

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

李勇¹, 张晴雯¹, 李璐¹, 万国江², 黄荣贵², 朴河春²

(1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2 中国科学院贵阳地球化学研究所, 贵州贵阳 550002)

摘要: 不同植物群落根系对土壤元素迁移具有显著影响, 不同基因型植物细根的特殊剖面分布特征, 是其适应和改善土壤养分物理化学逆境的生理生态学基础。采用原状土柱淋滤实验装置及大型挖掘剖面壁法, 在陕北黄土丘陵沟壑区研究并定量分析了不同径级根系对黄土中营养元素 K、Na、Ca、Mg、Cu、Mn、Fe、Si、Al 迁移强度的影响, 旨在探索土壤养分生物有效性的提高途径。结果表明, 不同植被类型土壤营养元素淋溶迁移的剖面差异并非完全取决于土壤中元素或矿物含量的大小, 而是主要受制于直径 $\leq 1\text{mm}$ 的须根根系在剖面中的缠绕分布特征。不同植被类型土壤中营养元素的迁移强度随土层深度增加呈递减规律。不同植物根系对黄土中营养元素迁移强度的影响具有显著差异, 其大小顺序为: 林地 > 草地 > 农地。林、草地土壤中元素迁移强度序列有明显变异的临界土层深度分别在 30cm 和 10cm 处。在林、草地和农地土层中常量元素水迁移强度序列为 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Al}$, 微量元素基本为 $\text{Cu} > \text{Mn} > \text{Fe}$ 。植物根系对营养元素迁移能力的影响具有明显的区域范围, 随着直径 $\leq 1\text{mm}$ 有效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。

关键词: 土壤营养元素; 迁移强度; 根系; 有效根密度; 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(2005)04-0427-08

Effects of plant root on nutritious elements transport in soil profiles of the Chinese Loess Plateau

LI Yong¹, ZHANG Qing-wen¹, LI Lu¹, WAN Guo-jiang², HUANG Rong-gui², PIAO He-chun²

(1 Inst. of Agro-Environ. and Sustainable Development, CAAS, Beijing 100081, China;

2 Inst. of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: Different plant roots may have potential impacts on nutritious elements movement in soil profiles. Distribution characteristics of fine root systems less than 1 mm in diameter in soil profile is the physiological basis of plants for adapting and improving adverse soil physical and chemical conditions. Few studies, however, have been conducted on the nutritious elements movement as affected by plant roots at profile scale. With the method of a large-size profile for measuring root density and an equipment of undisturbed monolith soil for measuring eluviation of elements, we investigated the transport intensity of nutritious elements, such as K, Na, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe, Si, Al in the soil profiles as affected by root systems of different species of vegetation in hilly and gully regions of the Chinese Loess Plateau. The objective was to explore the approach to improve the biological effectiveness of soil nutrients. The results obtained suggested that transport differences among nutritious elements in soils were not depended on the amount of nutritious elements in soil rather than the distribution of plant roots of $\leq 1\text{mm}$ in diameters. The increased effects of roots on the nutritious elements movement in soil profile decreased as the soil depth increased. The effects of plant roots on nutritious

收稿日期: 2004-10-18 修改稿收到日期: 2004-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40071054, 90202005); 中国博士后科学基金项目(2004036076)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。主要从事土壤侵蚀与环境演变、土壤质量与土壤侵蚀关系、植物根系与土壤抗侵蚀性机理方面的研究。

element movement in soil profiles increased in the following order: forest land > grass land > farm land. The critical soil depth of different plant roots affecting elements transport in soil profiles was 30cm for forestry and 10cm for grassland. The movement of nutritious elements in soil profiles increased in the following order: Ca > Na > Mg > K > Si > Al for the normal elements, and Cu > Mn > Fe for micro-elements. The effects of plant roots on the nutritious elements movement in soil profile were weak when the effective root density of tree and grass were less than 17 and 60 roots per 100 cm² and root weight of tree and grass were less than 0.11 and 0.16 g per 100 cm³ respectively. Plant roots can influence the nutritious elements movement in soil profile when the effective root density of tree and grass increased from 17 to 66 and from 60 to 106 roots per 100 cm² respectively, and root weight of tree and grass increased from 0.11 to 0.37 and from 0.16 to 0.30 g per 100 cm³ respectively. Plant roots can significantly influence the nutritious elements movement in soil profile when the effective root density of tree and grass were more than 140 and 200 roots per 100 cm², and root weight of tree and grass were more than 0.70 and 0.40 g per 100 cm³ respectively.

Key words: nutritious elements; transport intensity; plant roots; effective root density; the Loess Plateau

植物营养元素和生命必需元素在岩石—水—土壤—植物动物系统中的分布、迁移、转化、积累的规律和特点与人类的生存环境息息相关^[1]。土壤中营养元素或有益元素对作物的持续平衡供应是影响农业生产的关键。根际是营养元素由土壤进入植物体的主要界面,植被的差异是导致黄土及其上发育土壤之间差异的重要原因^[2-3]。黄土高原植被的繁生、尤其是根系的成壤作用,是自然环境下形成黄土—古土壤系列深厚剖面的唯一背景和根源^[4]。国内外对水分、氮、磷、钾等大量营养元素及铁、锰等微量元素在农田生态系统中的迁移和循环已进行了不少研究^[5-11],但对不同根系对黄土土层元素迁移强度的研究还不多。本试验以林草群落根系参数及黄土土层渗透水中元素垂直迁移强度的剖面特征为基

础,研究了不同植物群落根系对活化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 迁移的影响,首次对不同土层中根系密度及根量与元素迁移强度增加值的关系进行了定量分析,并对根系活化黄土土层元素迁移强度的有效土层深度范围作了讨论,旨在探索土壤养分生物有效性的提高途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验设在丘陵沟壑区的宜川茹坪,选择黄土高原广泛分布的林草(油松林和白草群落)根系土壤和无根系土壤为对象,黄土测样区的土壤及植物群落状况如表 1。

表 1 测样区的植物群落状况
Table 1 Community status in sampling sites

土类 Soil	植被类型 Vegetation	群落状况 Community
黄绵土 Loess soil	油松林 (<i>Pinus tabulaeformis</i>)	林龄(Age)18~20yr,密度(Density) 5500 plants/hm ² ,郁闭度(Canopy density)90%,平均株高(Plant height)10.60cm,平均胸径(Breast-high diameter) 8.3cm
黄绵土 Loess soil	白草群落 (<i>Bothriochloa ischaemum</i> L. Keng)	白草占(<i>Bothriochloa ischaemum</i> % of the total)90%,总盖度(Cover-degree)90%~95%,地被物重量(Cover plant weight) 805g/m ²
黄绵土 Loess soil	—	—

1.2 研究方法

- 1.2.1 根密度的测定 用大型挖掘剖面壁法^[12]。在选取的林、草标准地内各挖 16m(长)×1.5m(宽)×1.5m(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 No./100cm²。
- 1.2.2 根量测定 用冲洗法^[13],与土壤中元素迁

移强度的测定同步进行。当完成元素淋滤实验后,将含根系的土样置于 0.5mm 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 16~20h,然后在 1/1000 的电子天平上称重,以 100cm³ 土体中所含烘干根的重量(g)表征根量的多少(单位: g/100cm³)。

1.2.3 元素迁移能力的测定 用自行设计的原状土柱风化淋滤实验装置测定元素的迁移能力。实验包括采集原状土柱,淋滤液的收集及测定三部分。采集土样的程序为:在已做过根系密度测定的土壤(去掉了地被物)和无根系土壤剖面上,用根据根系分布情况和土壤发生层位加工制做的具不同高度的渗水采集器采集原状土柱。渗水采集器用聚氯乙烯硬质塑料管加工而成,内径为 151.5mm。在油松林地和无根系土壤剖面上采集原状土柱高度为 10、20、30、45、60、70 和 90cm,草地为 10、20、30、45、和 60cm 高,每种高度的重复数为 4,共计采集原状土柱 76 个,制备了与原状土柱相应高度的渗水采集器 76 个。将装有原状土柱的渗水采集器固定在风化淋滤实验架上,进行淋滤实验,实验用水为二次蒸馏水。实验过程中,始终保持土面 1cm 的水头高度,淋滤时间以土层达到稳定渗透时为止,对于不同植被及不同深度的土柱稳定渗透时间不同,在 90min 到 12h 之间。据不同淋滤阶段收集渗透水样,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 用原子吸收光谱法测定,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)。

2 结果与讨论

2.1 植物根系的剖面分布特征

为探求植物根系与土壤中营养元素迁移的关系,对林草群落根系沿土壤剖面分布情况进行观测。2.1.1 油松人工林根系的分布特征 将油松根系按直径大小分为 ≤1mm、1~2mm、2~5mm、5~

10mm、10~20mm 和 >20mm 共 6 个径级。油松根系密度的分布特点及油松林根密度的垂直剖面变化规律如图 1 和表 2 所示。

从图 1 和表 2 可以看出,≤1mm 的须根密度随土壤深度增加表现出在 0—30cm 土层急剧减少(平均变化率为根 - 12.54 No./ (100cm²·cm)),在 30—60 cm 逐渐减少[平均变化率为根 - 0.85 No./ (100cm²·cm)],在 60—100cm 保持最低水平[平均变化率为根 - 0.15 No./ (100cm²·cm)]。总根量的 80% 集中分布在 0—30cm 土层以内,30—60cm 土层以内根数约占总根量的 14%,60cm 以下不足总根数的 10%,约占 6%。

根系密度的剖面观测结果表明,>1mm 各径级根密度的剖面变化虽没有 ≤1mm 须根密度的变化规律明显,但仍集中分布于 0—60cm 土层以内。不同径级的根量与根密度的垂直剖面特征类似,尤其是 ≤1mm 须根根量随土层深度增加的变化曲线与 ≤1mm 须根密度的变化曲线极其相似,≤1mm 须根总根量的 74% 集中分布在 0—30cm 土层以内,在 30—60cm 土层以内约占总根量的 16%,60cm 以下仅占总数的 10%。对根密度在剖面中的分布进行回归分析,发现其遵从幂函数分布,函数表达式为:

$$R_w = 17.979 Z^{-1.335}, R^2 = 0.96,$$
$$P < 0.001, n = 40$$

(1)

式中: R_w 为根量(g/100cm³); Z 为土层深度(cm)。2.1.2 草类根系的分布特征 与乔木林相比,草本植物根系不仅具有根径细(大多为直径小于或等于 1mm 的须根)及在土壤剖面中的分布土层较浅的特征,而且根密度及根量的剖面变化趋势也极为一致。总根数的 96%、总根量的 98% 集中分布在 0—50cm 土层以内,尤其在 0—30cm 土层最为密集,分别约占总根数及总根量的 84% 和 88%,50—100cm 土层的

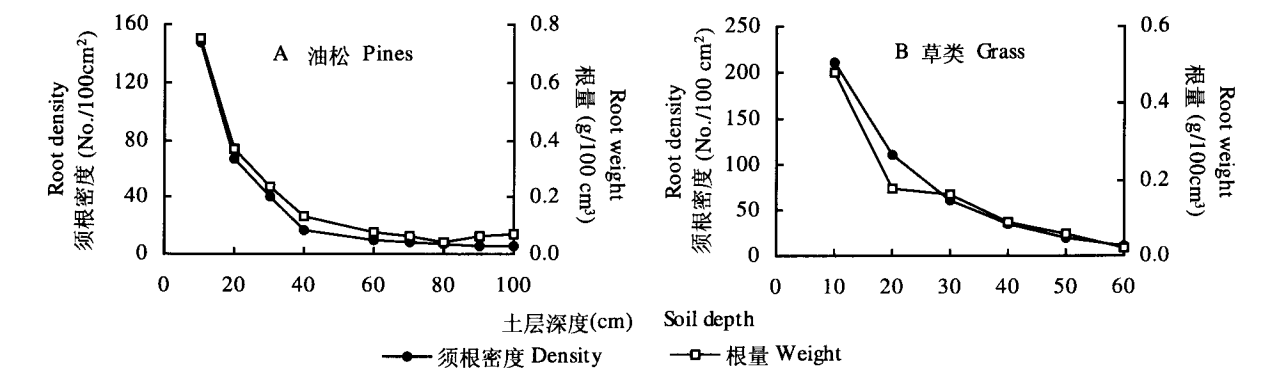


图 1 油松和草类须根(≤1mm)密度和根量的剖面变化曲线
Fig.1 Distribution of roots (≤1mm) density and weight in soil profile covered by pines and grass

表 2 油松人工林根(>1mm)密度(No./1000cm²)和根量(g/100cm³)的剖面分布特征
Table 2 Distribution of tree roots(>1mm) density and weight in soil profile

油松林 Trees	根直径 Root diameter	土层 Soil depth(cm)									
		0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
根密度	1~2mm	8	6	10	4	2	4	4	5	4	2
Roots density (No./1000cm ²)	占总根(%) % of total	17	13	20	8	4	8	8	10	8	4
	2~5mm	2	2	5	1	2	2	1	1	0	0
	占总根(%) % of total	13	13	30	6	13	13	6	6	0	0
	5~10mm	2	0	1	2	1	0	0	0	0	0
	占总根(%) % of total	33	0	17	33	17	0	0	0	0	0
	10~20mm	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0
	占总根(%) % of total	0	0	67	0	0	0	0	0	33	0
	>20mm	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	占总根(%) % of total	0	50	0	50	0	0	0	0	0	0
根量	1~2mm	0.034	0.024	0.03	0.013	0.007	0.005	0.011	0.01	0.015	0
Roots weight (g/100cm ³)	占总根(%) % of total	23	16	20	9	5	3	7	7	10	0
	2~5mm	0.03	0.06	0.026	0	0	0.01	0	0.043	0	0
	占总根(%) % of total	18	36	15	0	0	6	0	25	0	0
	5~10mm	0.085	0.248	0.08	0	0	0	0	0.155	0	0
	占总根(%) % of total	15	44	14	0	0	0	0	27	0	0
	10~20mm	0	0.295	0	0.272	0	0	0	0	0	0
	占总根(%) % of total	0	52	0	48	0	0	0	0	0	0

数量均不足总根数及总根量的 5%, 分别约占 4% 和 2%(图 1)。回归分析表明, 草本植物根系密度及根量沿土壤剖面呈指数函数递减, 其表达式为:

$$R_d = 365.82e^{-0.059Z}, R^2 = 0.98,$$
$$P < 0.001, n = 160$$

(2)

$$R_w = 0.78e^{-0.057Z}, R^2 = 0.94,$$
$$P < 0.001, n = 20$$

(3)

式中: R_d 为根密度 (No./100 cm²); R_w 为根量 (g/100 cm³); Z 为土层深度 (cm)。

根据(2)、(3)两式计算, 草类根系密度及根量沿土层深度的平均变化率在 0—30cm 土层内最大, 分别为 -7.42 No./ (100cm²·cm) 和 -1.57 × 10⁻² g/ (100 cm³·cm), 在 30—50cm 土层内急剧减小, 分别为 -2.26 No./ (100cm²·cm) 和 -5.50 × 10⁻³ g/ (100cm³·cm), 50—100cm 土层内最小, 分别为 -0.56 No./ (100cm²·cm) 和 -1.00 × 10⁻³ g/ (100cm³·cm)。

上述林草群落根系参数在黄土及其发育土壤剖面中特有的形态分布的差异性特征, 决定了其对黄土土层中营养元素剖面迁移能力产生不同影响。

2.2 植物根系对土壤渗透水中元素垂直迁移强度的活化作用

2.2.1 不同植被下土壤元素水迁移强度的变异特征 为了对不同植被类型土壤中含量不等的营养元

素随水迁移的能力进行定量分析, 本文提出“营养元素迁移强度 K_x ”的概念。 K_x 的物理意义是指单位时间内从土壤淋溶出的元素占土壤总元素的份数。 K_x 愈大, 营养元素迁移能力愈强。其表达式为:

$$K_x = \frac{a_x \cdot V}{A_x \cdot M \cdot t}$$

(4)

式中: a_x 为土壤渗透水(淋滤液)中元素 x 含量 (μg/mL); V 为渗透水的体积 (mL); A_x 为元素 x 在土壤中的含量 (μg/g); M 为土样的重量 (g); t 为渗透(或淋溶)时间 (h)。这样, K_x 的物理意义非常明确, 即为 1 克该元素的土壤的淋溶迁移速度, 单位为 h⁻¹。

据(4)式对不同植被类型土壤中营养元素迁移强度 K_x 随土层深度的变化规律进行了研究, 并计算了不同植被下土壤中营养元素迁移强度的剖面变化率(表 3)。对于油松林和无根系土壤, 土壤中营养元素(K、Na、Ca、Mg、Al、Si、Cu、Mn、Fe)迁移强度 (K_x) 与土层深度 (Z) 间呈函数关系, 其表达式为:

$$K_x = aZ^{-b}$$

(5)

式中 a 和 b 为回归系数。对于油松林土壤, 系数 a 在 0.02 ~ 7.46 之间, 系数 b 在 1.34 ~ 3.67 之间, 9 种元素的水迁移强度 (K_x) 与土层深度 (Z) 的函数关系式的相关指数 R^2 在 0.92 ~ 0.98 之间。对于无根系

土壤,系数 a 在 $7.05 \times 10^{-6} \sim 1.64 \times 10^{-3}$ 之间,系数 b 在 $0.36 \sim 2.01$ 之间, R^2 在 $0.74 \sim 0.97$ 之间。两种土壤下得到回归方程的显著水平 P 均 < 0.01 ($n = 14$)。

对于白草,土壤中营养元素(K、Na、Ca、Mg、Al、Si、Cu、Mn、Fe)迁移强度(K_x)与土层深度(Z)的函数关系式为:

$$K_x = ae^{-bZ}$$

(6)

式中 a 和 b 为回归系数,系数 a 在 $1.36 \times 10^{-5} \sim 4.28 \times 10^{-3}$ 之间,系数 b 在 $2.72 \sim 9.67$ 之间, R^2 值均很高,在 $0.86 \sim 0.99$ 之间,显著水平 P 均 < 0.01 ,每个元素的样本个数均为 10。

结果表明,在地貌类型,成土母质、土壤厚度和土壤质地相同的同一地区,仅由于植被类型不同,土壤中同种营养元素的水迁移强度 K_x 的剖面变化与根系集中分布的层次有密切关系,在 0—30cm 土层

内, K_x 的剖面变化曲线陡直,水迁移强度急剧减小,元素 K_x 的剖面递减率在 $10^{-8} \sim 10^{-3}/(\text{h} \cdot \text{cm})$ 之间,平均为 $10^{-4.95}/(\text{h} \cdot \text{cm})$,比农地土壤大 1.27 个数量级;在 30—60cm 土层内,曲线较缓,水迁移强度 K_x 明显小于上层, K_x 的剖面递减率在 $10^{-8} \sim 10^{-5}/(\text{h} \cdot \text{cm})$ 之间,平均为 $10^{-6.21}/(\text{h} \cdot \text{cm})$,比农地土壤大 1.23 个数量级;在 60cm 以下土层, K_x 基本保持在最低状态的同一水平, K_x 的平均剖面递减率为 $10^{-6.68}/(\text{h} \cdot \text{cm})$,比 0—30cm 和 30—60cm 土层分别小 1.73 和 0.74 个数量级,但仍比同层无根系土壤高 1.43 个数量级。这些变化不仅说明林草地上部土层根系稠密,影响元素水迁移强度的作用巨大,下部根系稀疏,影响元素水迁移强度的作用减弱,而且说明即使土层中有很少的根系缠绕分布(与同层无根系土壤比较)也会导致元素水迁移强度 K_x 发生明显变化。

表 3 不同植被下土壤中元素迁移强度的剖面变化率

Table 3 Changing rates of nutrients elements translation in soil profile covered by tree and grasses

类型 Vegetation	深度 Soil depth (cm)	变化率 Changing rates ($\text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)								
		K	Na	Ca	Mg	Al	Si	Cu	Mn	Fe
油松林 Trees	0—30	-1.23×10^{-3}	-5.62×10^{-4}	-1.55×10^{-3}	-2.75×10^{-4}	-8.71×10^{-5}	-2.55×10^{-5}	-9.98×10^{-4}	-1.57×10^{-4}	-1.38×10^{-4}
	30—60	-2.27×10^{-5}	-5.18×10^{-5}	-9.89×10^{-5}	-2.63×10^{-5}	-5.87×10^{-7}	-8.64×10^{-7}	-3.43×10^{-5}	-2.27×10^{-6}	-9.28×10^{-7}
	>60	-2.11×10^{-6}	-1.26×10^{-5}	-2.05×10^{-5}	-6.53×10^{-6}	-3.09×10^{-8}	-1.15×10^{-7}	-6.42×10^{-5}	-1.88×10^{-7}	-4.60×10^{-8}
白草 Grass	0—30	-7.99×10^{-5}	-1.81×10^{-5}	-6.50×10^{-5}	—	-6.27×10^{-7}	-1.09×10^{-6}	-4.69×10^{-5}	-2.54×10^{-6}	-1.14×10^{-6}
	30—60	-9.79×10^{-6}	-9.47×10^{-6}	-2.69×10^{-5}	—	-9.15×10^{-8}	-3.45×10^{-7}	-1.07×10^{-5}	-5.81×10^{-7}	-1.50×10^{-7}
	>60	-1.25×10^{-6}	-5.96×10^{-6}	-1.38×10^{-5}	—	-1.47×10^{-8}	-1.36×10^{-7}	-2.99×10^{-6}	-1.62×10^{-7}	-3.59×10^{-8}
无根系 Farmland	0—30	-1.85×10^{-6}	-1.95×10^{-5}	-1.05×10^{-5}	-1.38×10^{-6}	-2.17×10^{-7}	-1.41×10^{-7}	-1.22×10^{-5}	—	-2.74×10^{-5}
	30—60	-2.76×10^{-7}	-7.66×10^{-7}	-2.11×10^{-6}	-3.81×10^{-7}	-5.55×10^{-7}	-2.61×10^{-8}	-1.15×10^{-6}	—	-1.24×10^{-8}
	>60	-8.85×10^{-8}	-3.42×10^{-7}	-8.08×10^{-7}	-1.75×10^{-7}	-6.29×10^{-10}	-9.52×10^{-9}	-2.81×10^{-7}	—	-1.96×10^{-9}

据不同元素 K_x 值可以看出,元素垂直剖面迁移的强度序列具有明显的同一性和差异性特征:(1)在风化淋溶过程中,不同植被土层中均以常量元素 Ca 和微量元素 Cu 的淋失量强烈,常量元素 Si、Al 和微量元素 Fe 是最难移动的元素;(2)尽管土壤的利用状况(植物种类)不同,但在林(30cm 以下土层)草(10cm 以下土层)和农地土壤中常量元素水迁移强度序列为 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Al}$,微量元素基本为 $\text{Cu} > \text{Mn} > \text{Fe}$;(3)在林草地 0—30cm 土层内同种元素,尤其是 Ca、Na、Mg、K、Cu、Mn 在迁移能力的等级划分中比农地土壤高 1—2 个等级,林地土壤元素迁移强度序列有明显变异的临界土层深度为 30cm,而草地则为 10cm。进一步说明,植物根系在对土壤中元素的活化迁移,提高土壤矿质养分的生物有效

性具有重要作用,同时揭示不同植物种类,由于其根系剖面分布的差异,在影响元素迁移强度方面可能存在一定的有效土层深度范围。

2.2.2 植物根系对土壤中元素迁移能力的活化效应 根系对元素迁移能力的活化效应是其影响黄土土层物质分异的重要原因之一,其值大小可用相同土层间隔内含根系和无根系土壤中元素迁移强度的测定值(K_x, h^{-1})的差值来表征($\Delta K_x, \text{h}^{-1}$),不同植物群落根系对土壤中元素迁移的活化效应及剖面变化规律如表 4 所示。

对于油松林,根系对土壤中元素(K、Na、Ca、Mg、Al、Si、Cu、Mn、Fe)迁移强度的活化效应(ΔK_x)与土层深度(Z)的函数关系式为:

$$\Delta K_x = aZ^{-b} \tag{7}$$

式中 a 和 b 为回归系数。对于油松林土壤,系数 a 在 0.1~10.35 之间,系数 b 在 1.32~3.77 之间, R^2 在 0.92~0.98 之间,显著水平 P 均 < 0.01 ($n = 14$)。

对于白草,根系对土壤中元素(K、Na、Ca、Mg、Al、Si、Cu、Mn、Fe)迁移强度的活化效应(ΔK_x)与土层深度(Z)的函数关系式为:

$$\Delta K_x = ae^{-bZ} \tag{8}$$

式中 a 和 b 为回归系数,系数 a 在 1.22×10^{-5} ~ 4.86×10^{-3} 之间,系数 b 在 0.03~0.11 之间, R^2 在 0.80~0.99 之间,显著水平 P 均 < 0.01 ($n = 10$)。

结果表明,随土层深度增加,根系对元素迁移的活化作用减弱,植物种类不同,根系对元素迁移的活化作用及剖面变化率显著不同,不同植物群落根系对土壤中元素迁移强度的活化能力为油松林 > 草类。其特征总结为:(1)油松林群落根系活化土壤中元素迁移的效应沿土层深度呈幂函数规律递减,

特点是在 0—10cm 土层最强,10—30cm 土层较强,30—45cm 土层急剧减弱,45cm 以下土层降低到最低水平,45cm 土层深处为油松林群落根系对元素迁移有明显活化效应的临界土层深度;(2)白草群落,其根系对元素迁移能力的活化效应沿土层深度呈指数函数递减,以 0—10cm 土层最强,10—30cm 较强,30cm 以下土层急剧减小,草类群落根系对元素迁移有明显活化作用的临界土层深度为 30cm;(3)无论是油松林,还是草类,其群落根系影响元素迁移强度的作用具有两个显著特征,一是林草根系对同一土层深度范围内不同元素迁移强度活化效应的大小序列基本一致,二是林草根系对元素迁移强度活化作用的垂直剖面变化规律与其根系的剖面分布具有相同的函数递减关系。这说明不同基因型植物,由于其根系在剖面中的分布状况不同,必然导致其适应土壤物理化学养分逆境、提高土壤养分生物有效性的能力及土层深度范围不同。

表 4 植物根系影响土壤中元素迁移强度的剖面变化率($d \Delta K_x / d Z, h^{-1} \cdot cm^{-1}$)

Table 4 Changing rates of nutrients elements transportation in soil profile as affected by roots

类型 Vegetation	深度 Soil depth (cm)	K	Na	Ca	Mg	Al	Si	Cu	Mn	Fe
油松林 Trees	10	-3.7×10^{-3}	-1.3×10^{-3}	-4.1×10^{-3}	-6.2×10^{-4}	-2.6×10^{-4}	-8.1×10^{-5}	-2.7×10^{-3}	-4.9×10^{-4}	-4.2×10^{-4}
	20	-2.5×10^{-4}	-2.5×10^{-4}	-5.9×10^{-4}	-1.2×10^{-4}	-9.9×10^{-5}	-7.2×10^{-6}	-2.8×10^{-4}	-3.7×10^{-5}	-1.5×10^{-5}
	30	-5.1×10^{-5}	-9.8×10^{-5}	-1.9×10^{-4}	-4.8×10^{-5}	-1.5×10^{-6}	-1.7×10^{-6}	-7.2×10^{-5}	-2.8×10^{-6}	-2.2×10^{-6}
	45	-1.1×10^{-5}	-3.7×10^{-5}	-6.3×10^{-5}	-1.9×10^{-5}	-2.2×10^{-7}	-4.3×10^{-7}	-1.9×10^{-5}	-5.3×10^{-7}	-3.2×10^{-7}
	60	-33.4×10^{-6}	-1.9×10^{-6}	-2.8×10^{-5}	-9.6×10^{-6}	-5.6×10^{-8}	-1.6×10^{-7}	-7.3×10^{-6}	-9.8×10^{-7}	-8.2×10^{-8}
	75	-1.8×10^{-6}	-1.1×10^{-5}	-1.5×10^{-5}	-5.9×10^{-6}	-1.9×10^{-8}	-7.2×10^{-8}	-3.5×10^{-6}	-3.0×10^{-7}	-2.8×10^{-8}
	90	-7.1×10^{-7}	-7.2×10^{-6}	-9.2×10^{-6}	-3.8×10^{-6}	-8.3×10^{-9}	-3.8×10^{-8}	-1.9×10^{-6}	-1.2×10^{-8}	-1.2×10^{-8}
白草 Grass	10	-1.8×10^{-4}	2.7×10^{-5}	-9.9×10^{-5}	-	-9.1×10^{-7}	-1.5×10^{-6}	-7.4×10^{-5}	-5.7×10^{-6}	-1.8×10^{-6}
	20	-6.2×10^{-5}	-1.9×10^{-5}	-6.3×10^{-5}	-	-3.9×10^{-7}	-8.9×10^{-7}	-3.7×10^{-5}	-4.9×10^{-6}	-8.1×10^{-7}
	30	-2.1×10^{-5}	1.4×10^{-5}	-4.1×10^{-5}	-	-1.7×10^{-7}	-5.2×10^{-7}	1.8×10^{-5}	-1.1×10^{-6}	-3.6×10^{-7}
	45	-4.4×10^{-6}	-8.2×10^{-6}	-2.1×10^{-5}	-	-4.8×10^{-8}	-2.3×10^{-7}	-6.4×10^{-6}	-3.7×10^{-7}	-1.1×10^{-7}
	60	-8.9×10^{-7}	-4.9×10^{-6}	1.1×10^{-5}	-	-1.4×10^{-8}	-1.0×10^{-7}	2.2×10^{-6}	-1.2×10^{-7}	-3.2×10^{-8}

2.2.3 植物根系对土壤中元素迁移能力的活化效应系数 所谓根系对元素迁移能力的活化效应系数,指根系土壤相对于无根系黄土母质元素迁移强度增加的倍数,它是确定植物根系活化元素迁移能力及其有效土层深度的定量指标。林草群落根系对黄土土层元素迁移强度的活化效应系数(表 5)可以清楚看出,不同植物群落根系对元素迁移强度的活化效应不仅具有非常明显的相对性序列,而且具有极为明显的垂直剖面分异性特征。比较林草两种元

素的水迁移环境,其群落根系均对 Al、Fe、K、Cu 的迁移具有很强的相对活化能力,这种活化能力的相对性大小序列在 0—30cm 土层范围内的表现尤为突出。显而易见,油松林群落根系对元素迁移强度具有明显活化作用的土层深度范围为 0—45cm,而白草群落根系则为 0—30cm。不同土层根系对元素迁移强度活化效应的相对贡献大小与根系在土壤剖面中的上部密集、下部稀疏的特征密切相关。0—30cm 土层内油松林群落根系对不同元素迁移活化效应的

表 5 植物根系活化土壤迁移能力的效应系数

Table 5 Coefficients of plant roots for intensifying nutritious elements transportation in soil profile										
类型 Vegetation	土层(cm) Soil depth	K	Na	Ca	Mg	Al	Si	Cu	Mn	Fe
油松林 Trees	10	1551	210	226	180	43478	428	878	729	13706
	20	143	55	65	28	1162	17	129	44	651
	30	130	28	37	21	924	37	78	24	563
	45	19	24	27	20	323	12	46	9	113
	60	8	16	13	10	56	4	15	2	22
	75	4	12	6	10	15	3	7	1	8
	90	3	8	3	7	8	1	4	—	2
白草 Grass	10	204	11	19	—	689	31	80	23	334
	20	114	10	16	—	292	19	32	15	199
	30	17	9	14	—	80	10	22	6	55
	45	3	6	5	—	21	4	8	2	13
	60	1	2	2	—	13	2	2	1	8

相对贡献率约占全剖面中根系活化效应系数总和的 83%~99%,平均为 93%,而 30cm 以下土层不足根系活化效应系数总和的 7%;白草群落根系在 0—30cm 土层内活化元素迁移效应的相对贡献率约占全剖面总活化效应系数的 79%~98%,平均为 92%,30cm 以下土层仅为 8%左右。因此,定量研究临界有效根系参数指标,探讨不同植物群落对土壤养分物理化学逆境的适应性机理具有重要意义。

2.3 根系参数与元素迁移强度活化效应的关系

将不同径级的根系密度及根量与元素迁移强度的增加值分别进行回归分析表明,直径≤1mm 的须根密度及根量与元素迁移强度的增加值呈显著的正

相关关系(表 6)。分析表 6 的结果可以看出,根系对元素迁移强度的活化效应与≤1mm 径级的须根密度比与须根根量的关系更为显著,说明不同植物群落根系活化土壤中元素迁移强度的作用大小主要取决于直径≤1mm 须根在剖面中的缠绕分布状况。用不同土层中须根参数(尤其是须根密度)估算根系对元素迁移的活化效应的大小更能揭示根系作用的实质。据此认为,直径≤1mm 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^[9-12],分别称为有效根密度和有效根量。

表 6 根密度 (R_d) 和根量 (R_w) 与营养元素迁移强度增加值 (ΔK_x) 的关系 $\Delta K_x = aR_d^b, \Delta K_x = AR_w^B$

Table 6 Regression relationship of ΔK_x with R_d and ΔK_x with R_w									
类型	元素	$\Delta K_x = aR_d^b$			$\Delta K_x = AR_w^B$			P	n
Vegetation	Elements	a	b	R ²	A	B	R ²		
油松林 Trees	K	1.23×10^{-6}	1.76	0.98	1.67E-03	2.11	0.97	<0.01	14
	Na	1.29×10^{-4}	0.81	0.92	1.03E-02	0.97	0.91	<0.01	14
	Ca	7.94×10^{-5}	1.08	0.97	2.63E-02	1.28	0.91	<0.01	14
	Mg	7.45×10^{-5}	0.774	0.84	4.48E-03	2.68	0.84	<0.01	14
	Al	5.22×10^{-9}	2.24	0.95	9.21E-04	1.77	0.94	<0.01	14
	Si	1.19×10^{-7}	1.51	0.94	3.79E-04	1.66	0.89	<0.01	14
	Cu	7.60×10^{-6}	1.40	0.96	1.40E-02	2.19	0.95	<0.01	14
	Mn	4.83×10^{-8}	2.00	0.95	1.83E-03	2.72	0.96	<0.01	14
	Fe	6.35×10^{-9}	2.31	0.98	1.48E-03	1.97	0.94	<0.01	14
白草 Grass	K	1.38×10^{-7}	1.77	0.96	5.01E-03	0.61	0.82	<0.01	10
	Na	3.78×10^{-5}	0.57	0.81	1.32E-03	0.74	0.89	<0.01	10
	Ca	6.50×10^{-5}	0.74	0.93	3.87E-03	1.32	0.91	<0.01	10
	Al	2.48×10^{-9}	1.39	0.96	2.60E-05	0.85	0.83	<0.01	10
	Si	2.11×10^{-7}	0.89	0.97	5.08E-05	1.18	0.86	<0.01	10
	Cu	9.77×10^{-6}	1.17	0.99	2.58E-03	1.18	0.97	<0.01	10
	Mn	1.78×10^{-8}	1.23	0.99	1.61E-04	1.21	0.93	<0.01	10
	Fe	7.22×10^{-8}	0.87	0.94	1.23E-05	1.26	0.82	<0.01	10

植物根系活化元素迁移的能力具有明显的区域范围:当林草群落的有效根密度分别小于 17 和 60 No./100cm²,根量分别小于 0.11 和 0.16 g/100cm³ 时,根系对土壤元素迁移强度的增加效应较小;当林、草群落的有效根密度分别为 17~66 和 60~106 No./100cm²,根量分别为 0.11~0.37 和 0.16~0.30 g/100cm³ 时,根系对土壤元素迁移强度有显著的增加作用;当林、草群落的根密度分别超过 140 和 200 No./100cm²,根量超过 0.70 和 0.40 g/100cm³ 时,根系对土壤中元素迁移的能力具有极其显著的强化作用。

根据表 6 中的回归模式,对有效根系活化元素迁移的效应进行计算。结果表明,有效根密度每增加 100 No./100cm²,油松林群落根系土壤中元素 Al、Fe、Mn 的迁移强度将增加 4~5 个数量级(104~105),K、Ca、Si、Cu 均将增加 3 个数量级,Mg、Na 将分别增加 1 和 2 个数量级;在白草群落根系土壤中,有效根密度每增加 100 No./100cm²,K、Al、Mn 的迁移强度均将提高 3 个数量级,Ca、Si、Cu、Fe 均将提高 2 个数量级,Na 将提高 1 个数量级。这进一步揭示,植物群落根系对不同元素迁移强度活化能力的相对性大小,并非与该元素在土壤中的含量成正比,而是与有效根系参数呈非常显著的正相关关系。不同基因型植物有效根密度和根量的特殊剖面分布特征,是其适应和改善土壤养分物理化学逆境的生理生态学基础。

3 结论

1) 不同植被类型土壤中营养元素的迁移强度随土层深度增加呈递减规律。

2) 在林(30cm 以下土层)草(10cm 以上土层)和农地土层中常量元素水迁移强度序列为 Ca > Na > Mg > K > Si > Al,微量元素基本为 Cu > Mn > Fe。

3) 上覆植被不同,黄土土层的化学风化淋溶速率具有显著的剖面差异,其大小顺序为:林地 > 草地 > 农地。

4) 林草地 0—30cm 土层内,Ca、Na、Mg、K、Cu 和 Mn 在元素迁移强度的等级划分中比农地土壤高 1~2 个等级,林、草地土壤中元素迁移强度序列有明显变异的临界土层深度分别在 30cm 和 10cm 处。

5) 植物根系活化元素迁移的能力具有明显的区域范围:当林草群落的有效根密度分别小于 17 和 60 No./100cm²,根量分别小于 0.11 和 0.16g/

100cm³ 时,根系对土壤元素迁移强度的增加效应较小;当林、草群落的有效根密度分别为 17~66 和 60~106 No./100cm²,根量分别为 0.11~0.37 和 0.16~0.30g/100cm³ 时,根系对土壤元素迁移强度有显著的增加作用;当林、草群落的根密度分别超过 140 和 200 No./100cm²,根量超过 0.70 和 0.40 g/100cm³ 时,根系对土壤中元素迁移的能力具有极其显著的强化作用。

参考文献:

- [1] 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 Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 84-91.
- [2] 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.
- [3] 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 Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(1): 6-11.
- [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]. Bulletin of Soil and Water conservation. 1991, 11(1): 1-8.
- [5] Tester M, Leigh R A. Partitioning of nutrient transport process in roots[J]. J. Exp. Bot., 2001, 52: 445-457.
- [6] Steudle E, Peterson C A. How does water get through roots[J]. J. Exp. Bot., 1998, 49: 775-788.
- [7] Azaiz 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.
- [8] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J R. Maximum rooting depth of vegetation types at global scale[J]. Oecologia, 1996, 108: 583-595.
- [9] Frensch J, Hsiao T C, Steudle E. Water and solute transport along developing maize roots[J]. Planta, 1996, 198: 348-355.
- [10] 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.
- [11] 赵秉强,张福锁,李增嘉.间作冬小麦根系数量与活性的空间分布及变化规律[J].植物营养与肥料学报,2003,9(2): 214-219.
Zhao B Q, Zhang F S, Li Z J. The vertical distribution and its change of root quantity and activity of inter - planted winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 214-219.
- [12] Bohm W. Methods of studying root systems[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-verlag, 1979.
- [13] 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-scourability of soil on the Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36: 2077-2082.