

# 黄土丘陵区降雨、土壤水分和苗木成活率的关系

许浩, 蒋齐, 潘占兵, 李生宝, 蔡进军, 董立国, 王月玲, 季波

(宁夏农林科学院 荒漠化治理研究所, 银川 750002)

**摘要:**降雨量通过影响土壤水分而间接影响苗木成活率。为了研究降雨、土壤水分和苗木成活率之间的关系,对半干旱黄土丘陵区降雨、土壤水分和造林成活率相关性进行试验和分析,结果表明:(1) 该区域降雨对土壤含水量的贡献可用回归方程进行模拟,模拟结果表明:低于 6.3 mm 的降雨不会显著增加土壤含水量,属无效降雨;(2) 建立了土壤含水量和苗木成活率的数学模型;(3) 对山杏、山桃、沙棘、柠条 4 种树种而言,土壤含水量分别低于 5.1%, 6.0%, 6.5%, 4.6% 时其造林成活率为 0;满足 85% 的造林成活率的土壤含水量分别为 11.9%, 13.0%, 13.8%, 12.0%;(4) 若以多年春季平均土壤含水量 9.8% 为本底值,对山杏、山桃、沙棘和柠条而言,只有在降雨量分别高于 18.1, 24.6, 29.7, 18.6 mm 时,造林成活率才能达到 85% 以上。

**关键词:**黄土丘陵区; 降雨; 土壤水分; 造林成活率

中图分类号:S728.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0202-04

## Relationship of Rainfall, Soil Moisture and Seedling Survival Rate in Loess Hilly Region

XU Hao, JIANG Qi, PAN Zhan-bing, LI Sheng-bao, CAI Jin-jun, DONG Li-guo, WANG Yue-ling, JI Bo

(Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Rainfall indirectly impacts the seedling survival by affecting soil moisture. For the purposes of learning the relationship between rainfall, soil moisture and seedling survival, the field experiment of rainfall, soil moisture and seedling survival rate was conducted in loess hilly region. The results were analyzed and the conclusion was drawn as follows: (1) the effects of rainfall on soil moisture could be simulated by the regression equations, the results showed that, the rainfall lower than 6.3 mm had no contribution to soil moisture; (2) the equations of soil moisture and seedling survival rate of four species were developed also; (3) the soil moisture, for *Prunus armeniaca*, *Prunus davidiana*, *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii*, was lower than 5.1%, 6.0%, 6.5%, 4.6%, respectively, the seedling survival rate was 0; soil moisture greater than 11.9%, 12.9%, 13.8%, 12.0%, respectively, the seedling survival rates of four species were higher than 85%; (4) based on annual mean spring soil moisture of 9.8%, the rainfalls demanded for >85% seedling survival rate of *Prunus armeniaca*, *Prunus davidiana*, *Hippophae rhamnoides* and *Caragana korshinskii* were 18.1 mm, 24.6 mm, 29.7 mm and 18.6 mm, respectively.

**Key words:** loess hilly region; rainfall; soil moisture; seedling survival rate

干旱、半干旱地区土壤水分是影响造林成活率和树木生长的限制性因子。土壤水分是植物生长所需水分的来源,植物对土壤水分的利用取决于土壤含水量的高低以及植物自身的吸水能力。我国北方人工植被建设中土壤干化问题是引起人工植被生长后期退化的主要原因,由于植物蒸腾了过量水分造成植

物根系作用范围内土壤水分长时间持续地严重亏缺,天然降水不能有效予以补偿,从而导致植物生长明显衰退以至大面积干枯死亡<sup>[1]</sup>。在黄土高原大部分地区植物吸收和利用的土壤水分主要依靠当地的天然降水,土壤水分是限制植物生长的决定因子<sup>[2]</sup>。从水分与植物成活的关系入手,研究降雨与造林成活率

收稿日期:2012-04-16

修回日期:2012-05-13

资助项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAC01A07);宁夏干旱区降雨量与植苗造林相关性技术与示范课题(2008-07 区);宁夏自然科学基金(NZ0967, NZ0969)

作者简介:许浩(1979—),男,宁夏隆德人,硕士,助理研究员,主要从事生态恢复、气候变化相关研究。E-mail:hz92@163.com

通信作者:李生宝(1958—),男,宁夏石嘴山人,学士,研究员,主要从事水土保持、生态恢复相关研究。E-mail:nxhms@163.com

的关系,有利于确定科学的人工造林时机和措施,对于我国北方的广大地区尤其是西北地区的植被生态环境建设具有十分重要的意义。由于降雨、径流、土壤水之间存在时间上的滞后效应<sup>[3]</sup>,因此春季雨后安排造林是黄土丘陵区的普遍做法。

黄土丘陵区地处干旱半干旱区,水分条件先天不足,加上地形复杂,土壤地质条件独特,形成了十分复杂的水分空间格局,制约着该区植被的空间分布,进而影响了人工植被的建设效果。因为缺乏灌溉条件,该区域造林成活率完全依赖于天然降水,尤其是上年的土壤水分储存和春季的有效降水,由于造林后降雨少,造林时的土壤含水量决定了造林成活率。以典型半干旱黄土丘陵区—宁夏南部山区的主要造林树种山杏、山桃、柠条和沙棘为研究对象,通过试验研究分析影响其成活的土壤水分条件。

## 1 试验方法

### 1.1 试验地的选择

本试验在宁夏南部半干旱黄土丘陵区的彭阳县白阳镇开展,研究区域年降雨量 350 mm 左右,主要植被类型是以百里香、铁杆蒿、针茅为主的干草原,土壤以黄绵土为主,兼有黑垆土。试验选择平坦的荒地,做成 3 m×3 m 的小畦,采用常规方法在小畦内进行植苗造林。

### 1.2 降雨量和土壤含水量的监测及模拟

降雨量和降雨强度通过 HOBO 气象站监测,结合地方气象部门近 10 a 来的降雨数据获得,主要采用每年 3—5 月份的降雨量数据。土壤含水量通过 TDR 时域反射仪结合土钻取土烘干称重法校正,对 80 cm 深度的土壤含水量进行监测。为了便于对比,本文中将体积含水量折算为重量含水量。取过去 10 a 每次降雨前及降雨后 2~3 d 内 80 cm 以上土层的土壤含水率数据和降雨量做相关性分析及模拟。采用 SPSS 对降雨量和降雨后土壤水分进行模拟,建立降雨和土壤水分相关性方程。

### 1.3 苗木成活率试验布设

选择山桃、山杏、柠条 3 个主要造林树种的 1 a 生实生苗,沙棘 1 a 生扦插苗进行不同水分条件下的造林成活率试验,试验苗木采购自当地林业局。布设 24 个 3 m×3 m 的试验小区,做畦,整平,设置 8 个水分梯度,每个水分梯度 3 个重复,每个重复各树种栽植 50 株。用容量约为 6 kg 的水桶浇水,8 个水分梯度的浇水量分别为 0, 7, 14, 21, 28, 35, 40, 45 桶水。第 1 天下午灌水,第 3 天开始采用常规方法栽植苗木,植苗时测定土壤 80 cm 土层平均土壤含水量(此

时虽然入渗深度达不到 80 cm,但是考虑到造林时栽植穴的深度往往是 80 cm,因此测定 80 cm 土层土壤含水量,每 20 cm 为一层进行取样,最后计算 0~80 cm 土层平均土壤含水量)。此后不浇水,下雨时用塑料布遮盖防止雨水进入试验小区。两个月后统计苗木成活率。最后依据栽植时的土壤含水量和统计的苗木成活率进行相关性分析,进而评估造林时土壤墒情对苗木成活率的影响。由于该区域降雨主要集中于夏秋季节,春季降水很少,因此春季的一次有效降水或上年的土壤墒情(土壤含水量)对苗木的成活率起决定性作用。此法可以较好的模拟有一定土壤墒情基础,但造林后有效降雨量少,基本属于无效降雨条件下的造林成活率。

## 2 结果与分析

### 2.1 半干旱黄土丘陵区降雨量对土壤含水量的影响

半干旱黄土丘陵区主要土壤类型为黑垆土和黄绵土,土壤主要由小于 0.25 mm 的颗粒组成,细砂粒和粉粒占总重量的 60%,质地均匀,疏松多孔,保水能力较好。黄土疏松多孔的结构特点,使得其持水力也较强。在黄土丘陵区,降雨对土壤含水量的影响主要体现在降雨后土壤含水量有所增加。对降雨量和土壤含水量进行相关分析时需去除土壤初始含水量的影响,仅分析降雨和土壤含水量增量的关系。

对多年监测的土壤含水量和降雨量进行曲线拟合,结果如下式:

$$y=0.211x-0.001x^2-1.377 \quad (R^2=0.948) \quad (1)$$

式中: $y$ ——土壤含水量增加量; $x$ ——降雨量(mm)

从土壤含水量和降雨量曲线拟合结果(图 1)可知,在半干旱黄土丘陵区,在较小降雨条件下,降雨和土壤含水量的增加呈线性正相关;随着降雨量的增大,土壤含水量的增加有所减缓。这和该区土壤水分入渗特性密切相关,在降雨量较小时,降雨能够完全入渗,增加了土壤含水量,但是降雨量和降雨强度较大时,土壤达到稳渗状态,多于入渗速率的降雨则产生径流,不能有效地补充到土壤中,因此土壤含水量增加率有所减缓。公式(1)可以较好地预测黄土区降雨量对土壤水分增加量的贡献值,但现实土壤含水量由两部分组成,即土壤含水量本底值和降雨贡献值,累加土壤含水量本底值后降雨量和土壤含水量的关系模型应为:

$$y=a+0.211x-0.001x^2-1.377 \quad (2)$$

式中: $a$ ——降雨前初始土壤含水量。依据多年的监测结果,该区域多年春季平均土壤含水量为 9.8%,

用多年春季土壤含水量平均值取代当年前期土壤含水量,则该模型可以更简便的预测降雨后土壤含水量的变化,该模型可以简化为:

$$y=9.8+0.211x-0.001x^2-1.377 \quad (3)$$

通过拟合图(图 1)可见,在黄土丘陵区存在一个降雨量限值,降雨量低于该限值时,土壤含水量不会增加。根据式(1)计算得该限值为 6.3 mm,因此,该区域降雨低于 6.3 mm 时属于无效降雨,土壤含水量不会明显增加;当降雨量高于 6.3 mm 时,该降雨才可能对土壤含水量的增加产生贡献。从植被建设的实际出发,要预测降雨和土壤含水量的关系,则需要对降雨量做出相应的限定,实际预测方程为:

$$\begin{cases} y=0 & (x \leq 6.3) \\ y=9.8+0.211x-0.001x^2-1.377 & (x > 6.3) \end{cases} \quad (4)$$

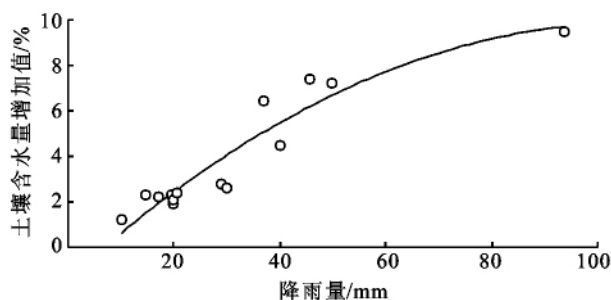


图 1 降雨量和土壤含水量增量的线性拟合

## 2.2 半干旱黄土丘陵区土壤含水量对造林成活率的影响

8 个水分梯度下山桃、山杏、柠条、沙棘的成活率见表 1。

表 1 不同水分条件下的苗木成活率 %

土壤含水量/%	山杏	山桃	沙棘	柠条
6.31	20	4	0	26
7.77	44	34	18	46
9.31	56	46	36	60
10.08	70	56	50	70
10.85	76	66	62	76
11.69	86	80	76	86
13.77	94	88	80	94
14.85	100	96	92	100

采用曲线估计对成活率和土壤含水量进行模拟,得出四个树种造林成活率和土壤含水量关系的拟合方程(表 2)。\$R^2\$ 表明该 4 组方程的拟合效果较好。可用于预测各树种不同水分条件下的造林成活率。4 种主要造林树种成活率和土壤含水量的曲线模拟(图 2)说明,各树种苗木成活率随着土壤含水量的增加而增大;但增加的曲线变化趋势有所不同。依据表 2 的

模拟方程,当成活率为 0 和 85% 时,计算土壤含水量(即公式中 \$y=0\$ 和 \$y=85\$ 时对应的 \$x\$ 值),即可得到各树种 0 成活率和 85% 成活率的土壤水分临界参考值(表 3)。表 3 表明 4 个树种中,柠条 0 成活率的土壤水分限值最低,所以能适应最干旱的环境条件,其次为山桃和山杏,沙棘 0 成活率土壤水分限值最高,是 4 个树种中耐旱性最差的;山杏和柠条 85% 成活率的土壤水分限值分别为 11.9% 和 12.0%,比较接近;山桃为 13.0%,沙棘为 13.8%。可见要达到合格的造林成活率标准,山杏和沙棘所需的土壤水分条件较低,山桃次之,沙棘水分条件要求最高,其抗旱性最差。

表 2 土壤含水量和苗木成活率的模拟方程

树种	模拟方程	F	\$R^2\$
山杏	\$y=25.245x-0.754x^2-108.940\$	314.694	0.992
山桃	\$y=26.256x-0.745x^2-130.305\$	195.361	0.987
沙棘	\$y=25.613x-0.690x^2-136.957\$	127.110	0.981
柠条	\$y=22.004x-0.632x^2-87.742\$	636.132	0.996

表 3 4 种树种不同成活率条件下的水分临界值

树种	土壤含水量/%	
	0 成活率	85% 成活率
山杏	5.1	11.9
山桃	6.0	13.0
沙棘	6.5	13.8
柠条	4.6	12.0

## 2.3 黄土丘陵区降雨量和植苗造林相关关系

黄土丘陵区水资源匮乏,造林成活率取决于造林时的土壤水分含量,如果土壤水分含量满足 85% 的苗木成活率时造林,苗木成活后,由于后期的降雨补给,苗木基本不会枯死,如果造林初期土壤含水量不能达到 85% 成活率的要求,则造林就会失败。而土壤水分则决定于降雨量,因此造林成活率也决定于降雨量。合理的预测降雨量和土壤水分、苗木成活率的关系,可以在很大程度上提高造林成活率。

在半干旱黄土丘陵区,其多年春季土壤含水量相对较高,但要满足造林成活率达到 85% 以上,土壤水分还是相对不足,需要降雨的补给。以多年春季平均土壤含水量 9.8% 为本底值,结合前述的拟合公式计算各树种对降雨的需求,结果见表 4。由表 4 可知,沙棘对降雨量的需求最高,为 29.7 mm 以上,山桃次之,为 24.6 mm 以上,山杏和柠条分别为 18.1 mm 和 18.6 mm 以上。综合考虑 4 个主要造林树种,同样应以对水分需求较高的沙棘为主,在该区域,要能保证 4 个造林树种成率都达到 85% 以上,降雨量至少要高于 29.7 mm。

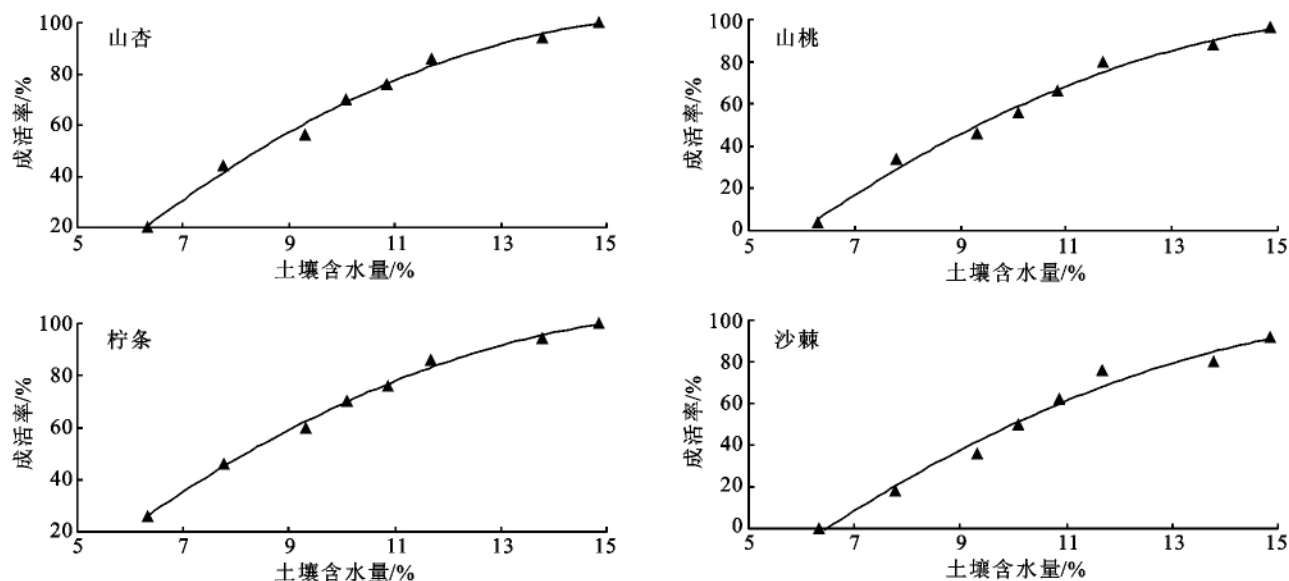


图2 半干旱黄土丘陵区苗木成活率和土壤含水量的模拟曲线

表4 成活率85%时土壤含水量及所需降雨量

$\bar{W}/\%$	树种	$W_{85\%}/\%$	$\Delta W/\%$	$R/\text{mm}$
9.8	山杏	11.9	2.1	18.1
	山桃	13.0	3.2	24.6
	沙棘	13.8	4.0	29.7
	柠条	12.0	2.2	18.6

注:  $\bar{W}$ ——多年春季土壤水分平均值;  $W_{85\%}$ ——不同苗木85%成活率时土壤含水量限值;  $\Delta W$ —— $W_{85\%} - \bar{W}$ , 达到  $W_{85\%}$  时土壤水分亏缺值;  $R$ ——土壤水分增加  $\Delta W$  所需降雨量。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 降雨和土壤水分的关系

对土壤含水量和降雨量的模拟实验表明,降雨量和土壤含水量的相关关系同样可用二次曲线进行模拟,依据模拟方程该区域无效降雨的限值为6.3 mm。而在北方沙区,5.0 mm以上的降雨才能有效补充土壤水分,对植物群落长期稳定发展具有积极的意义<sup>[4]</sup>。与沙区相比,黄土区植物成活水分需求略高。

#### 3.2 土壤水分和苗木成活的关系

造林成活率决定于苗木质量、抗旱造林技术、土壤水分条件等诸多因素。在同等苗木质量和造林技术前提下,造林成活率和土壤含水量密切相关,二次曲线可以很好地预测不同水分条件下的造林成活率。造林成活率随着土壤含水量的增加而增大,但也存在一个最低土壤水分限值,低于该限值时,造林无法成活。山杏、山桃、沙棘、柠条4种树种的土壤含水量分别低于5.1%,6.0%,6.5%,4.6%时,其造林成活率为0;要满足85%的造林成活率,其对应的土壤含水量应分别高于11.9%,13.0%,13.8%,12.0%。在同类型地区的山西黄土区林木土壤需水量分别为刺槐10%~13%,苹果10%~12.5%,侧柏9.5%~

11%<sup>[5]</sup>;油松和刺槐造林成活、生长最低土壤水分指标分别是沙壤为4.7%和4.3%;壤土为6.6%和5.4%;黏壤为10.2%和11.6%<sup>[6]</sup>。科尔沁沙地山杏、小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿、黄柳、榆树、杨树的最低临界土壤含水量分别是0.82%,0.87%,1.61%,1.89%,2.04%和2.27%<sup>[7]</sup>。石羊河下游风沙土土壤含水率低于0.824%,梭梭死亡,介于0.824%~1.30%之间,处于退化状态,高于1.30%时,生长正常<sup>[8]</sup>。可见黄土区植物对水分的需求近似;而黄土区和沙区植物成活所需土壤水分差异较大。

#### 3.3 降雨量与苗木成活的关系

以黄土丘陵区多年春季平均土壤含水量9.8%为本底值进行计算,得出能满足山杏、山桃、沙棘和柠条85%以上苗木成活率的降雨量应分别高于18.1,24.6,29.7,18.6 mm。

#### 参考文献:

- [1] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. 林业科学, 1996, 32(1): 78-85.
- [2] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [3] 徐学选, 刘文兆, 王伟. 黄土丘陵区小流域尺度生态建设的水文响应研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 155-157.
- [4] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355.
- [5] 贺康宁, 田阳, 史常青, 等. 黄土半干旱区集水造林条件下林木生长适宜的土壤水分环境[J]. 林业科学, 2003, 39(1): 10-16.

(下转第234页)

对边界层与精确解的误差作分析,对较小孔隙水流速度,在长距离处,五次边界层与精确解的误差比其他小;而在短距离处,指数型边界层几乎比其他都要小。对较大孔隙水流速度,边界层解与精确解受各因素影响较大,它们之间的误差变化较大,没有规律。

### 2.3 参数的确定

边界层距离是时间、迁移参数的简单初等函数,因此容易通过边界层运动随时间变化估计溶质迁移参数。溶质锋面是一个迁移物质在迁移过程中从无到有的界面,而时域反射仪(TDR)则是一种新的用于溶质迁移研究的设备。溶质锋面未达到一定深度探测点前,TDR 探针所探测到的浓度值恒定不变,当浓度值发生变化时,就认为此时为溶质锋面迁移到此探测点的时间。根据不同探测点深度  $d(t)$  以及相应的时间  $t$ ,结合方程(20),经过数据处理,得到用边界层确定的运移参数弥散系数和延迟因子。综上,边界层解只是一个近似解,虽然表述、计算简单,但也受各因素影响。特别是当孔隙水流速度越大、弥散系数越小边界层解与精确解误差越大。因此运用边界层方法推求相关参数时,应取较小的孔隙水流速度、短历时。

## 3 结论

边界层解是 CDE 方程的一个简单近似解,通过边界层距离随时间变化可以估计溶质迁移参数。本文将描述土壤溶质迁移的边界层理论推广到一般,得到了描述溶质浓度分布的指数函数模型。从边界层方法在各种参数组合不同时段内的土壤溶质分布模拟来看,在较短历时具有较高的精度,对孔隙水流速度大、弥散系数小的情况模拟的误差大。研究表明指数函数模型应选取较小的孔隙水流速度、短历时推求溶质迁移参数。

参考文献:

[1] van Genuchten M Th, Wagenet R J. Two-site/two-re-

gion models for pesticide transport and degradation: theoretical development and analytical solution[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(5): 1303-1310.

[2] Wallach R, Grigorin G, Rivlin J. A comprehensive mathematical model for transport of soil-dissolved chemicals by overland flow[J]. Journal of Hydrology, 2001, 247(1/2): 85-99.

[3] Wang Q J, Horton R, Lee J. A simple model relating soil water characteristic curve and solution breakthrough curve[J]. Soil Science, 2002, 167(7): 436-443.

[4] Gao Bin, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: theory and experiments[J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1/4): 291-304.

[5] Pathak D R, Hiratsuka A. An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2011, 5(2): 93-99.

[6] Shao M, Horton R, Miller R K. An approximate solution to the convection-dispersion equation of solute transport in soil[J]. Soil Science, 1998, 163(5): 339-345.

[7] Wang Q J, Horton R. Boundary layer theory description of solute transport in soil[J]. Soil Science, 2007, 172(11): 835-841.

[8] Kool J B, Parker J C, van Genuchten M. Parameter estimation for unsaturated flow and transport model: a review[J]. Journal of Hydrology, 1987, 91(3/4): 255-293.

[9] 郑纪勇,邵明安.应用边界层方法确定溶质迁移参数的实验研究[J].水利学报,2002(1):92-96.

[10] Lindstrom F T, Haque R, Freed V H, et al. Theory on the movement of some herbicides in soil: linear diffusion and convection of chemicals in soils[J]. Environ. Sci. Technol., 1967, 1(7): 561-565.

[11] 刘春平,邵明安.土壤溶质锋运移的解析解[J].水土保持学报,2001,15(4):82-86.

(上接第 205)

[6] 步兆东,高大鹏,王文智,等.油松刺槐造林成活生长最低土壤水分指标的测定[J].水土保持研究,2003,10(4): 170-171,202.

[7] 张继义,付丹,魏珍珍,等.科尔沁沙地几种乔灌木树种

耐受极端土壤水分条件与生存能力野外实地测定[J].生态学报,2006,26(2):467-474.

[8] 马全林,王继和,朱淑娟.降水、土壤水分和结皮对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林的影响[J].生态学报,2007,27(12):5057-5067.