

连续干旱条件下喷播基质水分衰退规律

张小庆, 张金池, 王 丽, 梦 莉, 黄 进

(南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 喷播基质水分衰退规律直接影响喷播种子的发芽和幼苗生长。在大棚盆栽条件下, 利用 TDR (time-domain reflectometer) 土壤水分监测系统对基质含水量测量发现: 白三叶 *Trifolium repens*, 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*, 波斯菊 *Cosmos bipinnatus* 和黑麦草 *Lolium perenne* 播种后分别于 44, 45, 44 和 43 d 基质蒸发基本停止, 失水量接近 0, 幼苗枯死率达到 90% 以上; 基质含水量在 12:00–13:00 时下降速度最快, 13:00–15:00 时下降也较为明显, 夜间冷凝现象不明显, 将温度、相对湿度、时间和基质含水量拟合成多元回归方程, 拟合效果较好; 0~5 cm 基质层含水量一直低于 5~10 cm 和 10~15 cm 基质层, 10~15 cm 基质层前期和后期失水速率较慢, 中期失水速率较快, 3 个层次含水量最后趋于一致。图 4 表 2 参 19

关键词: 土壤学; 基质; 水分衰退; 含水量

中图分类号: S714.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)06-0839-06

Water loss in growth media with continuous drought

ZHANG Xiao-qing, ZHANG Jin-chi, WANG Li, MENG Li, HUANG Jing

(College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: With spray sowing, water loss in the growth medium directly affects seed germination and seedling growth. Using time-domain reflectometry (TDR), the volumetric water content (VWC) of the growth medium which composed of the same materials in a greenhouse pot culture was measured. Four plant species were cultured with three repeats for each species. Regression equations were established for the progress of water loss to show the regulation and key drought time points of the water loss in growth medium. After seeding with *Trifolium repens* and *Cosmos bipinnatus* (44 d), *Amorpha fruticosa* (45 d), and *Lolium perenne* (43 d), evaporation was near 0 with 90% of the seedlings having withered. Water content in the growth medium decreased the most between 12:00–13:00 followed by a strong decrease from 13:00–15:00. Also, water condensation was minimal at night. Regression equations composed of temperature, humidity, time, and VWC showed highly significant correlation ($R^2 > 0.92$). Water content in the 0–5 cm layer was always lower than the 5–10 and 10–15 cm layers. In addition, the rate of water loss in layer 10–15 cm was slow in earlier and later stages, but fast in the middle stage. After about 19 d, water content of the three layers was about the same. [Ch, 4 fig. 2 tab. 19 ref.]

Key words: soil science; growth medium; water loss; volumetric water content

交通水利基础设施的大规模建设和频发的地震滑坡等自然灾害因素都不可避免地导致了山体原生态植被破坏、动物栖息地破碎和水土流失, 出现了大量石质边坡和裸露山体, 严重影响了生态环境和经济可持续发展^[1]。厚层基材喷射植被保护坡技术是客土喷播的一种, 主要利用植被保持水土的原理稳

收稿日期: 2010-01-12; 修回日期: 2010-03-31

基金项目: 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(948 计划)资助项目(2008-4-40); 江苏省社会发展项目(BS200763)

作者简介: 张小庆, 从事林业生态工程。E-mail: bimuyu3366@163.com。通信作者: 张金池, 教授, 博士生导师, 从事困难立地植被恢复研究。E-mail: zhang8811@njfu.com.cn

定岩土边坡同时美化生态环境,是裸露山体等不同类型的岩质边坡植被恢复的主要手段之一^[2-4]。目前对厚层基材的研究主要集中在基质材料(包括土壤、肥料、土壤改良剂,保水剂及黏结剂等)的配比上,而基质水分条件对种子的发芽和幼苗生长等都有着重要的影响^[5-6]。喷播基质含水量过高不但会对某些植物种造成水胁迫而影响正常发芽生长,而且会导致基质材料自身重力增加,造成坡度较大岩壁上基质剥落;基质水分含量较低时,尤其种子吸水以后再发生干燥,则种子的发芽率就会大大降低,另外在幼苗根系还没有充分生长阶段,如果发生持续干旱,植物生长就会受阻,甚至枯死。因此,研究喷播基质中水分变化特征,对提高喷播植物种成活率,提高岩质边坡上基质稳定性,及适时的养护管理都十分必要^[7-9]。

1 材料及方法

1.1 实验材料

植物种子:白三叶 *Trifolium repens*, 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*, 波斯菊 *Cosmos bipinnatus* 和黑麦草 *Lolium perenne*。

基质:采用喷播工程设计中常用的材料与配比,土壤为江苏省南京市本地土壤,壤土为主,土质松软,排水性、保水性中等,土壤肥力一般。喷播专用有机肥(粉末状)与土壤按体积比 1:3 混合,另加入复合肥(氮:磷:钾 = 15:15:15) $4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,植物纤维 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,黏合剂 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,土壤菌剂 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[10-12]。由于喷播基质是充分混合后分别装入各个花盆,因此,各植物所用基质物理性质基本相同:容重为 $0.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,总孔隙度为 54.09%,非毛管孔隙度为 13.13%,毛管孔隙度为 40.96%,孔隙比为 1.17。

TDR(time-domain reflectometer)土壤水分监测系统:TDR100 时域反射计,CS616 土壤水分探头和 CR800 数据采集器(均出自美国 Campbell 公司),其原理为测量电磁波沿置于土壤介质中的波导线传播并在其末端反射的时间来确定土壤的介电常数,再换算出土壤的容积含水量。测量精度要求较低时,TDR 测量结果不受土壤质地、容重、温度等物理因素的影响,当精度要求较高时可用标定曲线进行校正以提高精确度(± 0.03 以内)。本实验用配置好的基质对 TDR 进行校正^[13],将误差控制在最小范围内。

1.2 实验方法

实验以南京自然气候条件为研究背景,属北亚热带季风气候区,光能资源充足,年平均气温为 15.7°C ,最高气温 43.0°C ,控水干旱实验在大棚内进行,大棚上方加盖外遮阳网,避免温度过高。由于工程实中一般基质喷播厚度为 8~10 cm,较缓边坡可适当加厚,因此,实验设计基质厚度为 15 cm。

将白三叶、紫穗槐、波斯菊和黑麦草种子各按 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 与配好基质混合,放入直径 17 cm,深 15 cm 塑料花盆(种子主要分布在基质上层),3 个重复·种⁻¹。2009 年 7 月 15 日置于大棚中,第 1 次浇透水后不再浇水,放置 2 d,水分渗透作用基本停止,基质稳定,于 7 月 17 日各盆插入长 14 cm CS 616 土壤水分探头,连接至 TDR 土壤水分仪,隔 1 h 记录 1 次基质体积含水量,自动温湿度计记录大棚内温湿度,同时记录草种的发芽及幼苗的生长情况。持续干旱 50 d 后,4 种幼苗超过 90% 以上已经枯死,取出探头,记录数据。另置一组基质播种黑麦草,将水分探头分 0~5,5~10 和 10~15 cm 横埋入基质中,分层测量,持续 20 d。

2 结果与分析

2.1 基质水分总体衰退特征

图 1 是相同配比基质播种 4 种不同种子后连续干旱 50 d 的水分衰退特征曲线,以 3 个重复数据平均值生成。在开始观测后的第 2 天,即播种后的第 4 天,基质含水量均出现了一个迅速下降的过程,该日的水份耗失要远高于其他时间。这是由于 7 月温度较高,种子发芽较快,播种后 3 d 种子已经逐渐开始发芽,到了第 4 天,大部分幼芽破土而出,使得原本较为平整的基质表面出现很多空隙和裂缝,基质表面的结构被幼苗破坏,增大了土壤受阳光照射的表面积和深度。播种紫穗槐、白三叶、

黑麦草种子的基质分别在连续干旱 45, 44, 43 d 后, 水分衰退趋于直线, 已经不再有明显水分损失, 而此时观察发现基质极度干旱并出现多处裂隙, 各种幼苗的死亡率均超过了 90%, 说明基质蒸发和植物蒸腾都基本停止, 失水量接近 0。

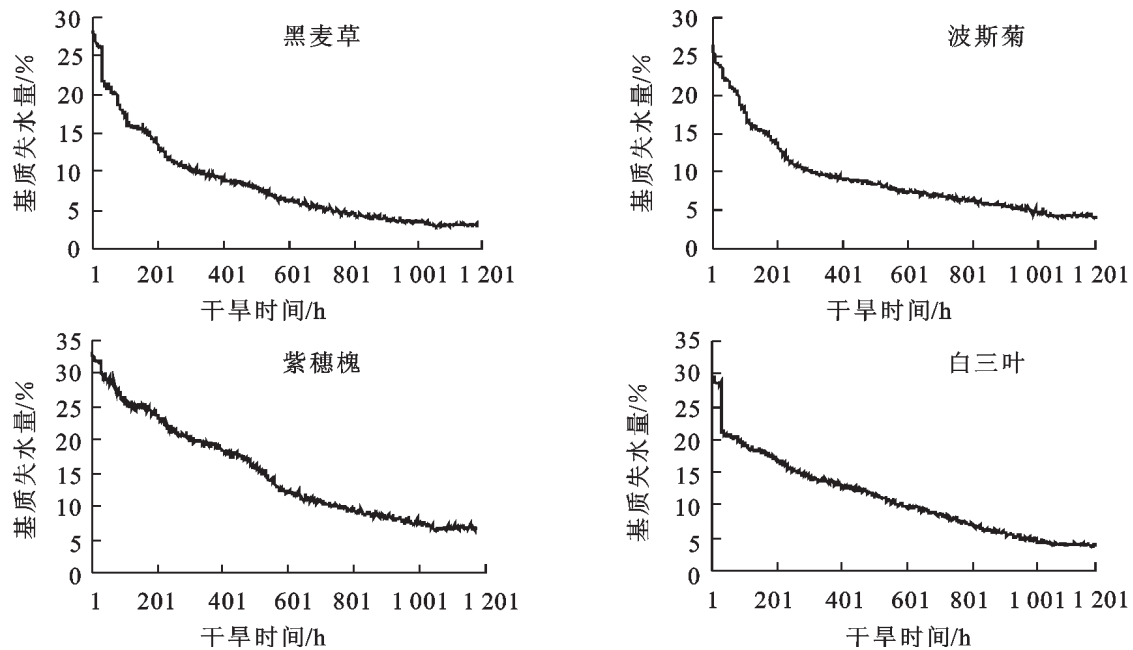


图 1 播种不同植物种子的基质水分衰退特征

Figure 1 Features of water declining of matrix sowing different plant species

播种波斯菊和黑麦草的基质水分衰退前期速率较快, 中后期速率较为缓慢并逐渐趋向于 0, 且波斯菊每盆平均枯萎率在连续干旱第 20 天已经达到 70%, 第 30 天时则超过了 90%, 黑麦草第 30 天每盆平均枯萎率为 60%; 白三叶基质水分衰退除了在第 2 天有急剧下降外, 其他时间变化相对较小, 第 30 天每盆平均枯萎率为 40%; 紫穗槐基质水分衰退速率变化较大, 也无明显的规律, 第 30 天每盆平均枯萎率为 35%。由于环境条件基本一致, 因此, 植物种间基质总体水分衰退和枯萎率的区别应与各植物种单盆株数、生长速度、蒸腾速率等植物生理特性有关。播种白三叶和紫穗槐的基质初始含水量分别为 30.0% 和 32.6%, 高于波斯菊基质 (26.4%) 和黑麦草基质 (28.3%), 且前两者发芽后幼苗株数 (白三叶 80 ~ 100 株·盆⁻¹, 紫穗槐 40 ~ 50 株·盆⁻¹) 小于后两者 (波斯菊 250 ~ 300 株·盆⁻¹, 黑麦草 400 ~ 450 株·盆⁻¹), 可见相同环境条件下, 白三叶和紫穗槐单粒种子发芽和单株幼苗生长的耗水量要高于波斯菊和黑麦草。将播种不同种子的基质含水量与干旱时间拟合成二项式方程 (表 1), 拟合效果较好。

表 1 播种不同植物种子的基质含水量与干旱时间关系

Table 1 Relationship between water content of matrix sowing different plant species and drying time

植物	拟合方程	R ²
波斯菊	$y = (2E - 7x^2 - 0.000\ 3x + 0.207\ 7) \times 100$	0.928\ 3
黑麦草	$y = (2E - 7x^2 - 0.000\ 4x + 0.215\ 6) \times 100$	0.950\ 1
白三叶	$y = (1E - 7x^2 - 0.000\ 3x + 0.230\ 1) \times 100$	0.963\ 5
紫穗槐	$y = (2E - 7x^2 - 0.000\ 4x + 0.309\ 8) \times 100$	0.992\ 1

说明: 表中 y 为基质含水量 (%), x 为干旱时间 (h)。

2.2 基质水分逐日衰退特征

将基质失水量平均值与大棚日平均温度波动进行分析比较 (图 2), 基质失水量前期波动基本与温度波动高度一致, 太阳辐射强, 温度高, 基质蒸发和植物蒸腾快, 失水量多; 反之, 则失水量小。30 d 之后, 基质失水量波动受温度的影响变小, 波动幅度变小; 45 d 之后波动趋于直线, 基质失水量逐渐趋向于 0。采用 Person 相关性分析, 前 30 d 土壤水分波动与温度波动在 0.01 水平上极显著相关, 相关系数 $r = 0.700$, 后 20 d, $r = 0.423$ 无相关性。同时调查发现, 30 d 时, 4 种幼苗枯萎率均超过了

50%。

由于在大棚中，所以风速可视为 0。另外，从浇透水到开始测量 2 d 内，多余重力水基本排除，水分下渗基本停止，因此花盆中基质水分散失主要是蒸发和植物蒸腾、呼吸等生理途径。这些途径与温度、湿度关系最大，因此将温度、湿度、时间与基质含水量拟合成基质水分衰退的多元回归方程，拟合效果较好(表 2)。

2.3 基质水分单日变化特征

大棚内温度从上午 9 : 00 开始快速升高，峰值出现在 14 : 00 - 15 : 00，此后开始逐渐降低；而相对湿度在早晨 4 : 00 最大，下午 15 : 00 左右最低，然后逐渐回升。大气温度最高峰值比太阳辐射最强峰值大约滞后 1 h 左右，而土温最高峰值比大气温度滞后大约 1 h^[14-15]。图 3 中可以看到中午 12 : 00 之前温度虽然逐渐升高，各基质含水量略有下降，但是幅度较小；12 : 00-13 : 00，太阳辐射达到最大值，而基质表面含水量较高，水分直接被迅速蒸发到空气中，出现了大幅度下降；13 : 00-15 : 00，太阳辐射虽然减弱，但是大气温度和土温相继达到最大峰值，基质含水量仍然有较为明显下降。本研究中，在夜间并没有由于温度降低出现土壤中气态水冷凝成液态，导致出现基质含水量上升的现象^[16-17]。这可能是由于处在夏季，以及温室大棚的保温作用，因此昼夜温差不大，夜间冷凝作用不明显，夜间同样也有较高的失水量。

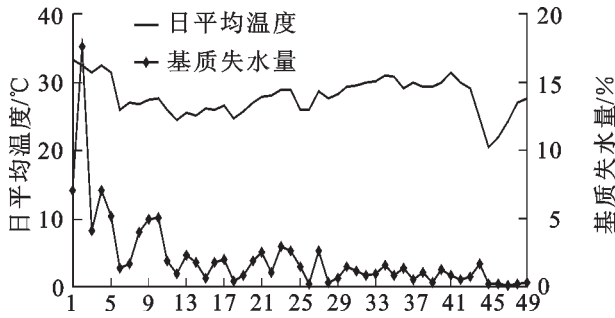


图 2 大棚日平均气温与基质失水量

Figure 2 Waves of temperature and matrix lose water content

表 2 大棚内日平均温度、相对湿度、时间与播种不同植物种子的基质含水量回归方程

Table 2 Regression equations of temperature, humidity, drying time and water content of matrix sowing different plant species

植物	多元回归方程	R ²
波斯菊	$y = (-0.001x_1 - 0.003x_2 - 0.003x_3 + 0.456) \times 100$	0.876
黑麦草	$y = (-0.002x_1 - 0.004x_2 - 0.004x_3 + 0.536) \times 100$	0.881
白三叶	$y = (-0.001x_1 - 0.003x_2 - 0.004x_3 + 0.460) \times 100$	0.931
紫穗槐	$y = (-0.004x_1 - 0.003x_2 - 0.005x_3 + 0.635) \times 100$	0.959

说明：表中 y 为基质含水量(%), x₁ 为大棚日平均温度(℃), x₂ 为相对湿度(%), x₃ 为干旱时间(h)。

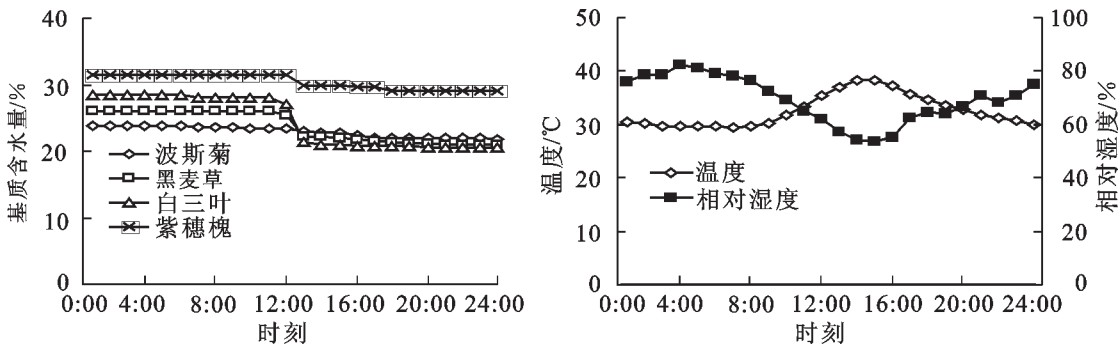


图 3 大棚内温度、相对湿度与基质含水量日变化

Figure 3 Diurnal variation waves of average temperature, humidity and losing water

2.4 基质不同层次水分衰退特征

图 4 表明，经过 2 d 的渗透和蒸发，播种黑麦草的基质表层(0 ~ 5 cm)的含水量已经低于 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 15 cm 基质层，此后表层基质失水速率稳定，变化幅度不大，失水量逐渐减少；5 ~ 10 cm 深度基质层含水量一直高于表层基质，但是随着表层完全干燥，其干燥层厚度缓慢增长，2 层的水分含量逐渐接近，差距逐渐缩小；10 ~ 15 cm 深度基质层由于基质导热性能的影响，受到太阳辐射和温度的影响相对较小，含水量明显高于其他 2 层，同样随着基质完全干燥层的加深，蒸发速率逐渐加

快, 到第 12 天时含水量已经与 5 ~ 10 cm 基质层相同, 到第 15 天时, 10 ~ 15 cm 基质层含水量已经低于 5 ~ 10 cm, 最后 3 个层次含水量趋于一致。另外, 由于黑麦草发芽率高, 生长速度快, 密度大, 成苗后对表层基质起到一定的遮光作用, 减小了其蒸发量, 加上干饱和层的存在, 表层基质蒸发率在自然连续干旱情况下也并不如想象的那么高, 这与人^[18-19]的研究结果相一致。

3 结论

大棚盆栽实验条件下, 无水分补充, 重力水基本排出, 基质主要通过蒸发和植物蒸腾等生理作用失水。在不同植物和连续干旱条件下基质水分衰退极限时间相差不大, 30 d 后失水量明显减弱, 受温度影响减小, 各种幼苗枯萎率均超过了 50%; 45 d 以后基质失水量已相当微弱基本停止, 90% 以上幼苗已经枯萎死亡, 无蒸腾作用, 因此蒸发量接近于 0, 0 ~ 15 cm 基质层可视为全干饱和层。野外虽然温度较之大棚相对较低, 但是风速影响增加, 加速基质水分蒸发。

无水分补充条件下, 紫穗槐在连续干旱 45 d, 白三叶和波斯菊 44 d, 黑麦草 43 d 后, 基质中已无水分散失。白三叶和紫穗槐种子发芽和幼苗生长的耗水量要高于波斯菊和黑麦草。在干旱季节或地区进行植被恢复选择植物种时可适当减少白三叶和紫穗槐种子用量, 以耗水相对较少的草种代替。

基质播种后连续干旱初期失水量大, 第 4 天由于幼苗破土而出更是出现一个失水最高峰值; 日变化中太阳辐射最强时段达到峰值, 气温和土温升高失水也较为明显, 因此, 喷播复绿前期太阳辐射较强时, 基质上层适当加盖遮阳网十分必要。随着干旱持续, 水分含量逐渐减少, 基质逐渐形成完全干燥层并且厚度不断加深, 失水量明显减小。此外, 基质表层(0 ~ 15 cm)失水速率经过前 2 d 充分渗透以后一直保持稳定, 10 ~ 15 cm 基质层前期含水量高, 失水速率较慢, 后期失水加快, 含水量逐渐低于 5 ~ 10 cm 基质层, 3 个层次含水量逐步趋于一致。

参考文献:

- [1] 王思成, 兰剑, 王宁. 高速公路边坡生物防护技术研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2003, 4 (2): 76 - 81.
WANG Sicheng, LAN Jian, WANG Ning. The progress of studies on the technology of side slopes biological protection of expressway [J]. *J Ningxia Agric Coll*, 2003, 4 (2): 76 - 81.
- [2] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (7): 1203 - 1208.
ZHANG Junyun, ZHOU Depei. Study on shrinkage and recovery of thick layer base material spraying for bio-slope-engineering [J]. *Chin J Rock Mech Eng*, 2004, 23 (7): 1203 - 1208.
- [3] JOSE M F, ANTONIO C. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67: 1647 - 1656.
- [4] QIU Yang, FU Bojie, WANG Jun, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. *J Arid Environ*, 2001, 49 (4): 723 - 750.
- [5] HUPET F, VANCLOOSTER M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field [J]. *J Hydrol*, 2002, 261: 86 - 101.
- [6] 赵方莹, 赵廷宁, 丁国栋, 等. 基材喷附技术的植物选配与建植方式[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4 (增刊 1): 155 - 157.
ZHAO Fangying, ZHAO Tingning, DING Guodong, et al. Choice and establishment ways of plant in implementing medium-spraying technique [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, 4 (supp 1): 155 - 157.
- [7] 杨喜田, 赵宁, 董惠英. 论厚层客土喷播技术的植物群落目标设定和植物种选配[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4 (1): 70 - 74.

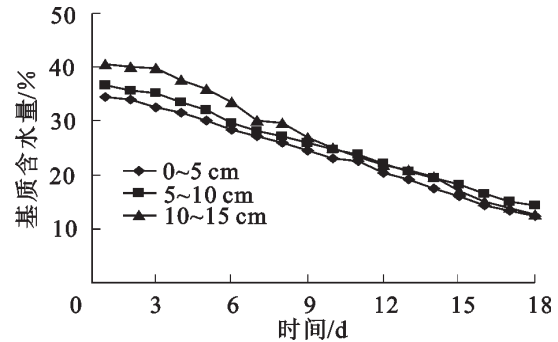


图 4 播种黑麦草基质不同层次水分衰退特征

Figure 4 Features of water declining in different matrix layers sowing *Lolium perenne*

- YANG Xitian, ZHAO Ning, DONG Huiying. Aim establishment of vegetation community and plant species selection in the using of Spray Seeding Technique [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, **4** (1): 70 – 74.
- [8] 朱峪增. 客土喷播施工工艺技术要点[J]. 草业科学, 2003, **20** (11): 76 – 78.
- ZHU Yuzeng. Main points in spray seeding construction technology [J]. *Pratacul Sci*, 2003, **20** (11): 76 – 78.
- [9] 张俊云, 周德培, 武小菲. 厚层基材喷射植被护坡的水分常数分析[J]. 水土保持通报, 2000, **25** (1): 44 – 50.
- ZHANG Junyun, ZHOU Depei, WU Xiaofei. Moisture contents of thick layer base material spraying bio-slope engineering [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2000, **25** (1): 44 – 50.
- [10] 吴长文, 章梦涛, 付奇峰. 斜坡喷播绿化技术的研究[J]. 中国水土保持, 2000 (4): 24 – 26.
- WU Changwen, ZHANG Mengtao, FU Qifeng. Research about spraying seeding greening technology on slop [J]. *Soil Water Conserv China*, 2000 (4): 24 – 26.
- [11] 山寺喜成, 安保昭, 吉田宽. 恢复自然环境绿化工程概论[M]. 罗晶, 张学培, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 1997.
- [12] 都市绿化技术开发机构, 地面植被共同研究会. 地面绿化手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [13] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003, **40** (1): 59 – 64.
- ZHOU Lingyun, CHEN Zhixiong, LI Weimin. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR) [J]. *Acta Pedol Sin*, 2003, **40** (1): 59 – 64.
- [14] 范爱武, 刘伟, 王崇琦. 土壤温度和水分日变化实验[J]. 太阳能学报, 2002, **23** (6): 721 – 724.
- FAN Aiwu, LIU Wei, WANG Chongqi. Experimental study on the daily changes of soil temperature and water content [J]. *Acta Energ Sol Sin*, 2002, **23** (6): 721 – 724.
- [15] 刘炳成, 刘伟, 杨金国. 湿分层土壤中热湿迁移与水分蒸发的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, **25** (6): 1004 – 1006.
- LIU Bincheng, LIU Wei, YANG Jinguo. Experimental studies on heat and moisture transfer and soil water evaporation under natural condition [J]. *J Eng Thermophys*, 2004, **25** (6): 1004 – 1006.
- [16] 夏自强. 温度变化对土壤水运动影响研究地[J]. 地球信息科学, 2001 (4): 19 – 24.
- XIA Ziqiang. Effects of temperature variation on soil water movement and water exchange between soil water and phreatic water [J]. *Geo-Inf Sci*, 2001 (4): 19 – 24.
- [17] 时新玲, 张富仓, 王国栋. 土壤失水干燥的动力学实验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, **14** (3): 333 – 339.
- SHI Xinling, ZHANG Fucang, WANG Guodong. An experimental study of soil dryness dynamics process [J]. *J Basic Sci Eng*, 2006, **14** (3): 333 – 339.
- [18] 曾亦键, 万力, 王旭升, 等. 浅层包气带地温与含水量昼夜动态的实验研究[J]. 地学前缘, 2006, **13** (1): 52 – 57.
- ZENG Yijian, WANG Li, WANG Xusheng, *et al.* An experimental study of day and night trends of soil temperature and moisture in the shallow unsaturated zone [J]. *Earth Sci Front*, 2006, **13** (1): 52 – 57.
- [19] QIU Guoyu, YANO T, MOMII K. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface [J]. *J Hydrol*, 1998, **210** (1 – 4): 93 – 105.