

特大暴雨下油松林根系对土壤元素迁移的影响

李勇^{1,2}, 张晴雯², 万国江³, 黄荣贵³, 朴河春³

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

3 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

摘要: 根际是元素由土壤进入植物体的主要界面, 降水对根际土壤元素的迁移有显著影响。本文用原状土柱淋滤实验装置及大型挖掘剖面壁法, 定量分析了特大暴雨下不同深度土层油松林根系影响土壤元素的稳定输出通量的剖面特征, 旨在探索黄土区林木根系对土壤养分生物有效性的提高途径。研究结果表明, 特大降雨条件下, 油松林地的元素随土层深度增加呈明显的递减规律, 在农地土壤剖面中变异不明显。油松林地元素稳定输出通量的平均值显著大于无根系土壤。油松林 0—30 cm 土壤剖面中的元素输出通量占总剖面元素输出通量的 96.32%; 油松林根系对常量元素 K、Na、Mg、Ca、有益元素 Si、微量营养元素 Mn 有明显稳定强化作用的土层深度范围为 0—30cm, 对有益元素 Al 和微量元素 Cu、Fe 有明显稳定强化作用的土层深度范围为 0—45 cm。

关键词: 根系; 特大暴雨; 元素迁移通量; 有效性模式; 黄土高原

中图分类号: S157.1; S158.5 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X (2007)01-0051-06

Effectiveness of pine roots on elements transport of loess soil during the heavy rainstorm on the Chinese Loess Plateau

LI Yong^{1,2}, ZHANG Qing-wen², WAN Guo-jiang³, HUANG Rong-gui³, PIAO He-chun³

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 810008, China;

2 Institute of Agror Environment and Sustainable Development, CAAS, Beijing 100081, China;

3 Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: Plant roots are the main interface for plants to uptake nutrients from soil and may have potential impacts to intensify elements transport in the loess soil. Climate, especially rainfall is the main factor for soil formation and soil environment. To assess the effectiveness of plant roots on elements transport of loess soil during the heavy rainstorm, a field study was carried out on nutrients transport in the forest (*Pinus tabulaeformis*) soil as affected by pine roots and farmland soil with no roots as the control on the hilly and gully areas of the Loess Plateau. With the method of a large-size profile for measuring root density and root weight and an equipment of undisturbed monolith soil for measuring elements transport of loess soil, we investigated transport flux of 9 elements in the loess soil during the rainfall of 200 mm and rain intensity of 2.0 mm/min. The objective was to establish the effective model of plant root for intensifying elements transport flux in the loess soil, in order to provide a scientific foundation for improving the nutrients uptake of plant roots and establishing the fine artificial ecological systems of soil and water conservation. The results indicated that differences among elements transport flux in the loess soil during the heavy rainstorm were not only depended on the amount of elements in soil but mainly on the distribution of plant roots less than 1 mm in diameters. Impacts of plant roots on intensifying elements transport in the different depth of the loess soil decreased as the soil depth increased. As for the pine-land during the heavy rainstorm, elements output flux in the soil layer of 0—60 cm decreased significantly with the increase of the soil depth; as for the farmland, there are no significant differences for the whole soil profile. The impacts on the transport

收稿日期: 2005-12-06 修改稿收到日期: 2006-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671097)资助。

作者简介: 李勇(1958—), 男, 陕西蒲城人, 洪堡学者, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境演变、土壤侵蚀与土壤环境、植物根系与土壤抗侵蚀性机理方面的研究。Tel: 010-62137112, E-mail: yongli32@yahoo.com.cn

flux of K, Na, Mg, Ca, Si, Mn tended sharply to lighter in the soil layer of 0—30 cm, but its impacts on the transport flux of Al, Cu, Fe approached sharply to smaller in the soil layer of 0—45 cm in the pine-land during the heavy rainstorm as the increase of soil depth. The effective root parameters had significant positive relationship with the impacts of plant roots to intensify elements transport in soil profiles on the Loess Plateau with the R^2 between 0.95 and 0.99.

Key words: plant roots; heavy rainstorm; elements transport; effective model; the Loess Plateau

根际是营养元素由土壤进入植物体的主要界面^[1-2]。黄土及其上发育的土壤形成的环境差异,主要是因为气候的变化,以及由气候条件改变所造成的植被的差异^[3]。植被的繁生,尤其是根系的缠绕、固结,是黄土土壤作用的重要机制^[4];而降水因影响土层中元素的迁移速率,成为不同植被条件下黄土环境差异的最主要影响因素之一。已有研究表明,植物根系改善土壤物理性质的效应与细根,即与有效根密度(1 mm的须根)在剖面中的分布规律一致,均呈指数递减规律^[5]。近20年来,细根研究已成为森林生态系统中的一个热点,在国外受到广泛关注^[1-2,5-10]。目前国内关于树木细根在森林生态系统的养分循环和能量流动中的作用有一些报道^[11-15],但对于树木根系对黄土土层中营养元素迁移的影响的报道很少。实际上,不弄清根系与土壤中营养元素迁移的定量关系,很难完整深刻地了解植被活化土壤物质组分的动态及机理。在以往的研究中,我们分析了不同植物群落根系对黄土土层中土壤元素迁移的影响;对不同土层根系密度及根量与元素迁移强度的关系进行了定量分析^[16]。一般说来,短历时、小雨强的一次性降水不会明显地造成土壤水从表层向深层土壤入渗。为探讨降水条件下植物根系对黄土中元素迁移的影响,试验从分析特大暴雨下油松林根系影响不同土层中元素的稳定输出通量的剖面特征入手,阐明特大暴雨下油松林根系对土壤元素迁移的影响,旨在探索林木根系对土壤养分生物有效性的提高途径。

1 材料与方法

为探讨降水条件下植物根系对黄土土层元素迁移的影响,我们选定一次性降水240 mm、雨强为2.0 mm/min的特大暴雨条件,对油松人工林群落(*Pinus tabulaeformis*)中的有效根系参数对黄土土层中大量营养元素K、Mg、Ca,微量营养元素Fe、Cu、Mn,有益元素Si、Na、Al迁移通量的影响进行了野外定位研究。研究地点设在黄土高原丘陵沟壑区的宜川菇坪,林龄为18~20年的油松人工林区,油松林密度5500株/hm²,郁闭度90%,平均株高10.60

cm,平均胸径8.3 cm,土壤为黄土正常新成土,并以所选油松林区附近的农地无根系土壤作为对照。

1.1 有效根系密度及根量的测定

分别用大型挖掘剖面法^[17]和冲洗法^[4,16-18]。在选取的油松林标准地内挖16 m(长)×1.5 m(宽)×1.5 m(深)的剖面6个,对根密度的水平和垂直分布规律进行调查,根密度的单位为根/100 cm²。当完成元素淋滤实验后,将含根系的土样置于0.5 mm的铜筛中,在流水中仔细冲洗,将冲洗好的根系置于105℃的烘箱中,烘16~20 h,然后在1/1000的电子天平上称重,以100 cm³土体中所含烘干根的重量(g)表征根量的多少(g/100 cm³)。

1.2 土壤中元素输出通量

用大型原状土柱淋滤实验装置测量土壤中元素输出通量^[16]。采集土样的程序为:在油松林地和农地无根系土壤剖面上采集原状土柱高度为10、20、30、45和60 cm,每种高度有4个重复,共计采集原状土柱40个。制备了与原状土柱相应高度的渗水采集器40个,渗水采集器用聚氯乙烯硬质塑料管加工而成,内径为151.5 mm。将装有原状土柱的渗水采集器固定在土壤元素淋滤实验架上,模拟一次性降水量为240 mm、雨强为2.0 mm/min的特大暴雨,对土壤中元素输出通量进行测量。据不同降水历时收集渗透水样,同时记录水在土层中的寄宿时间及渗透水量(mL)。所采的水样分为两部分,一部分在当天测定pH和阴离子浓度,另一部分立即在现场用0.45 μm滤膜过滤、酸化(pH<2)密封,送实验室进行常量和微量元素的测定。其中K、Na、Ca、Mg、Cu、Mn、Fe用美国PE公司的原子吸收光谱仪测定(型号:PE-5100-PC);Si、Al用比色法测定(原子吸收光谱和比色法测定均在中国科学院贵阳地球化学研究所进行)。

土壤中元素输出通量计算公式为:

$$F_{out} = a_x Q \quad (1)$$

式中: F_{out} 为元素的稳定输出定量mg/(m²·h); Q 为土壤有效渗透水通量L/(m²·h)。

$Q = 1.667 \times 10^{-2} K_{10} \cdot P / RI$,其中 K_{10} 为土壤的稳定渗透速率(mm/min); RI 为暴雨强度(mm/min);

P 为一次性降水量 (mm); a_x 为淋滤水中元素 x 的浓度 (mg/L)。

2 结果与分析

2.1 特大暴雨下油松林根系对土壤元素输出通量剖面特征的影响

特大暴雨下土壤中元素的稳定输出通量变化的剖面曲线如图 1 所示。结果表明,0—60 cm 土层中元素的输出通量,在油松林地随土层深度增加呈明

显的递减规律,在无根系土壤剖面上随土层深度变异不太明显。

进一步分析其剖面变化的特征值,可以看出,在油松林地元素稳定输出通量的平均值显著大于无根系土壤(表 1)。特大暴雨条件下,油松林与农地土壤元素稳定输出通量在垂直剖面变异规律及数值大小上的显著差异,充分证明植物根系在根际微域生态系统中对土壤养分迁移能力的活化分解起着极其重要的加速作用。

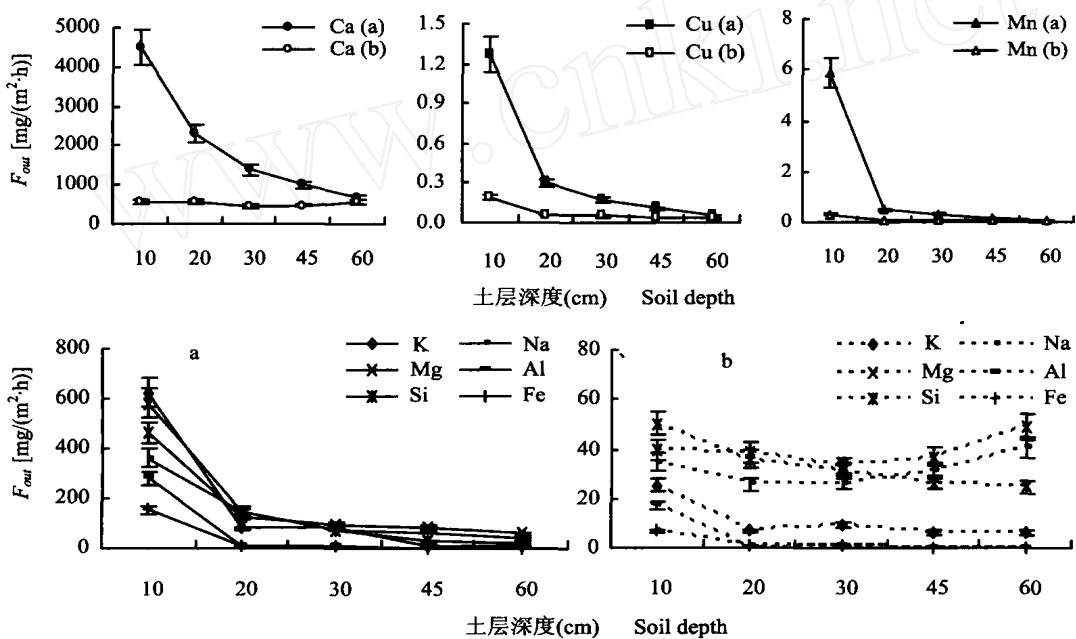


图 1 黄土剖面元素的稳定输出通量(F_{out})的剖面曲线

Fig.1 Profile distribution of F_{out} in the loess soil during the heavy rainstorm

(a: 油松林 Pinus; b: 裸露农耕地 Farmland)

2.2 特大暴雨下油松林根系对土壤元素输出通量的强化值

所谓元素稳定输出通量的强化值是指降雨强度在 2.0 mm/min 条件下,根系和无根系土壤中元素稳定输出通量测定值上的差值,用 F_{out} [mg/(m²·h)] 表征。计算结果(表 2)表明,特大暴雨条件下,油松林群落根系对土壤中元素迁移的影响随土层深度的增加作用减弱,特别是在 0—10 cm 土层最强,10—30 cm 土层较强,30—45 cm 土层急剧减弱,45 cm 以下土层降低到最低水平,其特征如下:

1) 从迁移能力顺序可以看出地质背景值最高的碱土金属 Ca 和粘土矿物的主要元素 Si 稳定输出通量均很大,其次是作为植物必需营养元素的易溶性

碱金属元素 K、Na 和碱土金属 Mg 的输出通量,难溶的 Al、Fe、Mn、Cu 输出通量排在最后。根系对土壤中元素稳定输出通量强化作用的平均值大小序列在 0—30 cm 土层内为: Ca(2199.48) > K(247.92) > Si(229.74) > Mg(189.70) > Na(165.89) > Al(93.53) > Fe(55.28) > Mn(2.06) > Cu(0.48); 在 30 cm 以下土层的序列为 Ca(318.40) > Mg(28.27) > Na(17.24) > K(3.38) > Al(1.74) > Fe(1.03) > Si(0.41) > Cu(0.05) > Mn(0.03);

2) 植物根系对土壤中不同元素稳定输出通量占剖面元素总输出量的平均分数在 30 cm 以上和 30cm 以下土层深度分别为 96.32%(变化区间为 91%—99%)和 3.68%(变化区间为 0.12%—9.04%);

表1 特大暴雨下土壤元素稳定输出量(F_{out})剖面变化的特征值Table 1 Distribution of F_{out} in soil profile during the heavy rainstorm

元素 Elements	油松林根系土壤 F_{out} in the pine soil		农地无根系土壤 F_{out} in the farmland soil		样本数 Samples (n)
	平均值 Mean \pm SD	变化范围 Rang	平均值 Mean \pm SD	变化范围 Rang	
	[mg/(m ² ·h)]	[mg/(m ² ·h)]	[mg/(m ² ·h)]	[mg/(m ² ·h)]	
K	160.99 \pm 262.44	7.04 ~ 626.23	10.89 \pm 8.21	6.21 ~ 25.35	12
Na	138.05 \pm 129.97	41.61 ~ 360.12	31.62 \pm 6.31	25.50 ~ 40.64	12
Ca	1965.54 \pm 1549.91	658.9 ~ 4516.8	518.49 \pm 50.10	454.9 ~ 571.0	12
Mg	164.52 \pm 168.57	59.36 ~ 462.95	39.39 \pm 5.74	33.16 ~ 48.66	12
Al	60.45 \pm 122.30	0.66 ~ 279.19	3.73 \pm 7.55	0.11 ~ 17.23	12
Si	168.99 \pm 235.78	11.94 ~ 579.58	33.54 \pm 10.31	24.74 ~ 50.30	12
Cu	0.38 \pm 0.51	0.05 ~ 1.27	0.07 \pm 0.07	0.03 ~ 0.19	12
Mn	1.36 \pm 2.51	0.04 ~ 5.84	0.12 \pm 0.12	0.05 ~ 0.33	12
Fe	36.04 \pm 67.31	0.50 ~ 156.13	1.86 \pm 2.84	0.21 ~ 6.89	12

表2 特大暴雨下根系对土壤元素输出通量的强化值(F_{out})与无根系土壤 F_{out} Table 2 F_{out} as affected by pine roots and F_{out} in the farmland during the heavy rainstorm

类型及参数 Soils and parameters	土层深度(cm) Soil depth	K	Na	Ca	Mg	Al	Si	Cu	Mn	Fe
油松林 Pines F_{out}	10	600.87	325.44	3965.56	423.3	261.96	529.27	1.08	5.51	146.24
	20	73.18	119.64	1711.25	87.94	10.75	114.64	0.24	0.43	10.52
	30	69.72	52.58	921.63	57.87	7.88	45.32	0.12	0.24	9.08
	45	5.89	33.50	516.53	45.85	2.92	0.82	0.07	0.06	1.76
	60	0.88	0.97	120.27	10.70	0.56	—	0.02	—	0.29
无根系土壤 Farmland F_{out}	10	25.35	34.68	551.25	39.66	17.23	50.30	0.19	0.33	6.89
	20	6.89	25.50	571.00	38.64	0.47	35.55	0.06	0.07	0.96
	30	9.74	26.08	454.86	33.16	0.67	31.06	0.05	0.07	1.02
	45	6.26	31.20	476.63	36.84	0.16	26.04	0.04	0.06	0.23
	60	6.21	40.64	538.71	48.66	0.11	24.74	0.03	0.05	0.21

3) 以无根系土壤作基准分析植物根系对土壤中元素输出通量强化作用的相对能力大小(即强化效应系数)可知,油松林根系对常量元素 K、Na、Mg、Si 有明显稳定强化作用的土层深度范围为 0—30 cm; 但对 Al 稳定强化作用的土层深度范围为 0—45 cm, 对微量元素 Cu、Fe 的范围则为 0—45 cm, 对 Mn 的范围为 0—30 cm。其强化效应系数平均值的大小序列为 Al(16.61) > K(13.83) > Fe(13.72) > Mn(8.69) > Na(5.36) > Si(5.07) > Mg(4.90) > Na(4.07) > Cu(3.87)。根系对不同土壤中不同元素迁移过程表现的不同的加速作用是植物适应和改善土壤养分逆境的基础。因此建立植物的有效根系参数对土壤元素迁移的数学模型就显得极为重要。

2.3 特大暴雨下油松林根系强化土壤元素稳定输出通量的有效模式

已有研究将不同径级的根系密度及根量与元素迁移强度的影响进行了回归分析。结果表明,随着直径 1 mm 根密度和根量的增大,根系对土壤元素迁移强度的影响显著增强。直径 1 mm 的须根密度和根量为植物群落不同径级的根系适应和改善土壤养分物理化学逆境的有效根系参数,分别称为有效根密度和有效根量^[5,16],有效根密度的物理基础是 100 cm²土壤截面上 1 mm 的须根的个数。特大暴雨下植物根系对元素稳定输出通量的强化值与直径 1 mm 的须根,即与有效根系密度(Roots density, R_d)和根量(Roots weight, R_w)的函数关系如表 3 所示。

表 3 有效根密度(R_d)及根量(R_w)与元素稳定输出通量强化值(F_{out})的关系Table 3 Relationship between F_{out} with R_d and R_w

元素 Elements	F_{out} 与 R_d 、 R_w 的函数关系式 Equations of F_{out} with R_d and R_w	有效根系数参数 Rang of R_d and R_w	R^2	P	样本数(n) Samples
K	$F_{out} = 4.7E-03 R_d^{2.4}$	11 R_d 146	0.96	<0.01	10
	$F_{out} = 1572.91 R_w^{2.71}$	0.08 R_w 0.75	0.96	<0.01	10
Na	$F_{out} = -26.2 + 2.36 R_d$	11 R_d 146	0.99	<0.01	10
	$F_{out} = -46.43 + 511.96 R_w$	0.08 R_w 0.75	0.98	<0.01	10
Ca	$F_{out} = -118.4 + 27.81 R_d$	11 R_d 146	0.99	<0.01	10
	$F_{out} = -276.13 + 5573.01 R_w$	0.08 R_w 0.75	0.99	<0.01	10
Mg	$F_{out} = 30EXP(1.78E-02 R_d)$	16.5 R_d 146	0.99	<0.01	8
	$F_{out} = 26.63EXP(3.59 R_w)$	0.11 R_w 0.75	0.98	<0.01	8
Al	$F_{out} = 3.22E-03 R_d^{2.22}$	7 R_d 146	0.98	<0.01	12
	$F_{out} = 249.34 R_w^{2.26}$	0.05 R_w 0.75	0.95	<0.01	12
Si	$F_{out} = 2.95E-02 R_d^{1.97}$	42 R_d 146	0.99	<0.01	6
	$F_{out} = 975.69 R_w^{2.14}$	0.24 R_w 0.75	0.99	<0.01	6
Cu	$F_{out} = 5.05E-02EXP(2.13 E - 02 R_d)$	16.5 R_d 146	0.99	<0.01	8
	$F_{out} = 4.36E-02EXP(4.31 R_w)$	0.11 R_w 0.75	0.99	<0.01	8
Mn	$F_{out} = 4.47E-02EXP(3.35E-02 R_d)$	16.5 R_d 146	0.99	<0.01	8
	$F_{out} = 3.55E-02EXP(6.78 R_w)$	0.11 R_w 0.75	0.99	<0.01	8
Fe	$F_{out} = 2.69-03 R_d^{2.12}$	4 R_d 146	0.98	<0.01	14
	$F_{out} = 199.61 R_w^{2.31}$	0.05 R_w 0.75	0.97	<0.01	12

结果表明,特大暴雨下,油松林群落有效根系参数与元素稳定输出通量的强化值呈非常显著的正相关关系($P < 0.01$), R^2 在0.95~0.99之间。根据表中的回归方程对植物根系影响土壤元素迁移作用进行计算发现,实测值与计算值二者不仅在剖面中的变化趋势极为一致,而且绝大多数数值也很接近,元素输出通量的平均相对偏差为7.6%(样本数88),尤其是Ca、Mg、Si、Cu、Mn输出通量的平均相对偏差在3%以下,仅为2.34%(样本数58),占预报样点数的65.9%(样本数44)。本研究建立的回归模型预报特大暴雨下根系强化土壤元素稳定输出通量的有效性强弱具有较高精度。

3 讨论

根系对土壤中不同元素迁移过程不同的促进作用是植物适应和改善土壤养分逆境的基础。有无根系黄土剖面元素输出通量存在差异的原因是多方面的。与开垦农耕地无根系土壤比较,由于根系的影响,尤其是1 mm径级的须根密度和根量的影响,油松林地土壤的团粒结构、土壤孔隙度、土壤酸碱度、土壤渗透水通量、紧实度、容重、土壤有机质含量等土壤环境因素都有很大的差异,从而影响特大暴雨下土壤元素的矿化、迁移过程。究竟哪种因素起

主导作用有待进一步研究。但从总体趋势看,特大暴雨下,0~60 cm土层中元素的输出通量在油松林地随土层深度增加呈明显的递减规律,在无根系土壤剖面随土层深度变异不太明显。油松林0~30 cm土壤剖面中的元素输出通量占总剖面元素输出通量的96.32%,这一临界土层深度与1 mm的须根根系在土层中的含量和分布规律一致。说明特大暴雨条件下,1 mm的须根根系在土壤中的含量和分布对油松林土壤中元素的迁移有显著的促进作用。

有效性模式应用于黄土高原水土保持人工植被建造中至少有两个方面的作用:一是根据有效性模式定量评价雨强在2.0~6.0 mm/min之间,不同降水历时条件下,植物根系强化土壤中不同元素迁移作用的大小,为有效利用土壤养分,充分发挥土壤自然生产潜力、选育优良植物种类提供科学依据;二是只要掌握了不同植物群落有效根系参数的时空分布特征,通过有效性模式可以确定不同基因型植物活化土壤养分、增进土壤元素迁移的稳定临界土层深度,进而制定改善土壤地球化学生态环境人工植被的最佳配置方案。实践证明,土壤风化淋溶的野外测定费时费力,有效根系参数的剖面调查较为简单,所以建立不同植物根系强化土壤元素迁移作用的有效性模式,是当前定量研究水土保持人工植被

生态环境功能切实可行的重要手段。

参考文献:

- [1] Pierret A, Doussan C, Garrigues E *et al.* Observing plant roots in their environment: Current imaging options and specific contribution of two - dimensional approaches [J]. *Agronomie*, 2003, 23: 471-479.
- [2] Azaizeh H, Gunse B, Steudle E. Effects of NaCl and CaCl₂ on water transport across root cells of maize (*Zea mays* L.) seedlings [J]. *Plant Physiol.*, 1992, 99: 886-894.
- [3] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 358-366.
Liu D S. Loess soil and environment [M]. Beijing: Scientific Publishing Press, 1985: 358-366.
- [4] 朱显谟. 黄土高原的形成与开发整治对策[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 1-8.
Zhu X M. Formation and development strategy of Chinese Loess Plateau[J]. *Bull. Soil Water Conserv.*, 1991, 11(1): 1-8.
- [5] 李勇, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991, 36: 935-938.
Li Y, Zhu X M, Tian J Y. Effectiveness of plant roots to increase the anti - scouribility of soil on the Loess Plateau [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 1991, 36: 935-938.
- [6] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J R. Maximum rooting depth of vegetation types at global scale [J]. *Oecologia*, 1996, 108: 583-595.
- [7] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, 108: 389-411.
- [8] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine root in a northern hardwood forest [J]. *Ecology*, 1992, 73: 1094-1104.
- [9] Liedgens M, Richer W. Minirhizotron observations of the spatial distribution of the maize root system [J]. *Agron. J.*, 2001, 93: 1097-1104.
- [10] Roy S, Singh J S. Seasonal and spatial dynamics of plant - available N and P pools and N - mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forest habitat [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 27: 33-40.
- [11] 廖利平, 杨跃军, 汪思龙, 等. 杉木火力楠纯林及其混交林细根分布、分解与养分归还[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 342-346.
Liao L P, Yang Y J, Wang S L *et al.* Distribution, decomposition and nutrient return of the fine root in pure *Cunninghamia lanceolata*, *Michelia Macclurei* and the mixed plantations [J]. *Acta Ecol. Sci.*, 1999, 19(3): 342-346.
- [12] 马北雁, 张一平. 土壤中离子交换和运移的模拟研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 84-91.
Ma B Y, Zhang Y P. Progress in simulation of soil ion exchange and transport [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(1): 84-91.
- [13] 宋海星, 李生秀. 水、氮供应和土壤空间所引起的根系生理特性变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 6-11.
Song H X, Li S X. Changes of root physiological characteristics resulting from supply of water, nitrogen supply and root - growing space in soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(1): 6-11.
- [14] 单建平, 陶大立, 王焱, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 241-245.
Shan J P, Tao D L, Wang M. Fine roots turnover of *Larix gmelinii* in Changbai Mountain [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1993, 4(3): 241-245.
- [15] 瞿明普, 蒋三乃, 贾黎明. 杨树刺槐混交林细根养分动态研究[J]. 林业科学, 2004, 40(4): 46-51.
Zhai M P, Jiang S N, Jia L M. Study on fine - root nutrient dynamics in the mixed plantation of *Betula* and *Black locust* [J]. *Sci. Silvae Sin.*, 2004, 40(4): 46-51.
- [16] 李勇, 张晴雯, 李璐, 等. 黄土区植物根系对营养元素在土壤剖面中迁移强度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 427-434.
Li Y, Zhang Q W, Li L *et al.* Effects of plant root on nutritious elements transport in soil profiles of the Chinese Loess Plateau [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2005, 11(4): 427-434.
- [17] Bohm W. Methods of studying root systems [M]. Heidelberg, New York: Springer-verlag, Berlin, 1979.
- [18] 万国江. 环境质量的地球化学原理[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1998.
Wan G J. Geo-chemical principal of environment quality [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1998.