黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性*

李　勇　　徐晓琴

(中国科学院地球化学研究所，贵阳 550002)

朱显谟　　田积莹

(中国科学院水利部西北水土保持研究所，杨陵　712100)

关键词　植物根系、土壤渗透力强化值、有效性模型

研究[1-3]表明，在黄土丘陵陡坡上积极建造人工植被，“拦蓄水分，就地入渗”，是提高土壤渗透能力，防治土壤侵蚀的关键措施。迄今，有关植被地上部分对土壤渗透力的影响研究甚多[4,5]，但涉及地下部分根系强化土壤渗透作用的定量研究尚未见报道。本文首次以定量描述植物根系强化土壤剖面各层次渗透力的作用及其相互关系为基础，建立根系强化土壤渗透力有效性的数学模型，并对模型在水土保持优良草树种的选择及其合理配置中的应用进行讨论。

一、材料与方法

本研究选择黄土高原广泛分布的几种优良水土保持乔灌草(油松林、沙棘林、白草和黄菅草群落)为对象，实验设在黄土丘陵沟壑区的宜川铁龙湾，海拔 970—1020m，测样区的土壤为黄绵土类。植物根系密度的测定用大型挖掘剖面壁法[6]，土壤渗透力的测定用大型环刀（100 cm^2 × 10cm）法，程序为：首先将未分解的枯枝落叶层去掉，然后对已作过根系密度调查的土壤剖面，在0—100cm 深度每隔 10cm 土层，在 100—200cm 深度每隔 20cm 土层采集原状土壤，进行土壤渗透力测定。

二、结果与讨论

1. 植物根系强化土壤渗透力的剖面特征　研究[1)]表明，不同植被下土壤渗透力沿土层深度呈现的由高到低的层次间的明显差异，与其根系分布的上层密下层疏的特征紧密相关。表 1 是以无根系土壤的渗透力为基准计算获得不同植物根系对土壤渗透力的强化值。表 1 说明，土层深度增加，根系对土壤渗透力的强化值降低，不同植物种类，其根系提高土壤渗透力的幅度及临界土层深度有明显差异。其特征为：油松林根系在 0—40cm 土层内对土壤渗透力有显著增强作用，沙棘林及草类根系在 0—30cm土层内显著提高了土壤的渗透力。不同植物根系对土壤渗透力有显著提高作用的土层深度范围与其提高土壤抗冲性临界土层相一致的规律[7]，反映了根系削减超渗径流，从而提高土壤抗冲性的特征。

本文 1991 年 2 月 7 日收到。1991 年 5 月 16 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

1) 李勇，博士论文，1990。

表 1　不同植物根系对土壤渗透力的强化值*

土层 (cm)	油松林			沙棘林			草　类			无根系土壤		
	$\triangle h$	$\triangle K_t$	$\triangle K_{10}$	$\triangle h$	$\triangle K_t$	$\triangle K_{10}$	$\triangle h$	$\triangle K_t$	$\triangle K_{10}$	h	K_t	K_{10}
0—10	149.17	4.97	5.81	43.63	1.46	1.69	129.65	4.32	3.68	91.29	3.04	1.61
10—20	81.40	2.71	1.62	7.16	0.24	0.57	111.08	3.70	2.61	21.79	0.73	0.19
20—30	33.12	1.10	0.87	6.02	0.23	0.54	41.92	1.40	0.94	22.81	0.76	0.23
30—40	26.56	0.88	0.73	3.39	0.14	0.24	21.55	0.72	0.39	21.65	0.72	0.22
40—50	15.05	0.50	0.19	3.38	0.11	0.22	20.43	0.68	0.23	21.75	0.73	0.19
50—60	11.05	0.37	0.17	—	—	0.17	15.15	0.50	0.13	21.17	0.71	0.19
60—70	10.62	0.35	0.17	—	—	0.17	15.15	0.50	0.13	21.67	0.72	0.20
70—80	9.66	0.32	0.16	2.96	0.04	0.06	12.15	0.40	0.09	21.62	0.72	0.19
80—90	7.97	0.26	0.16	2.96	0.04	0.06	12.15	0.40	0.09	21.50	0.72	0.19
90—100	3.63	0.12	0.07	—	—	0.05	2.42	0.08	0.08	20.63	0.69	0.17

* $\triangle h$: 前30min土壤渗透总量 (h) 的增量 (mm). $\triangle K_t$: 前30min 土壤平均渗透率 (K_t) 的增量 (mm/min). $\triangle K_{10}$:温度为 10℃ 时土壤稳定渗透率(K_{10})的增量 (mm/min).

2. 植物根系参数与土壤渗透力强化值及其他物理性质的关系　将不同径级的根密度、根量与土壤渗透力的强化值联系起来分析，发现不同植物种类，其根系对土壤渗透力的强化值与 ≤1mm 径级的须根密度(有效根密度)关系极为密切，呈线性正比关系，其线性回归方程如表 2 所示. 计算表明，土壤渗透力强化值与有效根密度的相关系数为 0.9368—0.9902，检验达到极显著水平 ($p < 0.001$). 这说明，植物根系强化土壤渗透性的能力主要取决于有效根密度在土壤剖面中的分布盘绕状况，有效根密度的物理基础是 100cm² 土壤截面上 ≤1mm 须根的个数.

表 2　土壤渗透能力强化值与有效根密度(R_d)的函数关系

植被类型	函数关系式	相关系数 (r)	显著水平 (p)	样本数 (n)
油松林	$\triangle h = -0.2287 + 0.2606R_d$	0.9881	<0.001	20
	$\triangle K_t = -0.0099 + 0.0087R_d$	0.9881	<0.001	20
	$\triangle K_{10} = -0.2027 + 0.0092R_d$	0.9368	<0.001	20
沙棘林	$\triangle h = 0.9960 + 0.0865R_d$	0.9893	<0.001	20
	$\triangle K_t = 0.0321 + 0.0029R_d$	0.9902	<0.001	20
	$\triangle K_{10} = 0.1075 + 0.0038R_d$	0.9760	<0.001	20
草类	$\triangle h = 14.5383 + 0.1698R_d$	0.9519	<0.001	20
	$\triangle K_t = 0.4831 + 0.0057R_d$	0.9515	<0.001	20
	$\triangle K_{10} = 0.1283 + 0.0053R_d$	0.9884	<0.001	20

为深入揭示植物根系强化土壤渗透力的原因，对有效根密度与根系提高土壤水稳性团粒及非毛管孔隙度的增量进行相关性分析 (表 3)，结果表明，植物根系提高土壤水稳性团粒 (> 0.25mm) 含量及土壤孔隙度的作用实质是其有效根密度对 > 5mm 和 5—2mm 二个粒级的土壤水稳性团粒及非毛管孔隙度的增加效应，根系对该二个粒级水稳性团粒含量及非毛管孔隙度的提高，是其稳定土层结构、强化土壤渗透力的重要机理.

3. 植物根系强化土壤渗透力的有效性分析　所谓根系强化土壤渗透力的有效性 (或有效作用强度) 系指根系提高土壤渗透力的增量能够消除或抑制某一时段内暴雨产生超渗径流

表 3　植物根系提高土壤水稳性团粒及非毛管孔隙度的增量与有效根密度的相关系数(r)

项　目	水稳性团粒 (mm)						非毛管孔隙度
	>5	5—2	2—1	1—0.5	0.5—0.25	>0.25	
油松林	0.98065***	0.91886***	0.56852	−0.10992	−0.22247	0.98808***	0.99068***
沙棘林	0.98168***	0.99180***	0.86314*	0.38243	−0.10399	0.96256***	0.97569***
草类	0.96153***	0.98687***	0.88952*	0.36899	0.10401	0.99103***	0.96865***

* $P<0.05$, *** $P<0.001$.

的能力,用有效性系数 K 表征，其数值决定于某一时段内根系提高土壤渗透力的增量与某一时段内暴雨强度之比:

K = 某一时段内根系提高土壤渗透力的增量 (ΔK_t 或 ΔK_{10}, mm/min)/
某一时段内的暴雨强度 (mm/min),

K 愈大,根系抑制或削弱暴雨产生超渗径流冲刷的有效作用强度愈大，$K \geq 1$，根系完全可抑制超渗径流产生,当 $0 < K < 1$ 时,说明根系可削弱超渗径流冲刷的动力.

为进一步定量描述植物根系提高土壤渗透力的有效作用强度，对在黄土区常见降水历时(30、120min)，不同暴雨 (0.5、2.0、4.0mm/min) 强度下，植物根系提高土壤渗透力的有效性系数与其有效根密度 (R_d) 的关系进行回归分析(表 4),发现不同植物种类，K 与 R_d 均呈线性正相关关系,其回归模型通式为

$$K = a + bR_d, \tag{1}$$

式中 K 为根系提高土壤渗透力的有效性系数,无量纲; R_d 为有效根密度 (个/100cm²); a、b

表 4　根系提高土壤渗透力的有效性系数 (K) 与有效根密度 (R_d) 的函数关系式

降雨历时 (min)	雨强 (mm/min)	函数关系式	相关系数 (r)	显著水平 (p)	样本数 (n)	植被类型
30	0.5	$K = -0.05127 + 0.01746R_d$	0.98722	<0.001	20	油松林
	2.0	$K = -0.01181 + 0.00437R_d$	0.98721	<0.001	20	
	4.0	$K = -0.00501 + 0.00021\,6R_d$	0.98780	<0.001	20	
120	0.5	$K = -0.57423 + 0.01890R_d$	0.93431	<0.001	20	
	2.0	$K = -0.14012 + 0.00473R_d$	0.93405	<0.001	20	
	4.0	$K = -0.00717 + 0.00237R_d$	0.93585	<0.001	20	
30	0.5	$K = 0.11812 + 0.00566R_d$	0.98830	<0.001	20	沙棘林
	2.0	$K = 0.03133 + 0.00141R_d$	0.98829	<0.001	20	
	4.0	$K = 0.01723 + 0.00071R_d$	0.98582	<0.001	20	
120	0.5	$K = 0.27523 + 0.00659R_d$	0.98461	<0.001	20	
	2.0	$K = 0.07083 + 0.00165R_d$	0.98508	<0.001	20	
	4.0	$K = 0.03453 + 0.00082R_d$	0.98164	<0.001	20	
30	0.5	$K = 0.96624 + 0.01132R_d$	0.95151	<0.001	20	草类
	2.0	$K = 0.24156 + 0.00283R_d$	0.95151	<0.001	20	
	4.0	$K = 0.12107 + 0.00142R_d$	0.95047	<0.001	20	
120	0.5	$K = 0.25659 + 0.01059R_d$	0.98841	<0.001	20	
	2.0	$K = 0.06794 + 0.00264R_d$	0.98821	<0.001	20	
	4.0	$K = 0.03218 + 0.00153R_d$	0.98901	<0.001	20	

为待定参数。表 4 说明，参数 b 对于同一种植物根系在不同降雨历时特定暴雨强度下无显著差异，即 b 仅与植物种类及雨强有关，而与降雨历时无关。植物种类不同，b 值不同，b 值愈大，K 值愈大，根系提高土壤渗透力的有效作用强度愈大。因此，它是根系提高土壤渗透性能有效性的特征参数，可用于定量评价不同雨强下不同植物根系抑制超渗径流冲刷的能力大小，从而为选育水土保持优良草树种提供科学依据。

统计检验(表 4)表明，K 与 R_d 相关程度达到极显著水平，相关系数 r 在 0.93405—0.98901 之间，说明用该回归模型描述根系抑制超渗径流产生的有效性是符合实际的。据表 4 对黄土高原常见的暴雨强度 2.0mm/min 下不同植物根系提高土壤渗透力的有效性系数进行计算，结果表明，有效根密度每增加 100 个/100cm^2，油松林地土壤超渗径流将降低 43.7—47.3%，30、120min 内渗入土壤中的水量将分别增加 26.22mm 和 113.52mm；沙棘林地土壤超渗径流量将减小 14.1—16.5%，30、120min 内土壤渗透总量将分别增加 8.46mm 和 39.60mm；在天然草地，土壤超渗径流量将有 26.4—28.3%受到抑制，而在 30、120min 内土壤接纳的降水量将分别增加 16.98mm 和 63.36mm。这不仅说明植物根系提高土壤对降雨的渗透能力具有极其显著的作用，而且也说明只要掌握不同植物有效根密度的时空分布特征，根据根系强化土壤渗透力有效性的数学模型，就可以对不同植物根系削弱超渗径流，涵养水源的功能作出动态定量评价，从而确定水土保持林草措施配置的最佳方案。

参 考 文 献

[1] 朱显谟，水土保持通报，4(1984)，4：1—4.
[2] 李勇等，科学通报，35(1990)，5：390—393.
[3] 李勇等，水土保持通报，9(1989)，2：22—26.
[4] 蒋定生等，水土保持学报，4(1990)，2：1—5.
[5] 卢俊培，植物生态学与地植物学报，12(1988)，3：181—188.
[6] Bohm, W., *Methods of Studying Root Systems*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979.
[7] 李勇等，科学通报，36(1991)，12：935—938.