

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.05.021

高速公路岩石边坡绿化养护浇水频率研究 ——以京承高速公路（三期）为例

徐洪雨¹, 王英宇², 宋桂龙¹, 韩烈保¹

(1. 北京林业大学 草坪研究所, 北京 100083; 2. 北京市京石园林绿化有限公司, 北京 102600)

摘要: 为估算边坡绿化养护的浇水频率, 以京承高速公路3期为例, 采用环刀测试土壤含水量的方法, 对2个不同坡向边坡共6个坡位的基质田间持水量、基质水分变化速率以及试验边坡4种优势植物的萎蔫系数分别进行调查。根据测试指标的调查结果, 浇水频率的估算结果为6个坡位之间的浇水频率为1次~1次/10 d不等, 从每个边坡3个坡位浇水频率的平均值来看, 阳坡和阴坡的平均浇水频率都约为1次/13 d。将估算结果在实践中进行验证, 充足降雨后, 调查发现约13~15 d后植物发生萎蔫, 不能维持正常生长。浇水频率的理论估算结果与实践验证结果基本相吻合, 浇水频率的估算方法在岩石边坡绿化养护中具有理论指导意义。

关键词: 环境工程; 浇水频率; 基质水分变化; 公路边坡; 绿化养护

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)05-0132-06

Research on Watering Frequency of Virescence Maintenance to Rocky Slopes of Freeway—A Case Study of Beijing-Chengde Freeway (Period III)

XU Hong-yu¹, WANG Ying-yu², SONG Gui-long¹, HAN Lie-bao¹

(1. Institute of Turfgrass Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Jingshi Landscaping Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: In order to estimate the watering frequency of freeway rocky slopes' virescence maintenance, the stromal field capacity, stromal daily variation of water content and the wilting coefficient of 4 kinds of advantage plant on tested slopes on 2 slopes' different positions of Beijing-Chengde freeway (Period III) are investigated with the method of cutting rings to test soil moisture. According to the test result, the estimated watering frequency is 10 to 17 days each time at 6 positions of slopes. Judging by the average watering frequency of 3 positions of each slope, the watering frequency is 13 days each time on both the south-facing slope and the north-facing slope. After the estimation, tracking study is conducted to the plants on slopes to check the estimate result in practice, it is found that the plants are wilted and could not grow normal after full raining 13 to 15 days. So the method of estimating watering frequency could provide theoretical direction for virescence maintenance of rocky slopes because of the study result conforms to the estimation result.

Key words: environmental engineering; watering frequency; substrates moisture change; freeway slope; virescence maintenance

0 引言

生态恢复技术在我国经过近20 a的发展, 目前

已经得到广泛的应用。京承高速公路3期是我国北方地区公路生态护坡比较成功的案例, 其边坡主要为岩石边坡, 采用厚层基材喷播技术为植物营造

收稿日期: 2012-09-12

基金项目: 交通运输部科技项目(2009353311050); 北京市首都公路发展集团有限公司科技项目; 国家林业局林业科学技术推广项目(201131)

作者简介: 徐洪雨(1986-), 男, 内蒙古林西人, 硕士研究生。(xhy_rensheg@163.com)

10~15 cm 厚的生长基质。由于以下 2 个原因,使得在边坡建植后 1~3 a 内的绿化养护过程中,水分因子成为限制植被恢复进程的主要因素。(1) 北京地区全年降雨 80% 主要集中在夏季的 6、7 和 8 月份,其他月份干旱少雨;(2) 边坡基质厚度薄,储水和保水能力较差。在边坡植被浇水养护管理上,主要存在以下 2 个问题:(1) 基质水分变化速率决定着养护的浇水频率,而影响基质水分变化速率的因素却是非常复杂,如植被、立地条件、气候因素等^[1],造成不同边坡对水分的需求差异性很大,浇水随机性大;(2) 因为边坡存在一定坡度,易产生径流,水分存储难,流失快,所以单次浇水量很小,难以到达植物根系,维持植物正常生长需求的时间较短。目前主要是通过提高浇水频率的方法来解决单次浇水量小的问题,使得运输成本大大增加。公路边坡是干旱与半干旱气候区一种特殊的立地条件,区域有效降水不足、坡面受水量少、浇水存在的问题等,是公路边坡植被恢复工程中至今没有解决的关键技术问题,坡面水分状况是制约边坡植被恢复的主要因素^[2-3]。所以,科学、合理地指导浇水的频率,避免盲目浇水造成运输成本上不必要的损失,可以作为解决问题的突破口。

目前在园林绿化行业,对浇水定额的制订主要参考农作物年需水量 ET_0 ^[4-6] 的计算方法,该方法受到联合国粮农组织的推荐。有研究通过盆栽试验,测量某植物的年需水量,从而确定此种植物的水分管理^[7-8]。目前有研究通过灌溉饱和点和灌溉补偿点来确定灌水定额^[9-10],这为本研究思路提供了重要的参考依据。本文希望从基质含水量变化的角度推出一种能够简便地估算浇水频率的方法。

1 研究内容与方法

1.1 试验地点概况

试验地点位于京承高速公路 3 期,是国家高速公路网规划中大庆—广州的重要组成部分,全长 209.1 km,北京段长 132.4 km。京承高速公路 3 期位于北京市密云县东北部山区,起于密云县穆家峪镇沙峪沟,与京承高速公路 2 期相接,止于京冀交界处司马台,与京承高速公路河北承德段相接,全长 62.7 km。

京承高速公路 3 期边坡主要为岩石边坡,多由弱风化凝灰岩和花岗岩构成。岩石边坡的植被恢复采用厚层基材喷播技术,截止本次试验研究,边坡植被恢复已经有 2 a 的时间。根据需要选择坡度相

同、坡向不同的试验边坡,边坡情况见表 1。

表 1 试验边坡情况

Tab. 1 Conditions of tested slopes

桩号	类型	坡位	坡向/(°)	坡度/ (°)	基质厚度/ cm	植被覆 盖度/%	
K122+000 ~	岩石 边坡	I	330		50	8.3	95
K122+100		II	330	阴坡	50	8.7	95
出京		III	330		43	8.5	95
K122+000 ~	岩石 边坡	I	170		50	8.8	50
K122+180		II	170	阳坡	53	8.7	80
出京		III	170		40	8.7	95

注: I 表示 1 级坡, II 表示 2 级坡, III 表示 3 级坡。

密云县位于 $E116^{\circ}39'33'' \sim 117^{\circ}30'25''$, $N40^{\circ}13'7'' \sim 40^{\circ}47'57''$, 是北京所辖之远郊县, 属温暖带季风型大陆性半干旱气候, 四季分明, 干旱冷暖变化剧烈。年平均气温在 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间, 无霜期 176 d, 年降雨量 600~700 mm。气象条件影响边坡基质水分的变化, 参考中国气象科学共享服务网, 将试验期间及一周前的气象因子统计见表 2, 本研究试验日期为 2011 年 7 月 31 日至 2011 年 8 月 6 日。试验 1 周前降雨充沛, 平均相对湿度比较大, 日照时数比较少, 相比之下, 平均气温、平均风速及最大风速没有明显变化。

1.2 研究内容与方法

1.2.1 研究内容

本研究的最终目标是以常见的调查指标, 估算边坡绿化养护的浇水频率。假设边坡单次浇水的最大量为基质达到其田间持水量, 在连续无自然降雨的情况下, 根据基质含水量的变化计算出基质水分变化速率, 再以边坡优势植物萎蔫系数作为判断浇水的依据, 根据 3 者的关系即可估算出基质含水量达到田间持水量的情况下能维持植物正常需要的时间。浇水频率的估算公式如下:

$$\text{浇水频率} = \frac{1}{\frac{\text{田间持水量} - \text{萎蔫系数}}{\text{基质水分变化速率}}}, \quad (1)$$

式中, 田间持水量假设为单次浇水的最大量, 亦作为单次浇水量的标准。

1.2.2 研究方法

从表 2 中可以看出, 2011 年 7 月 31 日前 1 周连续降雨, 基质含水量已经达到较大值, 并且天气预报 1 周内无明显降雨, 适合进行试验。

(1) 田间持水量的测定

使用环刀分别对 2 个试验边坡取原状土各 3 份, 采用烘干称重法测定其基质含水量, 求平均值作为

表2 试验期间各气候因子(密云台站: 54416)

Tab. 2 Climatic factors during test

(Miyun meteorological observatory: 54416)

时间	平均气温/ ℃	平均相对湿度/%	日照时 数/h	平均 风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大 风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	24 h 降水量/ mm
2011-7-24	27.9	91	0.0	1.8	8.2	101.6
2011-7-25	24.7	97	3.3	0.6	4.0	71.2
2011-7-26	26.8	79	12.4	1.0	2.6	0.0
2011-7-27	25.7	85	0.0	1.5	4.0	27.6
2011-7-28	28.2	81	1.8	1.3	2.9	0.0
2011-7-29	25.2	93	0.0	1.6	5.5	34.4
2011-7-30	25.1	83	9.4	2.0	3.5	12.3
2011-7-31	27.4	76	12.4	1.2	3.3	0.0
2011-8-1	27.8	78	4.5	1.2	2.4	0.0
2011-8-2	26.8	71	2.6	1.3	2.9	0.0
2011-8-3	25.4	75	10.8	1.4	3.6	0.0
2011-8-4	26.3	76	5.5	1.8	3.0	0.0
2011-8-5	26.8	79	2.6	1.2	3.3	0.0
2011-8-6	25.6	81	2.2	1.2	3.7	0.0

该边坡基质的田间持水量^[11]。

(2) 植物萎蔫系数的测定

植株叶片产生永久萎蔫时测出的土壤含水量即为植物的萎蔫系数。由于植物达到永久萎蔫后会有大量植物死亡,所以在本研究定义植物叶片总量的2/3发生卷曲时即认为该植物发生萎蔫。在2011年8月6日试验后,对边坡进行控水试验,跟踪调查边坡植被,在连续无明显自然降雨的情况下,在不同的时间边坡主要植物会出现萎蔫的情况。每种植物出现萎蔫时,使用环刀分别取基质各3份,参考田间持水量的测定方法测定基质含水量,求其平均值作为此植物的萎蔫系数。

(3) 基质水分变化速率

在2个试验边坡分别划定2 m×2 m试验样方,2011年7月31日至2011年8月6日期间,使用环刀每日6:00 am对2个试验样方的基质分别随机取样各3份,参考田间持水量的测定方法测定基质含水量,求其平均值作为当日基质含水量。根据连续7 d基质含水量的变化,计算基质水分变化速率。

(4) 气象因子测定

光照强度使用DT-1308 Light Meter进行测定,空气温度、空气湿度和风速使用北京市监测仪器厂生产的ZRQF-D型智能热球式风速计进行测定。2011年7月31日至2011年8月6日期间,每日

6:00—18:00,每隔2 h对2个试验边坡的气象因子测定1次,每个气象因子每日获得8个数值,当日对每个气象因子的8个数据取平均值作为当日各气象因子的大小,最后分析基质水分变化速率与各气象因子的相关性。

2 结果分析

2.1 浇水频率的估算

2.1.1 田间持水量

提高单次浇水量是降低浇水频率的方法之一,通过减少浇水频次来降低运输成本,单次浇水量越大,基质水分能维持植物正常生长的时间越长。田间持水量是基质的最大持水能力,本研究假设将其作为单次浇水的最大量。在实际浇水中,由于边坡坡度的存在,单次浇水很难使基质水分达到田间持水量的水平。

本研究假设将田间持水量作为单次浇水的最大量,也是为单次浇水量设定一个依据。表3为2个试验边坡基质田间持水量的测定结果,对3个样品的测定结果取平均值作为边坡田间持水量的最终测定结果。从测定的结果来看,2个试验边坡基质的田间持水量基本相同,分别为阴坡 $46.53 \text{ g}\cdot(100 \text{ g})^{-1}$ 、阳坡 $46.62 \text{ g}\cdot(100 \text{ g})^{-1}$ 。

表3 试验边坡基质田间持水量

Tab. 3 Stromal layer field capacity of tested slopes

边坡	样本	田间持水量/ [$\text{g}\cdot(100 \text{ g})^{-1}$]
阴坡	1	46.68
	2	46.40
	3	46.51
	AVG	46.53
阳坡	1	46.70
	2	46.84
	3	46.32
	AVG	46.62

2.1.2 基质水分变化速率

随着基质水分的散失,水分与基质颗粒之间的吸力逐渐增大,水分脱离基质颗粒蒸散到空气中的难度增大,基质含水量由田间持水量变为植物萎蔫系数的过程并非线性变化^[12]。在浇水频率估算的过程中,根据基质含水量的2个极值:田间持水量和植物萎蔫系数,以及变化的时间求取基质水分变化速率,忽略基质水分散失的过程。

表4统计了试验边坡基质含水量连续7 d的调查结果,根据调查结果可以计算出2个试验边坡3个

坡位连续 6 d 的基质水分变化速率。经过计算，阴坡 I 级坡、II 级坡和 III 级坡基质水分变化速率分别为 $2.73\text{ g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ 、 $3.42\text{ g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ 和 $2.98\text{ g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ ，相比 II 级坡，I 级坡和 III 级坡基质水分变化速率较小。阳坡 I 级坡、II 级坡和 III 级坡基质水分变化速率分别为 $3.60\text{ g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ 、 $2.30\text{ g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ 和 $3.18\text{ g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ ，相比 II 级坡，I 级坡和 III 级坡基质水分变化速率较大。

表 4 基质含水量连续 7 d 调查结果 [单位: $\text{g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$]

		日期						
边坡	坡位	2011/ 7/31	2011/ 8/1	2011/ 8/2	2011/ 8/3	2011/ 8/4	2011/ 8/5	2011/ 8/6
阴坡	I	35.16	30.02	28.32	22.65	18.94	18.41	18.78
	II	37.47	36.43	30.63	30.72	26.16	23.12	16.97
	III	34.57	30.93	31.88	26.18	20.21	17.49	16.68
阳坡	I	25.95	16.65	8.11	7.34	5.22	4.99	4.33
	II	23.28	22.18	14.81	12.03	11.14	9.63	9.46
	III	27.87	24.31	17.12	13.94	11.23	10.33	8.77

注: I 表示 1 级坡, II 表示 2 级坡, III 表示 3 级坡。

2.1.3 边坡优势植物萎蔫系数

萎蔫系数即植物发生萎蔫时土壤含水量，为植物维持正常生长的最低含水量，本研究将其作为判断边坡需要浇水的参考依据。某植物叶片总量的 2/3 发生卷曲时即该植物发生萎蔫，研究中选择边坡 4 种优势植物作为参考植物，表 5 为 4 种植物萎蔫系数的测定结果。

表 5 边坡参考植物的萎蔫系数

参考植物	萎蔫系数/ $[\text{g} \cdot (100\text{ g})^{-1}]$
紫穗槐 (<i>Amorpha fruticosa</i> L.)	5.24
胡枝子 (<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.)	8.23
紫花苜蓿 (<i>Medicago sativa</i> L.)	9.53
高羊茅 (<i>Festuca arundinacea</i>)	8.10

2.1.4 浇水频率估算结果

结合 2.1 节中田间持水量、基质水分变化速率、边坡优势植物萎蔫系数的测定结果，根据 1.2.1 中公式 (1) 对浇水频率进行估算，估算结果见表 6。

从估算结果来看，不同坡向边坡之间、不同坡位之间的浇水频率都是不同的，即使同一边坡的同一坡位以不同参考植物作为判断依据浇水频率也是不同的。如阴坡的 I 级坡，假设浇水后基质含水量

表 6 浇水频率的估算结果

Tab. 6 Calculation result of watering frequency						
边坡	坡位	基质水分变		参考植物萎		浇水频率/ (1 次·d ⁻¹)
		田间持水量/ [g·(100 g) ⁻¹]	化速率/ [g·(100 g· d ⁻¹)]	焉系数/ [g·(100 g) ⁻¹]		
阴坡	I	46.53	2.73	ZS	5.24	1/15
				H	8.23	1/14
				ZH	9.53	1/14
				G	8.10	1/14
	II	46.53	3.42	ZS	5.24	1/12
				H	8.23	1/11
				ZH	9.53	1/11
				G	8.10	1/11
	III	46.53	2.98	ZS	5.24	1/14
				H	8.23	1/13
				ZH	9.53	1/13
				G	8.10	1/13
阳坡	I	46.62	3.60	ZS	5.24	1/12
				H	8.23	1/11
				ZH	9.53	1/10
				G	8.10	1/11
	II	46.62	2.30	ZS	5.24	1/18
				H	8.23	1/17
				ZH	9.53	1/16
				G	8.10	1/17
	III	46.62	3.18	ZS	5.24	1/13
				H	8.23	1/12
				ZH	9.53	1/12
				G	8.10	1/12

注: I 表示 1 级坡, II 表示 2 级坡, III 表示 3 级坡。ZS 代表紫穗槐, H 代表胡枝子, ZH 代表紫花苜蓿, G 代表高羊茅。

达到田间持水量，在连续无自然降雨及人工浇水的情况下，以紫穗槐作为浇水参考依据，浇水的频率为 1 次/15 d，如果以胡枝子作为浇水参考依据，浇水频率为 1 次/14 d。对 2 个边坡不同坡位浇水频率的估算结果取平均值，阳坡和阴坡的平均浇水频率都约为 1 次/13 d。

2.2 估算结果在实践中的验证

进行浇水频率估算试验的同时，从 2011 年 7 月 31 日（日前充足降雨，见表 2）开始，对 K122 + 000 ~ K123 + 700 段多个边坡进行跟踪调查。截止 2011 年 8 月 12 日，期间连续 13 d 无明显降雨，亦未对边坡进行人工浇水。调查发现，试验段 90% 以上边坡的植物发生萎蔫，如图 1 所示，需要及时浇水，只有少数覆盖度较好的边坡其植物未出现萎蔫。继续对植物未出现萎蔫的边坡进行跟踪调查，截止

2011年8月15日,期间连续15 d无明显降雨,亦未对边坡进行人工浇水,植物发生萎蔫,如图2所示,需要及时浇水。



图1 持续13 d未浇水边坡其植物的表现

Fig. 1 Pictures of plants on slope on the occasion of never watering between 13 days



图2 持续15 d未浇水边坡其植物的表现

Fig. 2 Pictures of plants on slope on the occasion of never watering between 15 days

总结此调查结果,边坡(2 a恢复期)在充沛降雨后,在8月的气候条件下,持续无明显降雨的情况下,植物能维持正常生长的时间约13~15 d。调查结果与浇水频率的估算结果相吻合,估算方法可以在浇水作业中得到应用。

优势植物的状态是边坡是否需要浇水的判断依据,其抗旱性越强,浇水频率就会越低,这对减少浇水养护成本非常重要。例如,以紫花苜蓿为优势植物的边坡,其浇水频率要高于以胡枝子为优势植物的边坡。

3 讨论

浇水频率的估算过程虽然简单,但是,实际上基质水分变化速率受到多种因素的影响,进而影响浇水频率的估算结果,本研究对浇水频率的影响因素以及浇水频率估算方法的利用情况进行如下讨论。

(1) 边坡不同位置浇水频率的差异

图3描述了2个试验边坡基质含水量的变化特征,不同边坡之间、相同边坡不同坡位之间基质含水量的变化存在差异。从基质含水量变化趋势的拟合结果来看,阴坡基质含水量的变化趋势为直线形,而阳坡基质含水量的变化趋势为二项式。

(2) 浇水频率受多种因素的影响

在浇水频率估算的过程中,基质田间持水量和

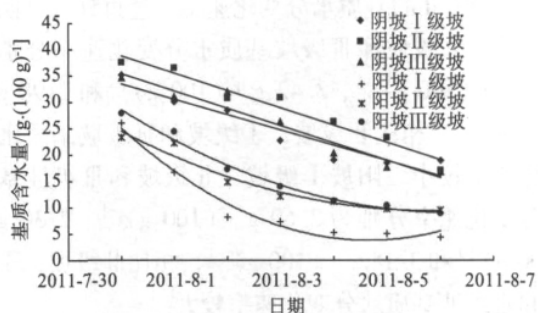


图3 边坡基质含水量变化特征

Fig. 3 Change of stromal water content in slopes

植物萎蔫系数在短时间内不容易发生很大的变化,而基质水分变化速率却受外界因素影响较大,进而影响浇水频率。基质水分蒸散表现在基质含水量的变化上,而气候因素直接影响基质水分蒸散,因此气象因素也会对浇水频率产生影响。坡向、坡高等立地条件对边坡小气候会产生影响,间接对浇水频率产生影响。另外,植被对基质有保水、保墒的作用,影响基质水分蒸散而影响浇水频率。

① 气候因素对浇水频率的影响

表7为基质水分变化速率与气候因子的相关性。基质水分变化速率与风速、光照强度和空气温度呈正相关关系,与空气湿度呈负相关关系,这与前人的研究结果相同^[13]。在阴坡,与风速的相关性最大,在阳坡,与风速和光照的相关性较大,光照是影响阳坡和阴坡基质水分变化速率差异的主要原因。基质水分变化速率与风速相关性较高,并且I级坡的相关系数最大,这与公路上汽车的高速行驶有关。从表7中得出,基质水分变化速率与气象因子的相关性在2个试验边坡的不同坡位呈现规律性的变化,坡高影响边坡的小气候而影响基质水分变化速率,进而影响浇水频率。

表7 边坡基质水分变化速率与气象因子的相关系数

Tab. 7 Correlation factors of stromal water content change rates and meteorological factors

边坡	坡位	风速	光照强度	空气温度	空气湿度
阴坡	I	0.629	0.102	0.139	-0.563
	II	0.447	0.161	0.136	-0.308
	III	0.440	0.312	0.242	-0.228
阳坡	I	0.679	0.750	0.274	-0.619
	II	0.462	0.686	0.108	-0.571
	III	0.402	0.517	0.348	-0.323

注: I表示I级坡,II表示2级坡,III表示3级坡。

② 植被盖度对浇水频率的影响

表1介绍了研究地点的植被概况,结合基质水分变化速率的对比进行如下讨论。阳坡Ⅰ级坡的基质水分变化速率最大,其边坡覆盖度也是试验边坡中最低的,仅为50%。植被对基质有遮阳、保水的作用,植被覆盖度较差的边坡其裸露的面积较大,基质水分蒸发的速率就大。植被覆盖度影响基质水分的变化速率而影响浇水频率。

③ 植物抗旱性对浇水频率的影响

表5列举了4种植物的萎蔫系数,植物的萎蔫系数越小,维持正常生长对基质的含水量要求越低,抗旱性越强。根据式(1)可以得出,植物的萎蔫系数越小,浇水频率越小,这个结论从表6的估算结果中也可以得出。例如,以紫花苜蓿为优势植物的边坡,其浇水频率要高于以高羊茅为优势植物的边坡。在边坡建植前,种子的配比中尽量选择抗旱性强的植物,降低养护时浇水的成本。

(3) 对浇水频率估算的应用

本试验研究进行的时间从2011年7月至2011年8月,浇水频率估算的结果对实践的意义并不是很大。但是浇水频率的估算结果在实践中已经得到验证,说明此浇水频率的估算方法可以在边坡浇水作业中得以应用,为浇水措施的实施提供理论指导。

参考文献:

References:

- [1] 卜耀军,赵聶生,尚爱军,等.路堤和路堑边坡土壤水分变化研究——以陕蒙沙漠高速公路为例[J].水土保持通报,2009,29(4):98-100.
BU Yao-jun, ZHAO Nie-sheng, SHANG Ai-jun, et al. Soil Moisture Dynamics of Road Embankment and Cutting Slope: A Case Study of Shaanxi-Inner Mongolia Desert Expressway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29 (4): 98-100.
- [2] 刘浩,艾应伟,陈黎萍,等.道路边坡土壤水分空间变异性研究[J].水土保持研究,2008,15(1):241-243.
LIU Hao, AI Ying-wei, CHEN Li-ping, et al. Study on the Spatial Variability of Soil Water Moisture of the Road Slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15 (1): 241-243.
- [3] 答竹君,艾应伟,宋婷,等.道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析[J].水土保持通报,2011,31(1):72-75.
DA Zhu-jun, AI Ying-wei, SONG Ting, et al. Spatial and Seasonal Variability of Soil Water in Road Slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31 (1): 72-75.
- [4] 陈丽华,王礼先.北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定[J].水土保持研究,2001,8(4):161-164.
CHEN Li-hua, WANG Li-xian. Classification of Ecological Water Use and Quota Determination of Ecological Water Use of Forest Cover in Beijing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001, 8 (4): 161-164.
- [5] 张庆峰,李建龙,赵芸晨.四种常用草坪草的水分蒸散与补偿规律的研究[J].中国草地学报,2008,30(2):85-92.
ZHANG Qing-feng, LI Jian-long, ZHAO Yun-chen. Evapotranspiration and Water Supplement of Four Turfgrasses [J]. Chinese Journal of Grassland, 2008, 30 (2): 85-92.
- [6] 袁小环,段留生,孙璐,等.4种宿根花卉北京地区水分蒸散规律与节水灌溉[J].中国农业大学学报,2007,12(6):1-5.
YUAN Xiao-huan, DUAN Liu-sheng, SUN Lu, et al. Evapotranspiration and Water-saving Irrigation of Four Perennial Flowers in Beijing [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12 (6): 1-5.
- [7] 孙强,韩建国,姜丽,等.草坪蒸散量及水分管理的研究[J].草地学报,2004,12(1):51-56.
SUN Qiang, HAN Jian-guo, JIANG Li, et al. Study on the Evapotranspiration Rate and Water Management of Turf [J]. Acta Agrestia Sinica, 2004, 12 (1): 51-56.
- [8] 胡九林.天津滨海地区草坪耗水规律及灌溉制度研究[D].北京:北京林业大学,2006.
HU Jiu-lin. Study on Water Consumption Law and Irrigation Scheduling of Turfgrass in Tianjin Seashore Region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [9] 韩烈保,王海艺,黄明勇,等.天津滨海地区洋白蜡与金银木灌溉制度研究[J].北京林业大学学报,2006,28(S1):8-11.
HAN Lie-bao, WANG Hai-yi, HUANG Ming-yong, et al. Irrigation Schedule of Fraxinus Pennsylvanica and Lonicera Maackii in Tianjin Seaside Region [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28 (S1): 8-11.
- [10] 袁小环,段留生,孙璐,等.4种宿根花卉北京地区水分蒸散规律与节水灌溉[J].中国农业大学学报,2007,12(6):1-5.
YUAN Xiao-huan, DUAN Liu-sheng, SUN Lu, et al. Evapotranspiration and Water-saving Irrigation of Four Perennial Flowers in Beijing [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12 (6): 1-5.

(下转第152页)

- 2011, 38 (12): 15244 – 15252.
- [7] TAN K C, CHEW Y H, LEE L H. A Hybrid Multi – objective Evolutionary Algorithm for Solving Truck and Trailer Vehicle Routing Problems [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172 (3): 855 – 885.
- [8] VILLEGAS J G, PRINS C, PRODHON C, et al. A GRASP with Evolutionary Path Relinking for the Truck and Trailer Routing Problem [J]. Computers and Operations Research, 2011, 38 (9): 1319 – 1334.
- [9] 李明才, 盛大洪, 汽车甩挂运输的最佳运距 [J]. 江苏交通, 1994 (1): 18 – 20.
- LI Ming-cai, SHENG Da-hong. Optimal Transport Distance for Truck and Trailer Transport [J]. Jiangsu Transportation, 1994 (1): 18 – 20.
- [10] 包继华, 张鑫, 张建武. 一种新的汽车列车动力学建模方法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41 (2): 244 – 249.
- BAO Ji-hua, ZHANG Xin, ZHANG Jian-wu. A New Method of Dynamic Model Building of Combination Vehicles [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41 (2): 244 – 249.
- [11] 李永福. 有限元及应力测量在厢式半挂车设计中的应用 [J]. 公路交通科技, 1988, 5 (1): 49 – 53.
- LI Yong-fu. Application of Finite Element Analysis and Stress Measurement to the Design of the Semi-trailer Van [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1988, 5 (1): 49 – 53.
- [12] CHIANG C W, LEE W P, HEH J S. A 2-opt Based Differential Evolution for Global Optimization [J]. Applied Soft Computing, 2010, 10 (4): 1200 – 1207.
- [13] ENGELS C, MANTHEY B. Average-case Approximation Ratio of the 2-opt Algorithm for the TSP [J]. Operations Research Letters, 2009, 37 (2): 83 – 84.
- [14] LIU Fei, ZENG Guang-zhou. Study of Genetic Algorithm with Reinforcement Learning to Solve the TSP [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36 (3): 6995 – 7001.

(上接第137页)

- [11] 林大仪. 土壤学实验指导 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- LIN Da-yi. Guidance of Soil Science Experiment [M]. Beijing: China Forestry Press, 2004.
- [12] 扈胜霞. 吸力对原状黄土强度变形和水分变化的影响及其应用 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- HU Sheng-xia. The Effect of Matric suction on the Strength and Deformation of Intact Loess and Its Application [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2002.
- [13] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 水分蒸散耗散结构的初步验证 [J]. 水土保持研究, 2009, 16 (6): 200 – 204, 209.
- LI Hong-shou, WANG Wan-fu, ZHANG Guo-bin, et al. The Primary Proof-testing of the Evapotranspiration Dissipative Structure in the Extreme Dry Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16 (6): 200 – 204, 209.

(上接第146页)

- [16] 袁世军, 庞燕. 两型社会创建环境下长株潭城市群公路货运模式探讨 [J]. 物流工程与管理, 2010, 32 (10): 82 – 84.
- YUAN Shi-jun, PANG Yan. Research on the Create Two Types of Social Environment Xiangtan Urban Agglomeration Road Freight Mode [J]. Logistics Engineering and Management, 2010, 32 (10): 82 – 84.
- [17] LONG Xiao-qiang, ZHANG Yi-bin, CHEN Yan-ru. Using Voronoi Diagram in Construction the Scope of Logistics Park Hinterland: an Engineering Application [J]. Systems Engineering Procedia, 2011 (2): 69 – 76.
- [18] YUE Hui, YUE Wen-yu, LONG Xiao-qiang. Engineering Evaluation System of Logistics Park Capability [J]. Systems Engineering Procedia, 2011 (2): 295 – 299.
- [19] ANTUN J P, LOZANO A, ALARCON R, et al. The Physical Distribution of Goods in a Megalopolis: Strategies for Policies on the Location of Logistics Facilities within the Central Region of Mexico [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2010, 2 (3): 6130 – 6140.
- [20] WEN C H, TSAI M C, LIN C H. Classification and Competition Analysis of Air Cargo Logistics Providers: The Case of Taiwan's High-technology Industry [J]. Journal of Air Transport Management, 2011, 17 (2): 106 – 109.