内,在温度高、含水率低的情况下,葡萄根系木栓化的速度和程度最高,在干燥土壤中,一些根系完全木栓化,但是即使是经过长时间的干燥后,一旦复水,只要土壤条件合适,根系就会重新活动或产生新侧原基,产生新根并恢复生长。图5是2006年用根系生态监测系统测定的不同根区新生根量的变化,从图中可以看出,6月12日东边灌水后,树东的新根变化量明显大于树西的新根变化量,随后一直到下次东边(7月18日)灌水前,树东根区的新根量虽然一直在增大,但新根变化量却呈下降的趋势。6月25日西边灌水后,树西的新根变化量呈上升的趋势,在7月18日树东灌水后,树东的新根变化量增大而树西新根变化量减少。7月31日左右,因降



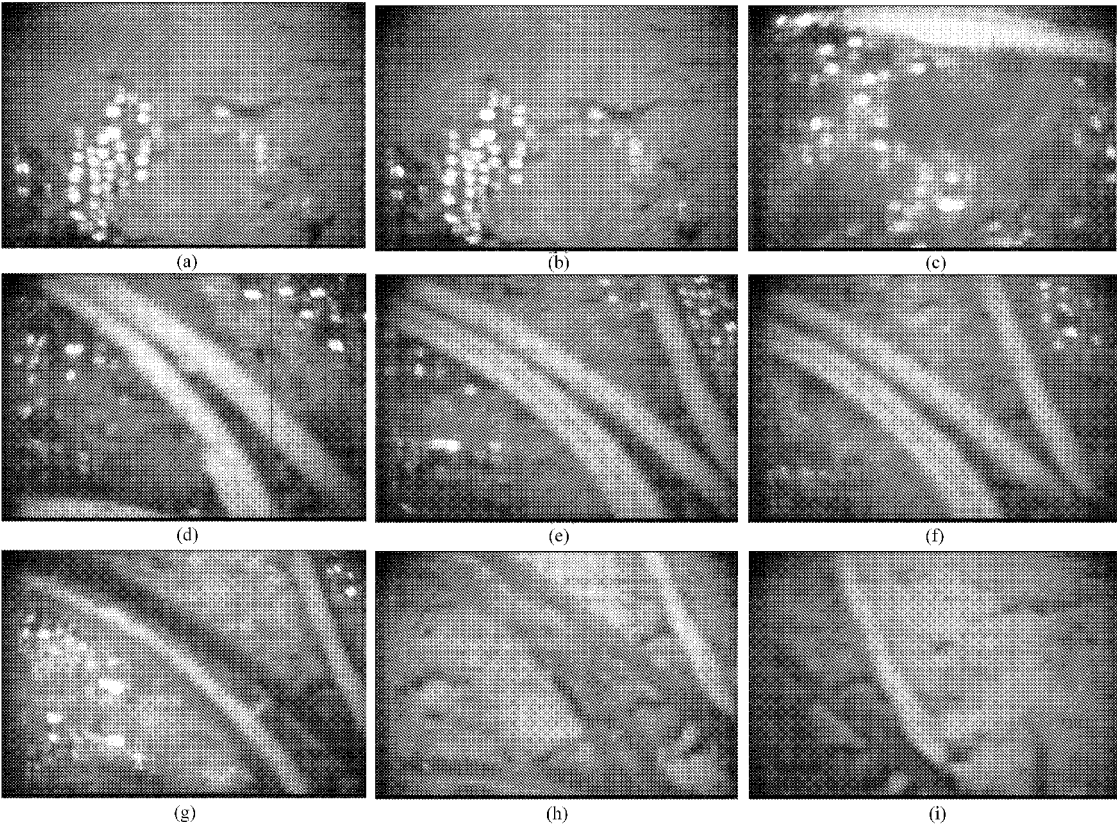


图 4 葡萄细根生长状况

Fig. 4 Growth condition of grape fine roots

(a) 2006-5-14 (b) 2006-6-10 (c) 2006-6-18 (d) 2006-6-27 (e) 2006-7-16  
(f) 2006-7-26 (g) 2006-8-6 (h) 2006-8-29 (i) 2006-9-9

水量较大,为 29 mm,未进行灌溉。灌水明显改善了土壤水分条件,交替灌水使得土壤一部分根区保持干燥,一部分保持湿润,根区湿润能促进细根的生长,而根区干燥又会使根系木栓化,复水后根系重新活动或产生新根。在交替滴灌条件下,总能保证有一部分根系活动,保证作物的正常需水。Van zyl<sup>[10]</sup>的研究表明,葡萄根系在葡萄发芽期开始生长,在开花期生长速率最快,随后生长速率降低,但是在收获后又会增加。2006 年葡萄的开花期是 6 月 11 日~7 月 3 日,图 5 表明,树西根区确实在开花期生长速率最快,新根量增幅最大,但树东在 7 月 15 日~7 月 28 日这段时间生长速率最快,这说明灌水对根系的生长影响很大。开花期后,根系生长速率开始减小,新生根量减少,葡萄是 8 月 25 日开始采摘的,9 月 9 日观测的葡萄根系又有少量的增加,这与文献[11]相吻合。图 6 是交替滴灌条件下全生育期不同根区新根根长密度的变化,其中, $L_1$ 、 $L_2$  分别表示西侧和东侧根长密度函数,随着湿润根区的交替变化,根长密度也在交替变化,最大根长密度出现在 8 月份,为  $0.88\text{ mm/cm}^3$ ,Nagarajah<sup>[12]</sup>的研究认为,葡萄根系在粗颗粒土壤中根长密度为  $0.4\text{ mm/cm}^3$ ,在中等颗粒土壤中根长密度为  $0.8\sim1.0\text{ mm/cm}^3$ ,

在细颗粒土壤中根长密度为  $0.7\sim1.7\text{ mm/cm}^3$ ,与文中的测定结果相符。从图中可以看出,新根根长密度在整个生育期呈二次抛物线变化。

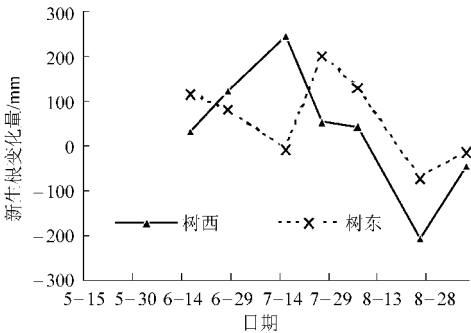


图 5 交替滴灌条件下葡萄不同根区新生根量的变化

Fig. 5 Variation of grape new root in different root zones under alternate drip irrigation

2.3 不同灌水方式对葡萄根系生长的影响

表 2 是不同灌水方式下全生育期新生根根长密度对比。根密度用单位面积根长密度表示,单位面积根长密度与单位体积根长密度的关系为

$$L_v = L_A / D \tag{5}$$

式中  $L_v$ ——单位体积的根长密度,  $\text{mm/cm}^3$   
 $L_A$ ——单位面积的根长密度,  $\text{mm/cm}^2$

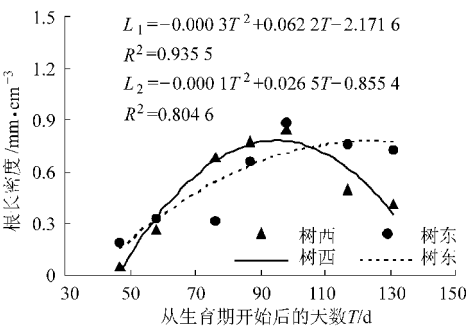


图 6 交替滴灌条件下全生育期不同根区新根密度变化

Fig.6 Variation of new root density in different root zones during grow period under alternate drip irrigation

D——可以代表管壁周围根系的土壤层厚度,mm

文中通过与取土法对比计算得到单位面积根长密度可以代表的土层厚度为 2.3 mm,张志山等<sup>[6]</sup>通过观测柠条根系计算得到土层厚度为 2.6 mm,而且也有研究表明,用微根管观测可以代表的土壤厚度是 2 mm<sup>[13-14]</sup>到 3 mm<sup>[11,15]</sup>之间,本文的研究结果与其相符。

从表 2 可以看出,交替滴灌条件下根长密度最大,常规灌溉次之,固定灌溉条件下根密度最小,而且未灌溉一侧基本上没有观测到新生根。合理的灌水可以适当调节根系中吲哚乙酸(Indole-3-acetic acid,简称 IAA)含量,从而增加根中形成层的活力,有利于根系的生长,增强根系活力<sup>[16]</sup>。根系生长主要受土壤水分、氧气供应量和土壤密度影响,部分根区干燥有利于氧气扩散,因而交替滴灌条件下根长密度较常规灌溉和固定一侧灌溉的湿润根区的根长密度大,固定一侧灌溉干燥根区虽然有利于氧气扩散,但是由于土壤长期处于干燥环境中,土壤干燥而且温度较高,使根系木栓化严重,同时又受到水分胁迫,使根系丧失活力,抑止了根系的生长。

表 2 不同灌水方式下葡萄新生根单位面积根长密度对比

| Tab.2 Comparison of grape new root density in different irrigations |         |         |         |         |
|---------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| mm/cm <sup>2</sup>                                                  |         |         |         |         |
| 日期                                                                  | 灌水方式    |         |         |         |
|                                                                     | 常规滴灌    | 交替滴灌    | 固定滴灌湿润区 | 固定滴灌干燥区 |
| 6-11~6-17                                                           | 0.009 1 | 0.029 5 | 0       | 0       |
| 6-17~6-28                                                           | 0.036 3 | 0.069 2 | 0       | 0       |
| 6-28~7-16                                                           | 0.056 5 | 0.115 6 | 0       | 0       |
| 7-19~7-27                                                           | 0.086 6 | 0.165 4 | 0.021 1 | 0       |
| 7-27~8-7                                                            | 0.100 1 | 0.199 5 | 0.039 1 | 0       |
| 8-7~8-26                                                            | 0.124 6 | 0.143 9 | 0.034 5 | 0       |
| 8-26~9-9                                                            | 0.102 5 | 0.132 0 | 0.040 3 | 0       |

3 结论

(1)葡萄根系在水平方向主要分布在距离树干 100 cm 的范围内,占总根系的 80% 以上,而且沿径向方向呈指数衰减;葡萄根系在垂直方向主要分布在 0~60 cm 范围的土层内,占总根系的 75% 以上。

(2)葡萄根系分布受灌水方式影响较大,交替滴灌条件下根长密度最大,常规灌溉次之,固定灌溉条件下根长密度最小,而且未灌溉一侧基本上没有观测到新生根。

(3)根系分区交替滴灌条件下干燥区与湿润区根系生长是不同的,葡萄的新生根系主要受到两方面的因素影响,一是根系生长受到土壤水分条件的限制,在交替灌水过程中,湿润区的新生根量明显大于干燥区的新根量;二是葡萄根系生长也受到自身生长的影响,即生育期不同根系生长速率也不同,但最大根长密度都是出现在 8 月份,在整个生育期,葡萄根系分区交替滴灌两侧根系生长均呈抛物线变化。

参 考 文 献

1 阎素红,杨兆生,忘俊娟,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.  
Yan Suhong, Yang Zhaosheng, Wang Junjuan, et al. Study on characteristics of root growth in different type of winter wheat cultivar [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(8):906~910. (in Chinese)

2 Johnson M, Tingey D, Phillips D L, et al. Advancing fine root research with minirhizotrons [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 45(3): 263~289.

3 Hendrick R, Pregitzer S. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems [J]. Plant and Soil, 1996, 185(2): 293~304.

4 Rui M, Maria R, Oliveira G. Comparison of tomato root distributions by minirhizotron and destructive sampling [J]. Plant and Soil, 2003, 255(1): 375~385.

5 Ephrath J, Silberbush M, Berliner P. Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores [J]. Plant and Soil, 1999, 209(2): 201~208.

6 张志山,李新荣,张景光,等. 用 Minirhizotrons 观测柠条根系生长动态[J]. 植物生态学报,2006,30(3):457~464.  
Zhang Zhishan, Li Xinrong, Zhang Jingguang, et al. Root growth dynamics of *Caragana korshinskii* using Minirhizotrons [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(3): 457~464. (in Chinese)

(下转第 58 页)

- 18 管孝艳,杨培岭,任树梅,等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009,17(2):196~205.  
Guan Xiaoyan, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Heterogeneity analysis of particle size distribution for loamy soil based on multifractal theory [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(2): 196~205. (in Chinese)
- 19 Li Yi, Li Min, Robert Horton. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions[J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 75~83.
- 20 Bird N, Cruz D M, Saa A, et al. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil [J]. Journal of Hydrology, 2006, 322(1~4): 211~219.
- 21 Caniego F J, Espejo R, Martin M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability [J]. Ecological Modeling, 2005, 182(3~4): 291~303.
- 22 Eghball B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis [J]. Agronomy Journal, 2003, 95(2): 339~346.
- 23 刘继龙,马孝义,张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. 农业工程学报,2010,26(1):81~86.  
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 81~86. (in Chinese)
- 24 Zeleke T B, Si B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69: 1 691~1 702.
- 25 Zeleke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4): 440~452.
- 26 朱磊,周清,王康,等. 基于多重分形理论的土壤水非均匀流动分析[J]. 水科学进展,2009,20(3):392~397.  
Zhu Lei, Zhou Qing, Wang Kang, et al. Analysis of the heterogeneous soil water flow based on the multifractal theory [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 392~397. (in Chinese)
- 27 梁东丽,同延安,Ove Emteryd,等. 壤土土壤剖面中  $N_2O$  浓度的时间和空间变异[J]. 生态学报,2003,23(4):731~737.  
Liang Dongli, Tong Yan'an, Ove Emteryd, et al. Spatial and temporal variation of nitrous oxide concentrations in soil profiles of Manural Loessial Soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 731~737. (in Chinese)
- 28 Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 1 033~1 041.
- 29 Lopes R, Betrouni N. Fractal and multifractal analysis: a review [J]. Medical Image Analysis, 2009, 13(4): 634~649.

(上接第 63 页)

- 7 John A,Christine A. Influences of root diameter, tree age, soil depth and season on fine root survivorship in *Prunus avium* [J]. Plant and Soil, 2005, 276(1~2):15~22.
- 8 张福庆,田卫东. 葡萄根系[J]. 葡萄栽培与酿酒,1997(1):40~43.
- 9 Richards D. The grape root system [M]//Jaruck J. Horticultural reviews. Victoria: The AVI Publishing Company, Inc., 1983.
- 10 Van Zyl J L. Response of grapevine roots to soil water regimes and irrigation systems [M]//Van Zyl J L. The grapevine root and its environment. Pretoria:Department of Agriculture and Water Supply,1988.
- 11 Sanders J,Brown D. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions [J]. Agronomy Journal, 1978,70(6):1 073~1 076.
- 12 Nagarajah S. Effects of soil texture on the rooting patterns of Thompson seedless vines on own roots and on Ramsey rootstock in irrigated vineyards [J]. American Society for Enology and Viticulture, 1987, 38(1):54~59.
- 13 Taylor H,Huck M,Klepper B,et al. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron [J]. Agronomy Journal,1970,62(6): 807~809.
- 14 Steele S,Gower S,Vogel J,et al. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada [J]. Tree Physiology, 1997, 17(8~9): 577~587.
- 15 Itoh S. In situ measurement of rooting density by micro-rhizotron [J]. Soil Science and Plant Nutrition,1985,31(4):653~656.
- 16 唐祚舜,李召虎. 植物根系激素研究[M]//邹琦,王学臣. 作物高产高效物理学研究进展. 北京:科学出版社,1994.