

黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征^{*}

李 鹏^{1,2*} 李占斌^{1,2,3} 澹台湛²

(¹ 西北农林科技大学, 杨凌 712100; ² 西安理工大学, 西安 710048; ³ 中国科学院 水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

【摘要】 采用土钻法研究了黄土高原不同退耕年限和天然草地植被根系的垂直分布特征. 结果表明, 样地上不同采样点间的根系分布不存在显著差异, 根系指标的合并计算结果可以代表立地上植被根系的分布特征. 植被根系生物量、根系长度等指标的垂直分布特征均表现出随着深度增加而减少的趋势; 随着退耕年限的增加, 植被根系的生物量、根系长度等指标逐渐增加, 一般在退耕年限超过 20 年后, 植被根系的分布特征接近天然草地的根系分布特征. 随着退耕年限的增加, 根系消失系数从 0.98 逐渐降低到 0.96, 说明植被在深层土壤中的相对含量逐渐减少, 根系逐渐集中在 0~40 cm 的表层土壤中. 退耕植被根系分布特征的改善提高了土壤理化性质, 有利于新物种入侵和植被演替进行.

关键词 土钻法 根系指标 根系生物量 根系消失系数 退耕地 黄土高原

文章编号 1001-9332(2005)05-0849-05 中图分类号 Q944.54;S157 文献标识码 A

Dynamic distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess Plateau. LI Peng^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2,3}, TANTAI Zhan² (¹Northwest SciTech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; ²Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China). - Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(5): 849~ 853.

The investigation on the vertical distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned and natural grasslands of Loess Plateau by the method of soil auger showed that there were no significant differences in root system distribution patterns between different sampling points, and the related root indexes could be used to indicate the vertical distribution characters of vegetation roots. The main root indexes including root biomass and root length were decreased with increasing soil depth, but increased with increasing abandoned years. After a abandoned for more than 20 years, the root distribution characters of abandoned grassland were approached to that of natural grassland. The root extinction coefficient decreased with increasing abandoned years, indicating that more and more roots were concentrated in surface soil layer with the increase of abandoned time, which was helpful to the improvement of soil physical and chemical properties, and beneficial to the new species intrusion and vegetation succession.

Key words Soil auger, Root index, Root biomass, Root distinction coefficient, Abandoned land, Loess Plateau.

1 引言

根系是植被吸收水分和养分的器官, 其形态和分布直接反映植被对立地的利用状况^[27], 对植被生长具有决定性作用^[3, 13, 16, 21]. 自从 1727 年 Hales 首次对根系分布特征进行研究以来, 有关植物根系研究已有大量报道^[2, 4, 9, 13, 16, 20, 21, 30], 并获得了植物根系生长^[2, 18]、分布^[3, 4, 7, 13, 30]及其生态环境效应^[5, 6, 10, 11, 19, 20]等方面的认识. 科技的发展为根系研究提供了先进的技术手段和方法, 但是由于根系的分布特征、生长过程等主要发生在地下, 因而目前采用最为广泛的根系调查技术依然是土钻法和挖掘法^[3, 13, 14, 21].

研究发现, 在极旱年或旱季, 植被根系主要集中在

分布的层次下移, 而在平水年或雨季则上移. 极旱年群落的地下生物量与地上生物量在生长中后期表现为互为消长关系^[28], 随着植被演替的发展, 植被种类发生变化, 土壤水分环境条件也发生了相应的变化^[19, 31]. 这种变化与植被根系分布特征密切相关^[23, 29], 并反映在土壤以及植被的呼吸速率等生理活动变化中^[25]. 王 等^[26]对河北坝上地撂荒地植被演替阶段研究发现, 随着撂荒年限的增加, 羊草等根茎禾草形成了大量的地下根系群, 导致土壤通透性变差, 进而影响羊草种群的生长发育. 随着撂荒年限的增加^[12, 22, 23], 土壤理化性状明显变化^[1, 24, 29],

* 国家自然科学基金项目(30371150)和黄河水利委员会“十五”重大治黄科技资助项目(2003SZ08).

** 通讯联系人.

2004-03-17 收稿, 2004-07-21 接受.

Alejandro 等^[1]在洪都拉斯中部地区对土壤特征与相似的植被群落聚类分析结果表明, 植被的演替阶段是土壤退化和恢复程度的合理指标.

在我国西北干旱、半干旱地区, 草本植被在各种植被类型中占有相当大的比例, 对当地生态环境建设具有重要的意义. 但是对于草本植被, 特别是有关退耕地植被根系垂直分布特征, 以及据此确定植被根系垂直分布特征参数的研究还较少. 假设草本植被根系的分布特征与林木根系的分布特征相似, 可以把林木根系研究分析的方法应用到草本植被根系的研究中. 本研究通过调查分析, 确定了退耕地植被根系垂直分布特征, 进而确定其根系分布特征的定量化参数值, 以期为黄土高原地区的植被建设与生态恢复提供科学依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

2002 年 9 月, 在中国科学院长武生态实验站王东沟流域, 调查了不同退耕年限土地上植被根系的垂直分布特征. 该地处于黄土高原沟壑区中部, 海拔 950~1 225 m, 年平均气温 9.1℃, 年降水量 584.1 mm, 年变率较大, 大部分都集中于 7~9 月, 无霜期 171 d.

2.2 研究方法

2.2.1 根系调查 在实验地上按 1 m×1 m 均匀分布, 确定 15 个采样点, 用土钻在 100 cm 的土壤剖面上, 以 10 cm 为一层进行采样, 用筛子将各层土壤进行过筛, 并拣出所有根系, 编号后装入塑料袋带回实验室进一步分析. 将样品根系用水洗出, 晾干后装入纸袋. 对所获的根系样品用蒸馏水清洗干净后, 采用加拿大 Regent Instrument Inc 公司生产的根系扫描仪 Epson Twain Pro(32 bit) 和专业的根系形态学和结构分析应用系统 WINRhizo, 对根系长度、根系表面和根系体积等指标进行测定分析. 该仪器通过先进的扫描系统和图象分析系统, 理论上可以对径级无限小的根系的各项指标进行精确的测定, 克服了以往研究中的缺憾.

2.2.2 植被调查 在根系调查前, 对当地的植被特征进行调查. 在长武生态实验站周围的大多数立地上, 植被以长芒草 (*Stipa bungeana*) 和白羊草 (*Bothriochlona ischaemum*) 等多年生草本植被为优势种, 伴生物种主要有胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、野菊花 (*Dendranthema indicum*), 在个别立地上有酸枣 (*Ziziphus jujuba*) 等小灌木分布, 由于放牧和割草等人为活动的影响, 目前还没有形成优势种. 大多数坡面上的植被都停留在多年生草本植被群落阶段. 在当年的退耕地或土壤疏松的土地上, 分布着黄花蒿 (*Artemisia annua*)、狗尾草 (*Setaria viridis*) 等一年生草本植物群落, 随着退耕时间的延长, 植被组成由一年生植被逐渐向多年生植被过渡. 据此, 选择了不同退耕年限 (1 年、5 年、10~15 年、20 年和天然草地) 的土地作为调查对象, 对其植被的覆盖、根系垂直分布和土

壤特性等进行调查分析 (表 1).

表 1 不同退耕年限的植被组成
Table 1 Vegetation composition of different abandoned times

土地类型 Land type	植被组成 Vegetation composition	土地历史 Land history
I	黄花蒿 <i>A. annua</i> 、狗尾草 <i>S. viridis</i>	A
II	黄花蒿 <i>A. annua</i> 、长芒草 <i>S. bungeana</i> 、白羊草 <i>B. ischaemum</i> 和狗尾草 <i>S. viridis</i>	A
III	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、白羊草 <i>B. ischaemum</i> 和狗尾草 <i>S. viridis</i>	A
IV	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、白羊草 <i>B. ischaemum</i> 和狗尾草 <i>S. viridis</i>	A
V	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、白羊草 <i>B. ischaemum</i> 、胡枝子 <i>L. bicolor</i> 、野菊花 <i>D. indicum</i> 和酸枣 <i>Z. jujuba</i>	B

I. 退耕 1~2 年 Abandoned land for 1~2 year; II. 退耕 7~9 年 Abandoned land for 7~9 year; III. 退耕 15~17 年 Abandoned land for 15~17 year; IV. 退耕 23~25 年 Abandoned land for 23~25 year; V. 天然草地 Natural grassland. A: 弃耕地 Abandoned land; B: 草地 Grassland.

3 结果与分析

3.1 植被根系空间分布一致性检验

草本植被群落根系空间分布特征具有一定的差异性. 为了检验每一个调查区不同取样点上植被根系空间分布的一致性, 首先对其根系的空间分布特征进行一致性检验 (表 2).

方差分析结果表明, 在各取样点上, 同一深度上不同径级的根系长度、根系表面积和根系体积在 $\alpha = 0.01$ 水平上不存在明显差异, 说明在同一样地上, 可以对相同深度不同取样点上的根系进行合并计算. 同时也说明整个坡面不同深度的根系分布特征不存在明显差异. 对其他样地不同深度上根系分布特征的一致性检验结果与天然草地的分析结果相似, 表明采用土钻法对坡面植被根系的垂直分布特征进行调查是可行的.

表 2 不同径级和深度上根系长度、表面积和体积方差分析
Table 2 Square errors analysis of root length, root surface area and root volume at different diameter and different depth

项目 Item	差异源 Source of error	平方和 SS	自由度 df	均方和 MS	F
根系长度 Root length	径级 Diameter class	109971.8	9	12219.09	105.1073
	深度 Depth	272253.7	12	22687.81	195.1581
	交互 Alternation	78005.81	108	722.276	6.212942
	内部 Interior	211581.3	1820	116.2535	
	总计 Total	671812.6	1949		
根系表面积 Root surface area	径级 Diameter class	3562.297	9	395.8108	150.9491
	深度 Depth	3319.799	12	276.6499	105.5051
	交互 Alternation	1869.235	108	17.30773	6.600594
	内部 Interior	4772.308	1820	2.622147	
	总计 Total	13523.64	1949		
根系体积 Root volume	径级 Diameter class	2.127386	9	0.236376	70.08874
	深度 Depth	2.831971	12	0.235998	69.97646
	交互 Alternation	2.708519	108	0.025079	7.436224
	内部 Interior	6.138001	1820	0.003373	
	总计 Total	13.80588	1949		

3.2 不同演替阶段植被根系垂直分布特征

3.2.1 根系长度垂直分布 在黄土区退耕地植被恢复演替过程中, 植被地上部分和地下根系不断将有机质还原到土壤中, 促进了土壤理化性质的改善和提高; 而这种改善了的土壤理化性质又对植被的生长和分布产生影响, 有利于新物种的入侵, 推动了植被演替的发展. 由图 1 可以看出, 不同演替阶段的植被根系具有不同的分布特征和分布规律. 在恢复初期(1~2 年、7~9 年和 13~15 年), 由于 1~2 年退耕地上的蒿类植被是直根系植物, 根系下扎较深, 在整个土壤剖面上植被根系长度和根系表面积分布特征相对比较均匀, 说明植被恢复初期的植被根系分布深度相对较深, 有利于先锋物种对土壤性质的改善, 为新物种的入侵创造良好的微环境.

由图 1 可见, 随着恢复时间的加长(20 年左右), 地表植被组成发生了相应变化(由一年生植被过渡成为多年生植被). 先锋植被的存在改善了土壤的理化性质, 使地面土壤更加密实, 不利于先锋物种生长, 促使新物种出现并成为群落的优势种. 植被根系的分布特征也发生了相应变化, 退耕 20 年土地的植被根系分布特征接近于天然草地. 在退耕 20 年和天然草地上, 大部分植被根系集中在地表 0~40 cm 土层中, 地表土壤变得逐渐密实, 改变了恢复初期土壤的疏松状况; 在没有外来影响情况下, 多年生植被覆盖下会逐渐形成一层枯落物层, 植被根系和枯落物的共同作用使地表土壤免于水土流失. 土壤表层在根系作用下形成的密实结构有效地控制了地表的水土流失; 而这种密实的土壤结构也会降低土壤的入渗能力, 不利于干旱、半干旱地区有限雨水资源的利用和储藏.

3.2.2 根系生物量的垂直分布特征 由图 2 可以看出, 各种草本植被类型的生物量都随土壤深度增加呈减少趋势, 大部分根系生物量集中在表层 40 cm 土层中. 当土壤深度超过 40 cm 后, 根系生物量降低到较低水平, 说明草本植被的根系分布较少. 相对于天然草地, 植被恢复演替初期的根系生物量在深层土壤中的分布量在绝对值或相对值上都要大一些, 一年生植被根系分布特征有助于提高土壤有机质含量, 改善土壤的物理化学性质, 为后续物种的进入创造良好的环境条件. 多年生植被根系主要集中在土壤表层, 可以强化土壤的抗冲性等土壤侵蚀特征, 较好地发挥保持水土生态效益的作用.

3.3 根系垂直分布特征参数

Gale 等^[9] 根据不同演替阶段和不同树种根系

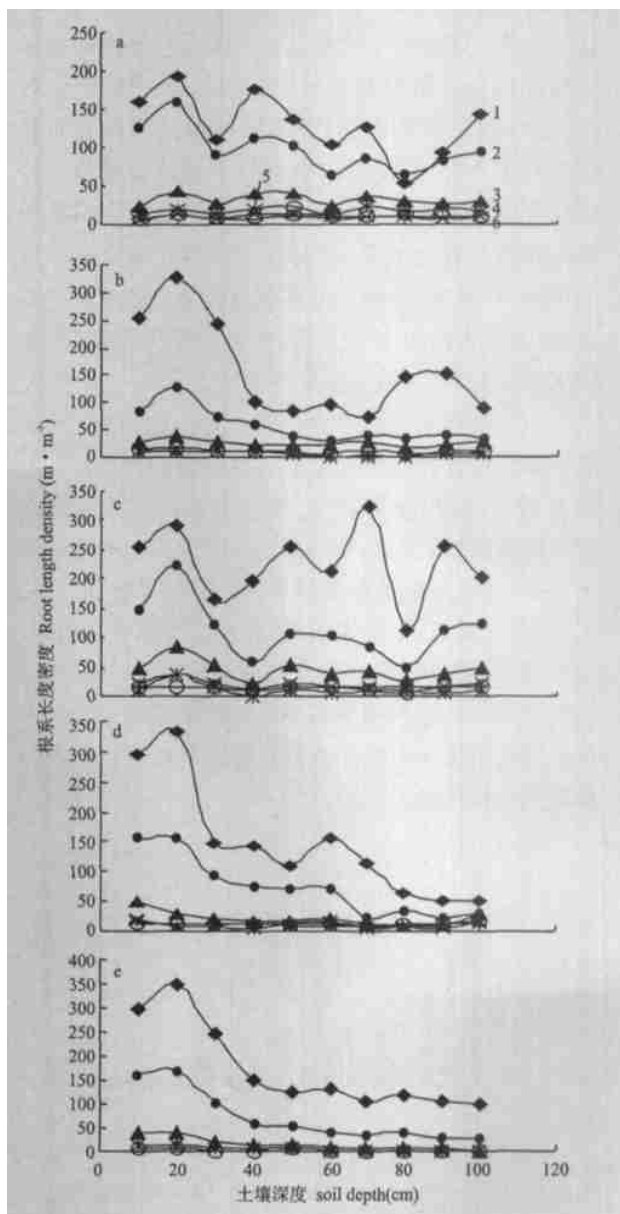


图 1 不同演替阶段根系长度密度垂直分布规律
Fig. 1 Vertical root length density distributions of vegetation at different succession stages.

a) 退耕 1~2 年 Vegetation on the land abandoned for 1~2 years; b) 退耕 7~9 年 Vegetation on the land abandoned for 7~9 years; c) 退耕 13~15 年 Vegetation on the land abandoned for 13~15 years; d) 退耕 20 年 Vegetation on the land abandoned for 20 years; e) 天然草地 Vegetation on natural grassland. 下同 The same below. 1) $D < 0.5$ mm; 2) 0.5 mm $< D < 1.5$ mm; 3) 1.5 mm $< D < 2$ mm; 4) 2 mm $< D < 3$ mm; 5) 3 mm $< D < 4$ mm; 6) $D > 4$ mm.

的分布特征, 提出了根系垂直分布模型:

$$Y = 1 - \beta^d \quad (1)$$

式中, Y 为从地表到一定深度的根系生物量累积百分比; d 为土层深度 (cm); β 为根系消失系数. 其中 β 值越大, 说明根系在深层土壤中分布的百分比越大, 反之则说明有更多的根系集中分布于接近地表的土层中. β 值的大小说明了根系的垂直分布特征与深度的关系, 与根系体积或者根系密度无关. 应用

这一公式, Gale 等^[8, 15]成功地对白云杉林地根系分布状况进行了研究和评价. Jackson 等^[14]综合全球 250 多个根系研究实例, 对不同树种的根系分布特征进行了分析. 假设树木根系的分布特征受遗传特征和环境因子的双重控制, 那么不同立地上树木根系分布特征存在差异, 这种差异的量化表现在 β 值的不同. 一般来说, 树木根系在生长早期就达到了其空间(垂直方向和水平方向)分布的最大范围, 随着树木年龄的增长, 根系密度逐渐增大^[17].

本文采用数值拟和的方法, 用公式 $Y = 1 - \beta^d$ 对一年生植被和多年生植被根系的垂直分布特征参数 β 进行求解. 结果表明, 植被根系的累积分布曲线与拟和曲线之间具有较好的相关关系. 在此基础上, 对不同径级根系参数指标(根系生物量、根系长度、根系表面积、根系体积等)的分布特征进行模拟, 结果表明, 植被根系参数的累积分布曲线与拟和期限之间具有良好的相关关系, 说明采用这一公式确定的根系垂直分布特征参数 β 描述草地植被根系的垂直分布特征是可行的.

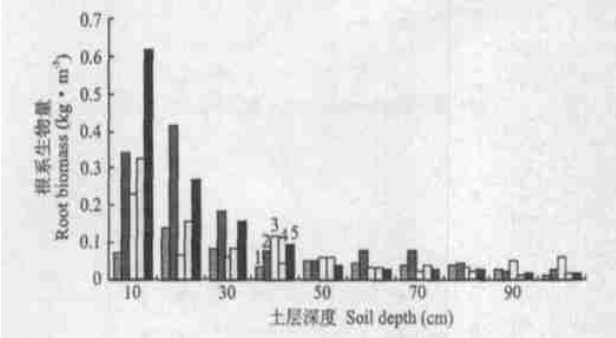


图 2 不同退耕地上植被根系生物量垂直分布
Fig. 2 Vertical root biomass distributions on the abandoned lands

表 3 不同演替阶段、不同根系指标垂直分布特征参数
Table 3 Vertical root distribution parameters of different root indexes at different succession stages

演替阶段 Succession stages	根系生物量 Root biomass	根系长度 Root length	根系表面积 Root surface area	根系体积 Root volume
1~ 2 年 1~ 2 year	0. 975	0. 98	0. 98	0. 982
7~ 9 年 7~ 9 year	0. 965	0. 978	0. 978	0. 98
13~ 15 年 13~ 15 year	0. 975	0. 979	0. 98	0. 978
20 年 20 year	0. 96	0. 975	0. 975	0. 979
黄白洼 Huangbaiwa	0. 95	0. 97	0. 969	0. 966

由表 3 可以看出, 一年生植被根系垂直分布特征参数的 β 值较大, 说明植被根系在深层土壤中的分布比例较大; 而在多年生植被根系垂直分布特征参数 β 的数值较小, 则说明植被根系大多集中在土

壤表层, 深层土壤中分配的比例较小.

4 讨 论

根系是植被与土壤环境之间进行物质和能量交换的主要桥梁^[15, 27]. 研究证实^[7, 13, 16, 21], 植被根系特别是细根的周转, 可以为土壤提供丰富的有机物质, 对于改善和提高土壤的物理化学性质具有重要意义. 就土壤的侵蚀特征而言, 根系的存在可以提高土壤抵抗侵蚀的能力^[11]. 这种改善作用表现在根系通过对土壤的网络固结而强化土壤的抗冲性^[10, 11], 而根系通过细根周转还原有机质于土壤中, 改善和提高了土壤的物理化学性质^[5, 6].

随着演替的发展, 植被及其枯落物, 特别是植被根系在土壤中的逐渐累积^[24, 31], 改善了土壤的有机质状况和其他理化性质; 同时又促进了植被的生长发育、新物种的进入和旧物种的消失, 进一步改善了土壤的有机质状况. 本研究的结果证实, 植被恢复演替初期的根系生物量在深层土壤中的分布量无论是绝对值还是相对值都要大一些, 有助于提高土壤有机质含量, 改善土壤的物理化学性质, 为后续物种的进入创造良好的环境条件. 因此, 进一步深入研究退耕地植被恢复过程中植被根系与土壤性质的动态响应规律, 进而揭示这种变化对环境的作用机制, 尤其是对其水土流失环境特征的作用机制, 对于当前西部地区的生态环境建设中有关林草措施的配置问题具有重要理论意义和实践价值.

参考文献

1 Alejandro P, Johann K, Miguel A, *et al.* 1999. Relationship of soil characteristics to vegetation successions on a sequence of degraded and rehabilitated soils in Honduras. *Agric Ecosyst Environ*, **72**: 215 ~ 225

2 Berish CW. 1982. Root biomass and surface area in 3 successional tropical forests. *Can J For Res*, **12**: 699~ 704

3 Cannell J, Jackson RB, Ehleringer JR, *et al.* 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, **108**: 583~ 595

4 Coile TS. 1936. Distribution of forest tree roots in North Carolina piedmont soils. *J For*, **35**: 247~ 257

5 Cresswell HP, Kirkegaard JA. 1995. Subsoil amelioration by plant roots— The process and evident. *Aust J Soil Res*, **33**: 221~ 239

6 Degens BP. 1997. Macro aggregation of soils by biological bonding and binding and the factors affecting these: A review. *Aust J Soil Res*, **35**: 431~ 459

7 Farrish KW. 1991. Spatial and temporal fine root distribution in three Louisiana forest soil. *Soil Sci Soc Am J*, **55**: 1752~ 1757

8 Gale MR, Grigal DE, Harding RB. 1991. Soil productivity index of site quality for white spruce plantations. *Soil Sci Soc Am J*, **55**: 1701~ 1708

9 Gale MR, Grigal DE. 1987. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Can J For For*, **17**: 829~ 834

10 Ghidex F, Alberts EE. 1997. Plant root effects on soil erodibility,

- splash detachment, soil strength, and aggregate stability. *Trans ASAE*, **40**(1): 129~ 135
- 11 Gysels G, Poesen J. 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Proc Landforms*, **28**: 371~ 384
 - 12 Hou F J(侯扶江), Xiao J Y(肖金玉), Nan Z B(南志标). 2002. Ecorestoration of abandoned farmland in the Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(8): 923~ 929(in Chinese)
 - 13 Jackson RB, Canadell J, Mooney HA. 1996. A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia*, **180**: 389~ 411.
 - 14 Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proc Natl Acad Sci*, **94**: 7362~ 7366
 - 15 Li P, Li Z B, Zhao Z. 2002. An index system and method for soil productivity evaluation on the hillside in the Loess Plateau. *Arid Soil Res Man*, **16**: 335~ 348
 - 16 Liu J J(刘建军). 1998. A review on root ecology of forest trees. *J Northwest For Coll*(西北林学院学报), **13**(3): 74~ 78(in Chinese)
 - 17 Lyr H, Hoffmann G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. *Inter Rev For Res*, **2**: 181~ 236
 - 18 Marshall JD, Waring RH. 1985. Predicting fine root production and turnover by monitoring root starch and soil temperature. *Can J For Res*, **15**: 791~ 800
 - 19 Reid BJ, Goss MJ. 1987. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. *J Soil Sci*, **32**: 521~ 541
 - 20 Sainju UM, Good DE. 1993. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pineland forest. *Plant Soil*, **50**: 87~ 97
 - 21 Stone EL, Kalisz PJ. 1991. On the maximum extent of tree roots. *For Ecol Man*, **46**: 59~ 102
 - 22 Sun H Q(孙海群), Zhou H(周禾), Wang P(王培). 1999. Progress on grassland degenerated succession. *Grassl China*(中国草地), (1): 51~ 56(in Chinese)
 - 23 Tian H Y(田洪艳), Zhou D W(周道玮), Guo P(郭平). 2001. The change of soil and vegetation with different years of leaving uncultivated. *J Northeast Normal Univ*(东北师范大学学报), **33**(4): 72~ 77(in Chinese)
 - 24 Wang B S(王伯荪), Peng S L(彭少麟). 1997. Ecological Effects of Vegetation and Ecosystem Restoration and Reconstruction. Beijing: China Environment Science Press. 312~ 325(in Chinese)
 - 25 Wang F Y(王凤玉), Zhou G S(周广胜), Jia B R(贾丙瑞), et al. 2003. Effect of heat and water factors on soil respiration of restored *Leymus chinensis* steppe in degraded land. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **27**(5): 644~ 649(in Chinese)
 - 26 Wang K(王), Lü J Y(吕进英). 2000. The natural succession and artificial renewal of the restored grassland. *J China Agric Resour Region Plan*(中国农业资源与区划), **21**(4): 51~ 55(in Chinese)
 - 27 Wang W-Q(王文全), Wang S-J(王世绩), Liu Y-R(刘雅荣), et al. 1994. Distribution and growth characters of the root system of poplar, willow, elm and locust on the site of renewed land by fine ash of coal. *Sci Silvae Sci*(林业科学), **30**(1): 25~ 33(in Chinese)
 - 28 Xu G L(徐彩琳), Li Z Z(李自珍). 2003. Succession pattern of artificial vegetation community and its ecological mechanism in an arid desert region. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **14**(9): 1451~ 1456(in Chinese)
 - 29 Zhang N(张娜), Liang Y-M(梁一民). 2002. Effect of arid climate on underground growth of *Bothriochloa ischaemum* community. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(7): 827~ 832(in Chinese)
 - 30 Zhao Z(赵忠), Li P(李鹏), Wang N-J(王乃江). 2000. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weihei Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **11**(1): 37~ 39(in Chinese)
 - 31 Zou H-Y(邹厚远), Cheng J-M(程积民), Zhou L(周麟). 1998. Natural recovery succession and regulation of the prairie vegetation on the Loess Plateau. *J Soil Water Cons*(水土保持研究), **5**(1): 126~ 138(in Chinese)

作者简介 李 鹏,男,1974年生,博士.主要从事植被环境效益和作用机理等方面的研究,发表论文 20 余篇. Tel: 029-82312651; E-mail: lipeng74@163.com
