

中水灌溉条件下含砾砂土污染物运移的初步研究

唐 莲<sup>1,2</sup>, 白 丹<sup>3</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院;

2. 宁夏大学西部退化生态恢复与重建省部共建重点实验室, 银川 750021; 3. 西安理工大学水资源所, 西安 710048)

摘 要: 以宁夏回族自治区大武口市森林公园的含砾砂土为研究对象, 通过室内试验, 对中水灌溉条件下砂砾质土壤在不同灌水量、多次连续灌水、降雨淋洗等不同来水条件下水分、污染物运移的规律进行了初步的研究, 为微污染水用于绿化灌溉对砂砾质土壤中污染物运移及累积的研究提供科学依据。

关键词: 中水灌溉; 砂土; 污染物运移; 试验研究

中图分类号: S274. 3; X53

文献标识码: A

文章编号: 1005- 3409(2007)01- 0194- 03

The Primary Experiment Studies of Solute Transport  
in Sandy Soil Under Reclaimed Water Irrigation

TANG Lian<sup>1,2</sup>, BAI Dan<sup>3</sup>

(1. Civil Engineering and Water Conservancy College of Ningxia University;

2. Ningxia University Western Degenerated Ecosystem Resume and Regeneration Key Laboratory, Yinchuan 750021, China;

3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Based on the experiment studies, the study on water and solute transport in sandy soil under reclaimed water irrigation was made. The result can give some reference for the effect on soil solute transport and soil environment under micro-contaminated water irrigation.

**Key words:** reclaimed water irrigation; sandy soil; solute transport; experiment studies

所谓“中水”, 也称“再生水”。中水用于农业及绿化灌溉, 既能利用水分, 又能利用肥分。中水与原水相比, 污染物的含量有较大的降低, 但中水中一些成分如各种形态的氮、微量有机化合物、磷、微生物、微量金属等都仍有一定含量, 在长期灌溉的情况下, 这些物质经由土壤包气带土层随水向下渗透、迁移, 在土壤中发生各种各样的反应, 可能使土壤环境及浅层地下水环境恶化。尤其是砂质土壤, 渗透性强, 对污染物的吸附性较差, 在利用微污染水用于砂质土壤的灌溉时, 研究污染物的迁移规律成为重要的课题。

1 研究区自然条件

本研究区位于宁夏回族自治区大武口市, 该地区属内陆中温带干旱区, 年平均降雨量仅为 189.6 mm, 而年蒸发量却高达 2 317 mm, 降水多集中在 6~ 9 月, 约占全年降水量的 71.8%, 气候干燥少雨, 风大沙多, 水资源严重缺乏, 生态环境恶劣。研究区位于贺兰山前洪积扇区冲洪积斜地, 地势由南到北倾斜, 表层由碎石、砾石、砂土组成, 现已规划为城市的防护绿化林带、森林公园约 0.2 万 hm<sup>2</sup>, 针对该地区干旱缺水的实际, 计划利用中水厂出水灌溉绿化林带, 以提高水资源的利用率, 实现城市污水资源化, 补充水资源。

2 试验设计

本研究主要是针对长期利用中水对宁夏石嘴山市大武

口区森林公园进行林草灌溉土壤环境影响的研究, 对污染物 (NH<sub>4</sub>-N、P) 在土壤非饱和带的运移、积累规律进行研究。

(1) 参数的测定。经土壤颗粒组成分析, 该地区的土壤为中砾壤质砂土, 土壤干容重为 2 g/cm<sup>3</sup>。

饱和含水量: 0.291 2 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 风干含水量: 0.022 5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

(2) 土柱制备。试验土筒用有机玻璃制作, 土筒高 2 m, 内径 10 cm, 分两段, 每段 1 m, 中间接口加法兰盘用螺栓连接, 底部用带有筛网的堵头(堵头底面钻有许多孔径 2 mm 的小孔) 封住。土柱前后侧及左右侧从下到上每隔 5 cm 各打一排采样孔, 用橡皮塞塞住。

土柱内装填均质扰动土, 土料取自宁夏石嘴山市大武口区森林公园的表层土壤, 经风干后过 1 cm 筛, 按干容重每 5 cm 一层分层填装并夯实, 每两层间打毛, 装土应尽量保证均匀, 以防土中的粗粒、细粒在重力作用下定层。装土时先装下段, 然后在法兰盘上涂擦黄油用螺栓将上段连接好, 以防漏水, 装填至离上端 20 cm 处。试验在西安理工大学水资源所土壤化学实验室进行, 所用污水根据当地中水厂出水污染物含量在试验室制备。

3 不同灌水定额及最大暴雨影响下的溶质、水分运移规律的试验研究

3.1 试验处理

因本试验仅考虑最不利情况对水分及溶质的影响, 因而

\* 收稿日期: 2006- 03- 29

基金项目: 宁夏高校研究基金资助

作者简介: 唐 莲(1975- ), 女, 硕士, 讲师, 主要从事农业环境的教学和研究工作。

忽略灌水方式, 仅控制灌水总量。试验分四种处理, 两组重复。即 4 种灌水定额( 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm) + 历史最大降雨( 该地区降雨多集中在 7、8、9 月份, 这三个月的降水量占全年的 76.6%, 日降雨量 > 50 mm 的暴雨天气, 每 3 年一遇, 日降雨量可达 132.9 mm)。试验开始后, 直接在土柱上部加入含污染物的污水( 在实验室中按  $\text{NH}_4 - \text{N}$  57 mg/L,  $\text{P}_4$  mg/L 浓度配制), 在入渗结束后立刻按最大降雨量加入蒸馏水。土柱顶端用塑料薄膜盖住, 防止蒸发, 记录实验室温。

试验开始后 48 小时结束, 从有机玻璃土柱侧孔取土样。记录湿润峰位置及取样位置。取样后先用烘干法测含水量, 然后将样品分成两份, 一份用重量比 1: 10 的 0.01 mol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液浸提, 用纳氏比色法测  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的含量<sup>[1]</sup>, 另一份取烘干土样 2.5 g 用酸溶- 钼锑抗比色法测定全 P 的含

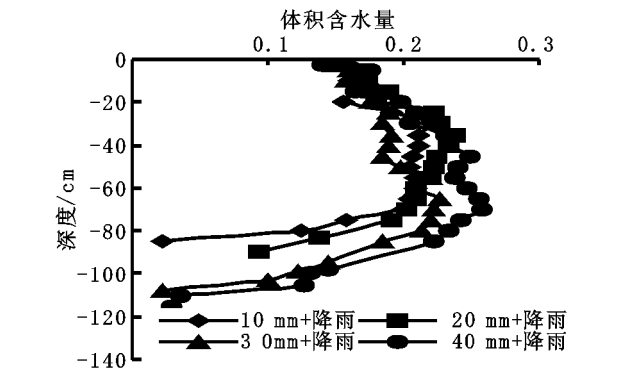


图 1 不同定额及最大降雨量下的土壤含水量分布

(2) 不同定额灌水量对污染物分布的影响。图 2 中 4 个系列分别表示 4 种不同定额灌水量情况下叠加最大降雨时的土壤非饱和带污染物  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的分布曲线。从图中可以看出, 随灌水量的增大, 溶质峰的位置也明显下移; 在灌溉定额为 40 mm, 总水量为 173 mm 时,  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的溶质峰的位置在地表以下 25 cm 处, 说明土壤对  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的吸附性较强,  $\text{NH}_4 - \text{N}$  主要集中在土壤表层; 4 条曲线在土表处的溶质分布含量都较高, 然后有明显下降趋势, 即而上升, 这可能是由于: 试验计划中是先灌一定量的污水, 在入渗完成后再加入相当于最大降雨的蒸馏水, 此时污染物已随水分下移, 随后加入的蒸馏水相当于对溶质进行了淋洗。

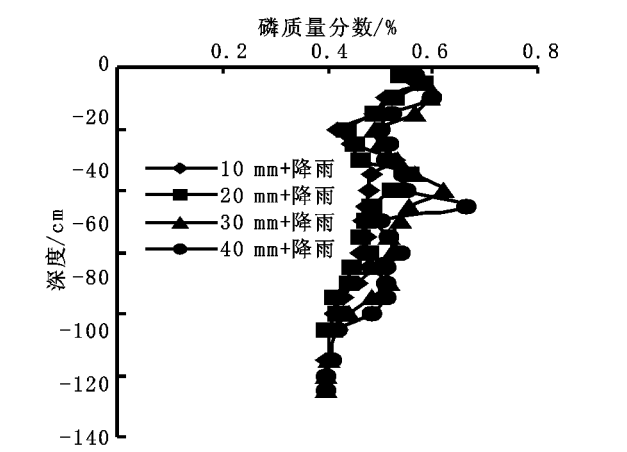


图 3 磷的分布曲线

#### 4 同一灌水定额多次连续灌水水分及溶质运移规律试验

##### 4.1 试验处理

试验灌水定额取 30 mm/ 次, 每 48 h 灌一次, 共灌 4 次。每次灌水之前及第 4 次灌水后 48 h 取样测试, 试验做两个重复。研究多次灌水条件下水分及污染物的累积及运移规律,

量<sup>[2]</sup>。

##### 3.2 结果分析

(1) 不同定额对土柱含水量分布的影响。图 1 为 4 种灌水定额及最大降雨时的土柱含水量分布状况。从图中可以看出, 随定额的增大, 土层中的含水量明显增大, 且含水量最大的位置也随水量的增大而下移; 四种定额下的土壤表层含水量基本一致, 在  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  左右, 远远小于饱和含水量  $0.29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 对于砂土而言, 其田间持水量( 该土质为砂土, 持水能力较差, 经试验测定大约为  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )。说明灌水过程中, 对于含砾砂土, 大孔隙多, 水分竖向运移受重力作用明显<sup>[3]</sup>, 超过田间持水量的水分将向下部运动, 推动湿润峰向前移动, 在 48 h 后, 土壤表层 40 cm 以内的有效含水量远远低于饱和含水量。

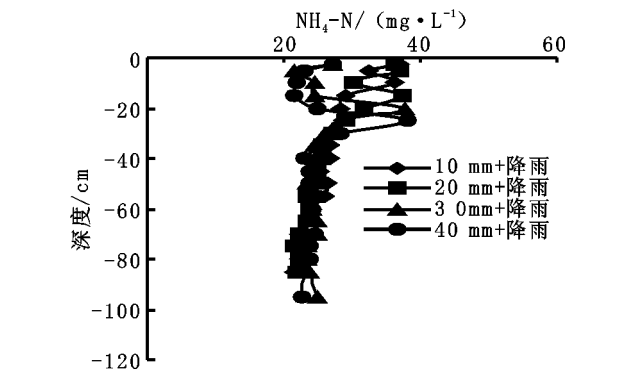


图 2  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的分布曲线

另一污染物磷的分布与氨氮有相似之处, 如图 3 所示, 其溶质峰值的位置随灌水量增大向下迁移。比较  $\text{NH}_4 - \text{N}$ 、P 分布曲线, 在不同水量及降雨条件下, 在土壤吸附和水分淋洗的同时作用下, 分布曲线出现一个浓度峰值, 峰值变大, 形状变瘦。但其浓度峰的位置比  $\text{NH}_4 - \text{N}$  低约 20 cm, 这可能是由于在低浓度条件下, 对 P 的吸附主要是黏粒在起作用, 而所灌污水中的 P 的含量较低( 4 mg/L), 该地区的土样中黏粒含量又很少, 从而影响了土粒对 P 的吸附, 导致吸附量下降, 浓度峰位置下移。说明对于此中水而言, P 在砂砾土中的运移远大与  $\text{NH}_4 - \text{N}$ 。

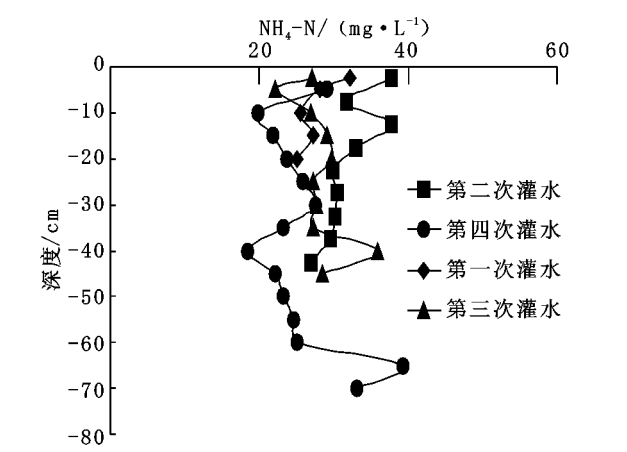


图 4 多次灌水下的  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的分布图

为分析长期灌溉的土壤环境效应研究提供依据。在每次灌水后 48 h, 从有机玻璃土柱侧孔取土样, 然后继续灌水。测定土样的含水量,  $\text{NH}_4 - \text{N}$  的含量, 全 P 的含量, 方法同上。

##### 4.2 结果分析

(1) 多次灌水对含砾砂土含水量分布的影响。在多次连续灌溉条件下, 土柱中的含水量的分布随灌水次数、累计灌水量的增大而逐渐增大, 湿润范围也明显扩大, 曲线形状类

似图 1。

(3) 多次灌水对污染物运移及积累的影响。a: 图 4 为连续灌溉条件下,  $\text{NH}_4\text{-N}$  在土壤中的分布曲线。多次灌水对污染物的分布影响很大,  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度峰的位置随灌水次数不断增大(由第一次的 2.5 cm 移动到 12.5 cm 左右); 当累计灌水数量较大时(第 3、4 次), 除了在最下方有一明显的浓度峰外, 在中间的位置还有一个次浓度峰出现, 次浓度峰的下移距离与灌水量基本成倍比关系, 但峰值明显低于下方的主浓度峰。此外, 在湿润峰位置出现了较明显的浓度峰,

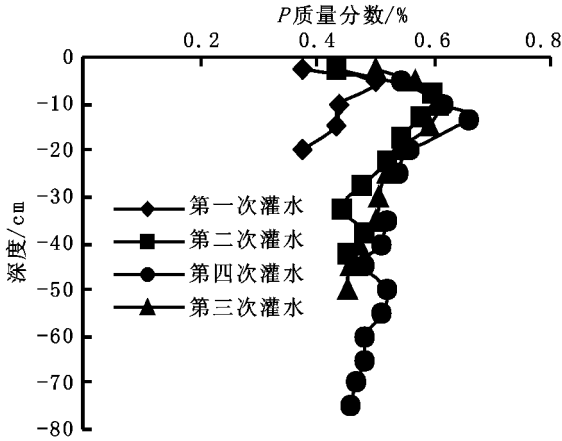


图 5 多次灌水下的 P 的分布

b: 在同一定额多次灌水条件下, 土柱中的 P 素分布曲线呈现明显规律(图 5)。浓度峰的位置与灌水次数、水量呈正比, 平均每次灌水向下移动 3 cm 左右; 浓度峰后的 P 素含量缓慢降低。说明在水分湿润峰推进的同时, 污染物 P 也被带走, 影响范围随湿润峰的扩大而增大, 但同时 P 作为强吸附性溶质, 土壤对它的吸附作用又使其在灌水量累积达到 120 mm 时分布仅集中在土层表面 20 cm 以内, 说明多次灌水条件下, 灌水量的累积使污染物的绝对数量增加, 但污染物的分布范围仅集中在土壤表层, 分多次灌水的影响弱于一次灌水。

通过此试验的结果可以看出, 尽管  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{N}_\text{p}$  为吸附性溶质, 但对于砂砾质土壤来说, 随水量增大, 对流作用仍然是影响溶质迁移的主要决定性因素。在多次灌水条件下, 污染物的累积仅限于一定范围的土层内, 对土壤环境效应影响较大。

5 降雨淋洗对水分、溶质运移的影响

分别取以 30 mm 单次灌水的试验结果与在此定额下加

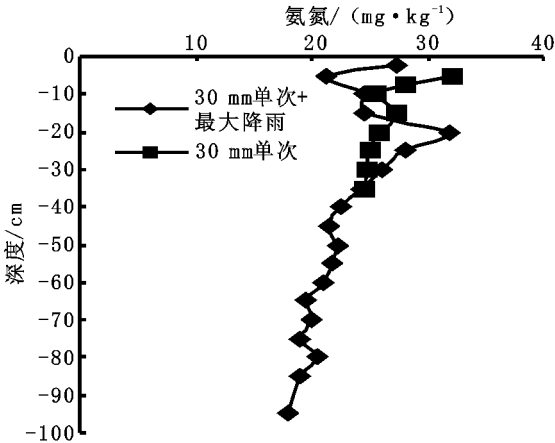


图 7 降雨淋洗对氮氮分布的影响

从图 8 中可以看出, 降雨淋洗作用对磷迁移的影响较为明显, 浓度峰的位置由单次灌水的 10 cm 增加到降雨淋洗后的 40 cm, 水量增加 4 倍, 浓度峰推进了 4 倍, 磷浓度峰

这可能是由于 随灌水量的增大, 孔隙水流速增大, 在对流作用下, 土柱中的  $\text{NH}_4\text{-N}$  被大量淋洗, 被带至水湿润峰附近; 对于该土质而言, 砂性较强, 其吸附能力相对较弱,  $\text{NH}_4\text{-N}$  较易迁移。说明在无蒸发条件下, 在该土壤中, 污染物的移动主要取决于对流作用, 随灌水量增大而引起入渗过程能引起溶质的快速淋移, 从而导致溶质淋移深度增大。而对于入渗水量较小的前两次灌水, 在吸附作用下, 仅在表层出现一浓度峰, 其后的溶质运移主要是扩散——弥散作用的结果, 因而峰值逐渐减小, 分布趋于均匀。

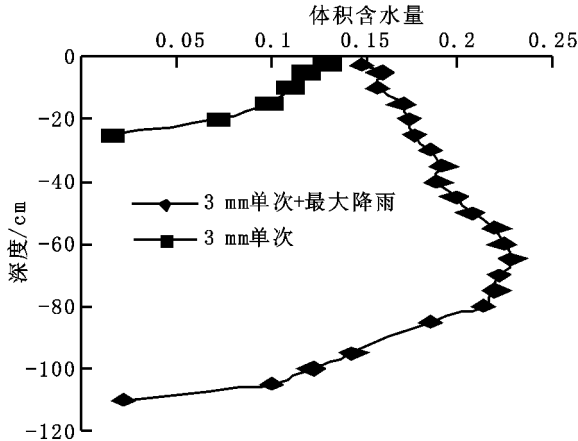


图 6 降雨淋洗对水分分布的影响

历史最大暴雨的结果作比较, 分析降雨淋洗作用对土壤非饱和带水分运动、溶质运移的影响。

从图 6 中可以看出, 同样是 30 mm 的污水灌溉, 在最大降雨(132.9 mm)的淋洗作用下, 在经过 48 h 的再分布后, 土表的含水量相差不大, 但因雨量较大, 降雨的淋洗使湿润区范围扩大很多, 但湿润峰的位置与水量基本成比例; 对于最大降雨对含水量大小的影响, 在经过同样再分布时间后, 后者比前者的含水量值大, 湿润峰有明显的下移趋势, 对于该地区而言, 大暴雨对土壤水分的增加显著。

图 7 对比结果表明, 虽然降雨量相对于灌水量较大, 但降雨淋洗作用对溶质迁移的影响不算很大。对于氮氮而言, 浓度峰从单次灌水的 5 cm 推进到加降雨淋洗的 20 cm, 水量增加 4 倍, 浓度峰也增加近 4 倍, 基本与水量成倍比关系。但单次灌水的土表氮氮含量高于降雨淋洗作用; 浓度峰值小于降雨淋洗作用, 说明在淋洗作用下, 一定数量的氮氮被带入深层, 同时在吸附作用下, 氮氮又被固定在一定土层内。

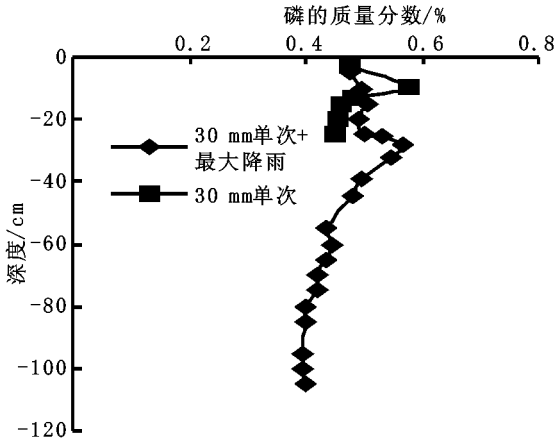


图 8 降雨淋洗对磷分布的影响

向下运移的距离与水量成倍比关系, 这与 Ghuman 等的无蒸发条件下单次灌水研究得出的结论相似。但低浓度情况下 (下转第 199 页)

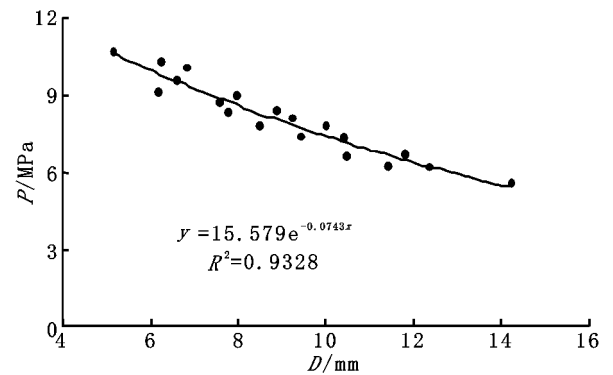


图3 冷杉根系直径与抗拉强度曲线的关系

综合以上分析,得出根系抗拉强度的大小与根径和根长都具有相关性,根系的抗拉强度的大小是根径与根长共同作用的结果。

4 应用实例

为了进一步认识抗拔法测强的准确性,客观评判式(2)的可靠性,笔者在长江上游贡嘎山东坡,海螺沟亚高山暗针叶林带随机选取3个冷杉树木,进行抗拔法测强试验。结果

参考文献:

[1] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7- 14.

[2] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.

[3] 孙立达, 孙保平, 齐实. 小流域综合治理理论与实践[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.

[4] 唐邦兴, 柳素清. 四川省阿坝藏族羌族自治州泥石流及其防治研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.

[5] 唐邦兴. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[J]. 北京: 科学出版社, 1994.

[6] Diti Hengchao vaich. 香根草技术在工程上的运用——稳定斜坡、减少侵蚀[A]. 香根草研究与展望[M]. 北京: 中国农业技术出版社, 1998.

(上接第196页)

磷素的吸附性对迁移的影响小于降雨淋洗作用。

6 结 论

(1) 在中水这种微污染水灌溉条件下,对宁夏回族自治区大武口市森林公园的砂性土壤来说,污染物的迁移是伴随着水分的运动进行的,水量越大,土壤中水分湿润峰、污染物溶质峰的位置都有明显下移,且基本与水量成正比。

(2) 对砂性土壤而言,不同水量灌溉时,对土壤表层的含水量影响不大,土壤含水量保持在田间持水量左右,远远小于土壤饱和含水量,说明砂性土壤,在灌水过程中,超过田间持水量的水分将向下运动,推动湿润峰向前移动,水分垂向运动受重力影响较大,灌溉土壤渗漏损失大<sup>[8]</sup>。

(3) 试验结果表明,对于大武口市森林公园的土壤而言,中水灌溉时,NH<sub>4</sub>-N、P两种污染物主要集中在土壤表层,说明这两种污染物由于土壤对其的吸附性使污染物的分布范围较小。实验中还发现,P的分布与NH<sub>4</sub>-N的分布有明显不同,同样水量情况下,P浓度峰位置较低,这可能是由

参考文献:

[1] GB7479- 87,水质 铵的测定 纳氏试剂比色法[S].

[2] GB7852- 87,森林土壤全磷的测定[S].

[3] 胡笑涛, 康绍忠, 马孝义, 等. 地下滴灌条件下沙质土壤入渗特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, (10): 75- 79.

[4] 曹红霞, 康绍忠. 溶质施加方式对土壤溶质迁移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2003, (4): 5- 8.

[5] 王亚南, 等. 含磷污水淋滤条件下土壤中磷素迁移转化模拟试验[J]. 环境科学学报, 2001, 21(6): 737- 741.

[6] 王福利. 降雨淋洗条件下溶质在土壤中运移的初步研究[J]. 土壤学报, 1992, (4): 451- 454.

[7] Ghuman B S. Evaluation of some new tracers for soil water studies[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48: 987- 993.

[8] 黄强, 李生秀, 宋郁东. 咸水灌溉沙地后的水盐运移规律[J]. 土壤学报, 2003, (4): 547- 553.

如表1所示。可见抗拔法测定的根系强度与文中建立的数学模型模拟值十分接近,平均相对误差只有3.47%。从而证明了抗拔法测定混凝土强度的可靠性与准确性。

表3 根系抗拉强度验证实例

测点 编号	抗拉力 /kN	抗拉强度标准 值/MPa	抗拉强度模 拟值/MPa	相对 误差/%	平均相对 误差/%
1	0.35	6.54	6.78	3.67	
2	0.53	7.88	8.08	2.54	3.47
3	0.83	10.69	10.24	4.21	

5 结 论

抗拉法可以用于对冷杉根系进行检测,通过回归分析,求得最佳冷杉根系侧强曲线公式:  $P=7.2146F+4.2511$ 。本研究得出的冷杉根系测强曲线的误差都在允许范围内,实验证明,冷杉根系的抗拉力与抗拉强度之间有很好的线性相关关系,利用抗拉力完全可以在现场直接测定根系的抗拉强度,且具有快速、经济、直观、准确的优点,确是一种现场评定根系的较好方法。文中建立的基准曲线与数学模型,相关性好,误差小,可信度高,在长江上游贡嘎山地区具有普遍性,可以推广使用。