

## 小叶锦鸡儿根系生长对土壤水分和氮肥添加的响应

黄刚<sup>1,2</sup> 赵学勇<sup>1</sup> 苏延桂<sup>1</sup> 黄迎新<sup>1</sup> 崔建垣<sup>1</sup>

(1 中国科学院寒区旱区研究所麦旱沙漠化研究所 2 中国科学院研究生院)

**摘要:**采用微管法结合内生生长袋方法,研究了科尔沁沙地成龄小叶锦鸡儿灌木根系生长动态、根系分布及细根生产对旱季补水和氮肥添加的响应。结果表明:旱季补水,氮肥添加和“水+氮”处理均增加了微管表面的根长密度和细根生产,但只有氮肥添加和“水+氮”对根长密度和细根生产(0~20 cm)有显著影响。在旱季,旱季补水、氮肥添加及“水+氮”均没有显著增加根长密度;在雨季,氮肥添加显著增加了根长密度,同时促进了根系在土壤深层的分布。说明在低氮土壤中,当土壤水分适宜时,提高土壤氮肥有效性有助于沙地灌木的根系生长,提高灌木人工林的稳定性。

**关键词:**根长密度;细根生产;微管;灌木;氮肥;土壤水分

**中图分类号:**S793;S727 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2009)05-0073-05

HUANG Gang<sup>1,2</sup>; ZHAO Xue-yong<sup>1</sup>; SU Yan-gui<sup>1</sup>; HUANG Ying-xin<sup>1</sup>; CUI Jian-yuan<sup>1</sup>. **Responses of fine root growth of *Caragana microphylla* shrub plantation to irrigation and nitrogen addition in a semi-arid region of northern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) **31**(5) 73-77 [Ch. 16 ref.]

<sup>1</sup> Naiman Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, P.R. China;

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P.R. China.

Root growth, distribution and production of a desert shrub in arid and semiarid areas can be regulated by water and nitrogen. We examined the responses of root growth (root length density and fine root production) to short-term irrigation, nitrogen addition and the interaction of irrigation and nitrogen addition in a 21-year-old artificial *Caragana microphylla* Lam. plantation in the Horqin Sandy Land in northern China. Root length density (RLD) and fine root production (FRP) in the growth season were estimated using minirhizotrons and ingrowth cores, respectively. Irrigation, nitrogen addition and their interaction significantly increased RLD (0-140 cm), and FRP (0-20 cm). In dry season, irrigation, nitrogen addition and their interaction did not have significant effects on RLD. In wet season, nitrogen addition had a significant effect on RLD by promoting root distribution into deeper soil layer. These results indicate that in the low N soil condition, root development, distribution and production of desert shrubs are strongly stimulated by N availability when soil water content is in the proper status.

**Key words** root length density; fine root production; minirhizotrons; shrub; nitrogen; soil water

沙地灌木被广泛应用于沙地恢复的实践中,沙地灌木的定植可以固定沙丘表面,蓄积大气降尘和枯落物,改善沙地土壤质量,促进沙地植被的恢复<sup>[1]</sup>。然而,由于沙地贫瘠的土壤肥力和短暂的干旱影响了沙地灌木的生长,威胁着灌木林的稳定性和可持续发展。施肥和旱季补水等措施被用来改善

灌木林的土壤状况,以促进沙地灌木的生长<sup>[2]</sup>。研究表明:增加氮肥和土壤水分使土壤的结构性得到改善,改变植物群落的结构和多样性,增加地上生产力<sup>[3]</sup>。由于根系生长具有趋水性和趋肥性,土壤氮肥和水分的增加会影响根系的生长和分配。了解根系生长和分配对土壤养分和水分增加的反馈,对于

收稿日期:2008-07-14

http://www.bjfujournal.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-431)、中国科学院野外台站基金项目(1737690200015)。

第一作者:黄刚,博士。主要研究方向:根系生态学。电话:0931-4967222 Email: fishofbeiming@tom.com 地址:730000 兰州市东岗西路

360号中科院寒旱所。

©1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

保持沙地灌木林的稳定性,制定合理的灌木林管理措施具有重要意义。

独立增加氮肥或水分对根系生长的影响已有许多报导。一些田间试验发现,增加氮肥会增加、减少或是对根系生长没有影响<sup>[4-5]</sup>。另外,土壤水分是影响根系对氮肥吸收的重要因素<sup>[6]</sup>。然而,目前多数的研究结果都来源于室内水培和盆栽试验。由于培养基质和年龄的差异,野外生长的成年植株对氮肥和水分添加的反应可能不同于盆栽幼苗<sup>[7]</sup>。为此,本研究的目的是:①研究氮肥添加和旱季补水对根长密度和根系生产的影响;②研究氮肥添加和旱季补水对根系分布的影响;③研究氮肥和水分的添加对成年小叶锦鸡儿根系生长是否存在交互作用。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究于2007年4—10月在中国科学院奈曼沙漠试验站进行。奈曼站位于科尔沁沙地西南(42°58'N, 120°43'E),海拔363 m,是沙漠化严重发展的地区之一。该区属温带大陆性半干旱气候,年平均降水量366 mm,主要集中在6—8月,年蒸发量为1 937 mm,干燥度为3.9。根据长期的气象观测7—10月为一年中的雨季,而11月至次年6月为旱季。由于长期发生风蚀,地表形成以沙丘和丘间低地、沙质平地相间分布的地貌类型。

在奈曼站人工林恢复区(面积100 hm<sup>2</sup>),选择12块小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌木林样地。样地均分布于固定沙丘,地形相对平坦(坡度5°),它们均是历次更新之后散生在固定沙丘和丘间低地的片林,灌木林龄在10年左右。样地土壤较为贫瘠,土壤颗粒以砂粒为主(>90%),土壤有机质(3.11 g/kg)、全氮(0.17 g/kg)、全磷(0.09 g/kg)、速效氮(21.19 mg/kg)、速效磷(7.85 mg/kg)含量均很低。样地面积15 m × 15 m,在3个样方内小叶锦鸡儿生长状况相对一致,样地内灌木的密度为3 166 株/hm<sup>2</sup>,植株的平均株高153 cm,冠幅为4.9 m<sup>2</sup>。

### 1.2 试验设计和处理

试验设4个处理,旱季补水(W)、氮肥添加(N)、水+氮(N+W)和对照(CK)。旱季补水处理为:在2007年4月20日—6月20日(干旱期),每隔15 d进行1次透灌(0~50 cm的土壤含水量大于10%),共进行了3次。氮肥采用尿素,氮含量为46%,分两次施用,分别在返青期(5月5日)和拔节期(6月20日)均匀穴施于距植株1 m左右的范围内,施氮水平是20 g/(m<sup>2</sup>·a)。每种处理3个重复,随机分配在12个样方,每个样方内随机选择3株冠幅一致的灌丛,

在距离每株灌丛中心20 cm左右的地方埋设微管。

#### 1.2.1 微管安装及根长密度的计算

2007年4月,每块样地随机安装3根透明有机塑料管,共安装36根(3株×3样方×4处理)。微管内径为5.5 cm,安装时先用直径相当的钢钻,垂直于地面,钻1个140 cm的洞,然后将微管插入,用干沙填充管壁与土体间空隙。为防止光线透入和吸热,地面露出20 cm的部分先用黑色胶布缠绕,再刷白漆,顶端加盖密封。在微管外壁刻划方向线,保证每次取样时,都能够对同一位置进行影像收集。

微管安装3个月之后,从2007年7月1日—9月10日,每隔20 d用CID-600根系动态观测系统对根系进行扫描,试验期间共观测了6次。扫描使用的是Canon Scan 1240U扫描头,每次以彩色200 DPI的分辨率进行扫描,可获取的实际图片大小为21.59 cm×19.56 cm,每根微管需扫描7次,扫描图片中根系的大小即为实际大小,图片以BMP格式保存。收集的图片以CIAS图像分析软件进行分析,将每张图片依照长度按10 cm等分,分别计算每部分的根长和根长强度。另外,根据土钻法获得的根长密度同微管根长强度的相关性,微管表面的根系约代表了微管表面0.26 cm土体内的根系,并据此计算了每根微管总的根长密度和各土层深度的根长密度。

#### 1.2.2 细根生产的估计

于2007年4月20日在各处理样地随机选择6株小叶锦鸡儿,在距离每株灌丛中心20 cm处,用内径8 cm的钢钻,钻出40 cm深的洞。然后筛出土钻中的根系和杂质,将无根的土壤分别装入两个20 cm长,直径8 cm的网袋,埋入洞中,网袋的网眼大小为1 mm<sup>2</sup>。在9月20日将各处理样地中的网袋挖出,每个网袋带回实验室,用清水冲洗。由于难以区分死根和杂质,根据根系的颜色和弹性,分离出所有的活根,将分离出的根系在68℃烘48 h,称重获得细根生物量生产。

#### 1.2.3 数据处理

数据的管理和统计利用SPSS统计分析软件。从微管获得的根长密度数据利用方程 $y = \sqrt{(x+1)}$ 对其进行转换,转换后的数据,可以满足方差分析的要求。应用双因素方差分析施肥和旱季补水对根长密度和细根生产的影响,如果具有统计显著性,则用配对样本 $t$ 检验对处理与对照进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系生长动态对水肥添加的响应

在生长季,不同处理的小叶锦鸡儿灌丛从根长密

度的变化趋势均表现为单峰曲线(图1),这说明小叶锦鸡儿根系生长具有明显的季节变化。对照和氮肥添加处理,最高的根长密度出现在8月,分别为0.62、0.36  $\text{cm}/\text{cm}^3$ ;而旱季补水和“水+肥”处理最高的根长密度出现在7月,分别为0.41、0.67  $\text{cm}/\text{cm}^3$ 。与对照相比,整个生长季,施氮显著促进了小叶锦鸡儿根系的生长( $P < 0.05$ ),整个微管单位表面积的根长密度在试验期间始终高于对照。旱季补水同样促进了根系生长,但根长密度低于施氮处理,与对照相比并没有显著性( $P > 0.05$ )。“水+肥”处理也显著促进了根系生长,并且方差分析表明,旱季补水和氮肥添加具有交互作用( $P < 0.05$ )。

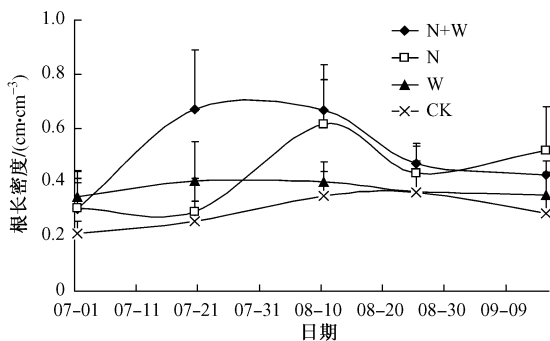


图1 小叶锦鸡儿不同处理下微管表面根长密度的月变化  
FIGURE 1 Monthly variations of root density on minirhizotron tubes under different treatments

### 2.2 根系垂直分布对水肥添加的响应

施氮、旱季补水和“水+肥”处理均促进了根系生长,特别是促进了深层(50~140 cm)的根系生长,然而不同深度,各处理对根系生长的影响并不一致(图2)。对照组根系的垂直分布在整个生长期内没有显著变化,表层(0~40 cm)始终是根系的密集分布区,约占整个剖面的42%。同对照相比,旱季补水主要增加了20~60 cm处的根系。在7月,该层

根系约占整个剖面的55%;8月为45%;9月下降为38%。施肥处理组根系主要聚集在表层0~40 cm,7、8月,该层根系分别占整个剖面的44%、48%;9月,根系在深层具有较大的分布,90~120 cm处的根系约占整个剖面的43%。“水+肥”处理组根系在7月主要分布于表层(0~40 cm);在8、9月则密集分布于40~80 cm处,分别占整个剖面的37%和40%。

### 2.3 细根生产对水肥添加的响应

细根生产具有明显的分层特征(图3)。生长季(5—10月),各处理组0~20 cm的细根生产均高于20~40 cm。0~20 cm旱季补水,氮肥添加及“水+肥”处理的细根生产分别为92.5、136.08和135.18  $\text{g}/\text{m}^2$ ,均高于对照组59.53  $\text{g}/\text{m}^2$ ,但只有施肥及“水+肥”处理组的细根生产显著高于对照( $P < 0.01$ )。20~40 cm细根生产对各处理的反应各异,旱季补水和施肥处理组的细根生产均低于对照组,“水+肥”处理的细根生产则高于对照。

## 3 结论与讨论

### 3.1 根系生长对水肥添加的响应

水分和养分被认为是干旱和半干旱区制约植物生长和植被生产力的最关键因子。整个生长期内,旱季补水和氮肥添加处理组微管表面的根长密度均高于对照。在生长初期,添加氮肥和水分对根长密度并没有显著影响( $P > 0.05$ );在生长后期,添加氮肥对根长密度有显著影响( $P < 0.05$ ),旱季补水对根长密度没有显著影响( $P < 0.05$ )。氮肥对于细根生产的影响有两种观点,一种认为随氮有效性的提高,细根生产降低;另一种认为随氮有效性的提高,细根生产保持不变<sup>[4-5,7]</sup>。细根生产与氮有效性的关系与每个树种各自有效氮的适应范围,以及土壤中有氮含量的高低相关。Son等<sup>[8]</sup>人发现溶液

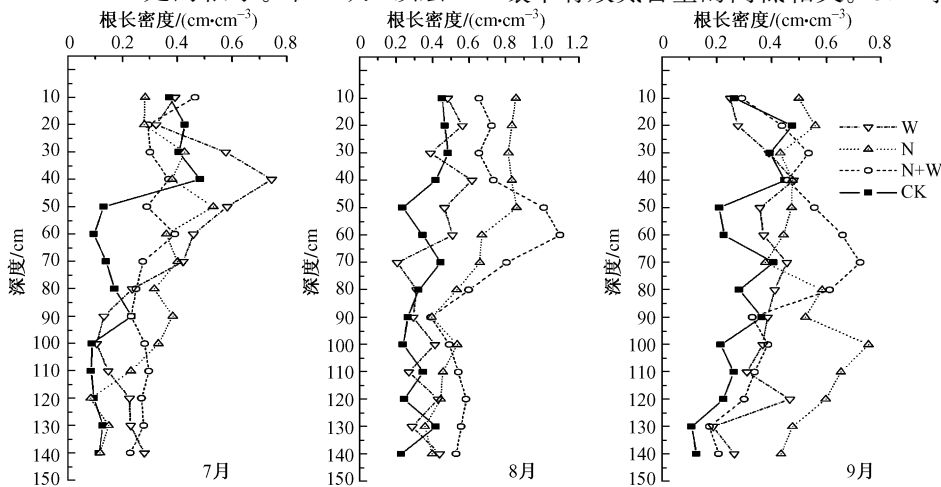


图2 不同处理下根长密度在7、8和9月的垂直分布

FIGURE 2 Root length density in July, August and September in 2007 under different treatments

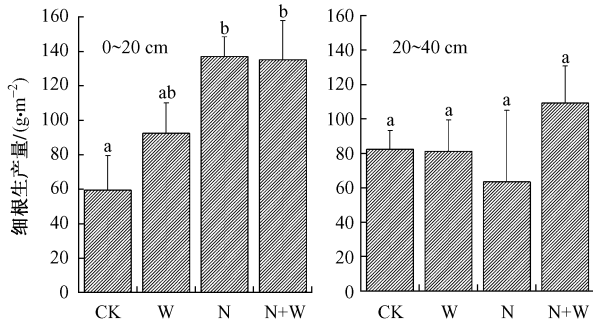


图3 小叶锦鸡儿在不同处理下的细根生产

FIGURE 3 Fine root production of *C. microphlla* in two depth under different treatments

培养的山毛榉 (*Fagus sylvatica*) 幼苗的根系增长在中等供氮情况下将会增加,但在高氮供应下将会减少。Stober 等<sup>[5]</sup>人比较了 5 个不同的气候和大气氮沉降样点上挪威云杉 (*Picea abies*) 和山毛榉对内生长袋添加氮素的反应,结果显示只有在低氮沉降的样点上根系生长同氮素添加具有正相关关系。许多根系对氮素有效性反应的结果来源于对森林演替的研究,一些结论认为在演替后期土壤中有效氮含量的增加促进了林木的细根生产,可是这些结果中树木的年龄本身会对细根生产产生影响,因此,需要相关的控制土壤水分和氮肥的试验。以往对科尔沁沙地草地恢复的施肥试验表明,氮肥是区域草地生态系统生产力的限制性因子之一,该区土壤的氮矿化速率为  $20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,灌木在生长阶段有可能会发生氮素缺乏<sup>[2]</sup>。本研究的氮肥为  $20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,同以往的氮肥添加试验相比属于中等水平供氮。因此同以往该区域地上部分的研究结果相一致,氮素添加促进了地下根系生长。在生长初期根系生长没有达到显著程度,可能是因为这一时期是旱季,土壤水分极低,添加的氮肥不能通过水分的下渗、扩散而被植物吸收。

对研究区土壤水分的调查表明:7 月之前小叶锦鸡儿样地土壤体积含水量的平均值为 2.2%;5 月 0~30 cm 的土壤含水量甚至低于萎蔫系数 (1.55%)。对照处理组植物处于干旱情况下,而旱季补水组植物通过补水避免了干旱胁迫。旱季补水后对根系的观测结果表明:经历了干旱的对照处理组植物的根长密度低于旱季补水组。尽管旱季添加水分对根系生长的影响小于氮肥,然而根据整个生长季根系的生长动态,雨季微管表面的根长密度要高于旱季,可见水分对小叶锦鸡儿根系生长具有促进作用。在快速生长期(7 月 10—8 月 30),水分和氮肥的共同作用显著高于对照,而且高于单独添加水分和氮肥的处理,水分和氮肥的交互作用明显。这一结果同田间试验的结果相一致,李秧秧等<sup>[9]</sup>对

玉米田间的水肥互作研究表明,在高水分情况下,根系具有更大的氮利用率。于占源等<sup>[2]</sup>人对科尔沁沙地草地施肥的试验也表明,在水氮共同作用下植被地上生产力和土壤呼吸都具有最大值。

同许多研究结果一致,小叶锦鸡儿根系生长动态具有明显的季节波动。研究区降雨分配不均,7 月中旬之前为旱季,之后至 10 月之间为雨季。对照处理和氮肥添加处理根长密度的最大值出现在强降雨后 10 d 左右,而旱季补水和“水+肥”处理最大值提前出现在雨季前,最小值均出现在旱季。添加氮肥没有影响根系生长的物候,而旱季补水将根系生长的峰值提前至雨季之前(20 多天)。研究区的春季是一年中最早的季节,整个旱季持续至 6 月下旬。草本植物适应于这种特殊的环境,一般采取推迟萌发,直至强降雨的发生才会大批萌发和生长;而灌木在旱季处于缺水状态,在雨季开始时为了同草本竞争又需将大量的同化物优先分配给地上部,因此小叶锦鸡儿根长密度的最小值发生在春季。科尔沁沙地雨热同期,土壤养分在雨季会因土壤水分的增加和再分配,变得有利于植物吸收,雨季是根系生长最活跃的时期。

### 3.2 根系分布对水肥添加的响应

许多对树木根系垂直分配的研究认为大部分的细根都分布在土壤上层 0~30 cm 的剖面<sup>[10]</sup>。Safford 等<sup>[10]</sup>报导 39 年生的云杉 (*Picea asperata*) 有 87% 的细根分布在上部 15 cm 的土壤中。Badu 等<sup>[11]</sup>人研究思茅松 (*Pinus kesiya*) 林中有 77% 的细根分布在上部 20 cm 土层中。本研究中对照区 0~40 cm 的根系约占整个剖面的 42%,始终是根系的密集分布区,旱季补水增加了表层的根系生长,表层根系约占整个剖面的 50%。在旱季,施氮肥和“水+肥”处理表层的根系依然占有很高的比例(34%);进入雨季,根系的密集分布区随时间逐渐下移,8 月在地下 60 cm 附近,9 月在地下 70 cm 附近。这个结果证明在氮肥和水分增加的情况下植物根系会增加深层根系的比例。相对应,植物根系偏向生长在表层土壤中,则主要是因为表层具有较好的通气性、低的容重和较高的有机质和氮、磷等养分元素。

### 3.3 细根生产对水肥添加的响应

0~40 cm 对照区细根的生产量仅  $142 \text{ g}/\text{m}^2$ ,这个值在 Vogt<sup>[12]</sup>总结的全球地下细根生产的范围内 ( $43 \sim 823 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )。通常在 Al 和 Fe 离子含量较高的热带和亚热带的森林具有较高的细根生产,我们的结果相应偏低。一方面我们的结果仅代表了整个生长季内的细根生产(6 个月);另一方面,细根生产量同植物种类、温度和降雨具有显著关系<sup>[13-15]</sup>

同其他灌木比较, Numa 等<sup>[14]</sup>在墨西哥沙地中测得的灌木的年生产量在  $971 \text{ g/m}^2$ ; 而 Caldwell 等<sup>[15]</sup>在北美的寒冷沙漠中灌木的年生产量在  $1\ 880 \sim 1\ 900 \text{ g/m}^2$ ; 另外 West 等<sup>[16]</sup>在其他沙漠测得的值仅有  $77 \sim 730 \text{ g/m}^2$ 。科尔沁沙地降雨稀少, 冬、春季节地下  $10 \text{ cm}$  会形成冻土层, 灌木的年生长期仅有 6 个月, 因此细根的生产量较低。

### 参 考 文 献

- [1] ZHAO H L, ZHOU R L, SU, Y Z, *et al.* Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31, 1-8.
- [2] 于占源, 曾德慧, 姜凤歧, 等. 半干旱区沙质草地生态系统碳循环关键过程对水肥添加的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4), 45-50.
- [3] STEVENS M H H, SHIRK R, STEINER C E. Water and fertilizer have opposite effects on plant species richness in a mesic early successional habitat [J]. *Plant Ecology*, 2006, 183, 27-34.
- [4] GOWER S T, VOGT K A, GRIER C C. Carbon dynamics of rocky mountain Douglas-fir: Influence of water and nutrient availability [J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62, 43-65.
- [5] STOBER C, GEORGE E, PERSSON H. Root growth and response to nitrogen [M]//SCHULZE E D. *Ecological studies: Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems*. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [6] SUN O J, SWEET G B, DAVIS M R. Comparative mineral nutrition of *Nothofagus solandri* var. *cliffortioides* (Hook. f.) Poole and *N. menziesii* (Hook. f.) Oerst. seedlings [J]. *New Zealand Journal of Forest Science*, 2001, 31, 157-169.
- [7] PAGES L, PELLERIN S. Study of differences between vertical root maps obtained using a model for the three dimensional architecture of the root system [J]. *Plant and Soil*, 1996, 182, 329-337.
- [8] SON Y, HWANG J H. Fine-root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantation in central Korea [J]. *Ecology Research*, 2003, 18, 339-346.
- [9] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1), 13-15.
- [10] SAFFORD L O, BELL S. Biomass of fine roots in a white spruce plantation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, 2, 169-172.
- [11] BADU J, HARENDRA N P, RADHEY S T. Vertical distribution and seasonal changes of fine and coarse root mass in *Pinus kesiya* Royle Ex-Gordon forest of three different ages [J]. *Acta Oecol*, 2001, 22, 293-300.
- [12] VOGT K A, VOGT D J, PALMIOTTO P A, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species [J]. *Plant and Soil*, 1996, 187, 159-219.
- [13] WEST J B, ESPELETA J E, DONOVAN L A. Fine root production and turnover across a complex edaphic gradient of a *Pinus palustris*-*Aristida stricta* savanna ecosystem [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 189, 397-406.
- [14] NUMA P, OSCAR B. Root distribution, standing crop biomass and belowground productivity in a semidesert in México [J]. *Plant Ecology*, 2000, 146, 131-136.
- [15] CALDWELL M M, CAMP L. Belowground productivity of two cool desert communities [J]. *Oecologia*, 1974, 17, 123-130.
- [16] WEST N E. Colorado Plateau-Mohavian blackbrush semidesert [M]// WEST N E. *Temperate desert and semidesert: Ecosystems of the world* 5. New York: Elsevier, 1983.

(责任编辑 赵 勃)