

基于路基湿度预估的综合湿度指数

李 聪^{1,2}, 凌建明¹, 官盛飞¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要: 不同土组的路基湿度对路基路面结构工作性状与使用寿命均有显著影响, 合理选取表征指标是路基湿度预估的关键. 将路基湿度影响因素归并为气候与地下水位, 引入气候因素表征指标——综合湿度指数, 给出综合湿度指数定义, 其计算分为潜在蒸发蒸腾总量计算、湿度平衡计算、年度湿度指数值计算, 并给出具体算例. 对计算得到的全国 400 个气象站点综合湿度指数值按照公路自然区划进行归并, 认为所提出的综合湿度指数可作为公路自然区域划分的新指标.

关键词: 路基湿度; 气候因素; 综合湿度指数; 潜在蒸发蒸腾总量; 湿度平衡; 气候分区

中图分类号: U416.1, P468

文献标识码: A

Prediction-based Subgrade Moisture Thornthwaite Moisture Index

LI Cong^{1,2}, LING Jianming¹, GUAN Shengfei¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Subgrade moisture has critical effect on performance of pavement structure and life of highway. Selection of indexes appropriately suggests influence factors are important for prediction of moisture. First, the factors of subgrade moisture were merged into climate condition and groundwater. Furthermore, thornthwaite moisture index (TMI), which comprehensively reflects influence of climate and latitude was introduced. Then, the calculation process of TMI was divided into three steps including calculation of potential evapotranspiration, moisture balance and calculating annual value of TMI. Moreover, example was presented to validate calculation procedure of TMI. Finally, values of TMI calculated on the basis of the meteorological data collected from 400 weather stations of China were tabled according to climatic zoning of highway. The results show that TMI can be used as new criterion to classify climatic zoning for highway.

Key words: moisture of subgrade; climate factor; thornthwaite moisture index (TMI); potential evapotranspiration; moisture balance; climatic zoning

路基土的湿度对车辆荷载作用下路基刚度(以回弹模量指标表征)以及路面结构力学响应具有显著影响. 路基湿度状态主要与大气降水和蒸发、地下水位高低、气温等因素有关^[1-3], 归纳起来, 路基湿度主要受气候与地下水位两大因素控制^[4]. 其中, 地下水位可以采用路基相对高度, 即地下水位至路基顶面的距离这一指标表征. 影响路基湿度的气候因素主要有降雨量、蒸发量、空气相对湿度、日照时间等, 同时还与地理位置有关, 如我国西北地区干旱少雨, 而南方地区潮湿多雨. 因此, 需要建立一个指标能够同时表征气候与地理位置的影响. 我国现行规范采用潮湿系数 K 做为二级区划划分标准, 但该指标仅反映降雨量与蒸发量的影响, 而美国现行气候区域划分采用 TMI(thornthwaite moisture index)湿度指数, 即综合湿度指数^[5-6], 该指标包含了各月降雨量及降雨天数、蒸发量、气温、典型土组参数、纬度等因素的影响, 其中既包含了气候因素的影响, 又包含了地理位置的影响, 从而能全面量化一个地区干旱或者潮湿的程度.

本文根据所收集的气象数据, 计算得到我国 400 个气象站点的 TMI 值, 并按公路自然区划进行了归并, 建立了 TMI 指标与路基湿度的定量关系, 为精确预估与控制湿度, 奠定了基础.

1 湿度指数计算流程

湿度指数 TMI 是一个年度指标, 它由全年各月的降雨量、气温和潜在蒸发蒸腾总量等参数, 通过湿

度平衡计算而得. 年度 TMI 值 $I_{\text{TMI}y}$ 由 Thornthwaite 于 1948 年提出,通过式(1)计算得到^[5].

$$I_{\text{TMI}y} = \frac{100R_y - 60F_y}{E_y} \tag{1}$$

式中: R_y 为第 y 年年度径流量,cm; F_y 为第 y 年年度缺水量,cm; E_y 为第 y 年年度蒸发蒸腾总量,cm,上述各值均由各月的值累加获得. TMI 的计算包括以下 3 个主要步骤.

1.1 潜在蒸发蒸腾总量

潜在蒸发蒸腾总量(E)是当土壤蓄水量为无穷大时,通过地表蒸发和植物蒸腾作用,土壤最多能丧失的水分总量. 它是温度(如气温、土壤温度和植物叶片温度等)、空气相对湿度、风速、太阳辐射、土质类型和植被覆盖率等变量的函数. 它可以由月均温度和地理纬度来确定,其具体的计算过程如下^[4,7]:

$$h_i = (0.2t_i)^{1.514} \tag{2}$$

式中: h_i 为第 i 月的热指数; t_i 为第 i 月的平均温

度,℃,当 $t_i < 0$ 时,取 $t_i = 0$.

第 y 年的年度热指数 H_y 为

$$H_y = \sum_{i=1}^{12} h_i \tag{3}$$

若不计不同地区的日照时间差,第 i 月的潜在蒸发蒸腾总量 E_i' 为

$$E_i' = 1.6 \left(\frac{10t_i}{H_y} \right)^\alpha \tag{4}$$

式中: $\alpha = 6.75 \times 10^{-7} H_y^3 - 7.71 \times 10^{-5} H_y^2 + 1.7921 \times 10^{-2} H_y + 0.49239$.

式(4)仅适用于每月 30 d,且日照时间为 12 h 的地区. 为此,需要对上述结果进行日照时间和月天数的修正,即

$$E_i = E_i' \frac{N_i D_i}{30} \tag{5}$$

式中: N_i 为第 i 月的实际天数; D_i 为第 i 月的日照时间修正系数,可参考表 1^[4,7],根据计算地点所处的纬度插值得到对应的修正系数值.

表 1 北半球日照时间修正系数 D_i (每月 30 天,每天日照时间 12 小时)

Tab.1 Modified D_i of the sunshine duration in northern hemisphere(30 days per month, 12 hours a day)

纬度/(°)	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.73	0.70

1.2 湿度平衡

由于土壤具有复杂的多孔隙结构,因而具有一定的储水能力. 它一方面通过大气降水获得水分补充,另一方面通过蒸发蒸腾作用丧失一部分水分. 当降雨量小于蒸发量,此时降水全部蒸发,土壤中原有的水分也将蒸发,当原有水分全部蒸发之后仍有进一步蒸发的趋势,这样就形成湿度不足量,即缺水量(F_i);而当土壤达到最大湿度状态(即饱和含水率状态),多余的降水将以径流的形式流走,一个月产生的径流总量就是该月的径流量(R_i). 因此,土壤湿度是大气降水和蒸发蒸腾总量之间平衡的结果. 图 1 反映的是湿度平衡之后,土壤湿度的 4 种不同状态.

图 1 中, S_i 表示的是土壤月度储水量, i 为某一月份; S_{i-1} 表示的是土壤上月储水量终值,也即本月储水量初值; S_{max} 表示的是土壤最大储水量; P_i 表示的是本月降雨量; E_i 表示的是本月修正后的潜在蒸

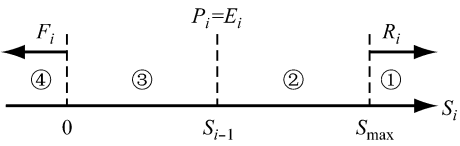


图 1 路基土湿度平衡之后的不同状态
Fig.1 The status of subgrade soils after moisture balance

发蒸腾总量,当 $P_i = E_i$ 时, $S_i = S_{i-1}$,也即本月土壤中既不增加储水也不丧失水分.

图中“①”表示 $P_i > E_i$,土壤吸收(蒸发之后剩余的)降水达到饱和之后,仍然有多余的降水,这些多余的降水以径流的形式流走;“②”表示 $P_i > E_i$,土壤吸收完所有(蒸发之后剩余的)降水之后,仍未饱和;“③”表示 $P_i < E_i$,本月的降水全部蒸发,而且土壤上月储存的水分也蒸发了一部分;“④”表示 $P_i < E_i$,本月的降水全部蒸发,而且土壤上月储存的水份也全

部蒸发,土壤尚有进一步蒸发的趋势。

在这一湿度平衡过程中,月径流量和湿度不足量与土壤的最大储水量 S_{\max} 有关,它取决于土质类型,其值等于饱和状态下的体积含水率 θ_{\max} (或 θ_s) 与降雨影响土层厚度 h 之积。降雨影响深度一般在 0.6 ~ 2.5 m 之间^[8-9],考虑到路面结构的防水、阻水效应,本文参考文献^[4],取路基土层厚度 h 为 1.2 m。

在湿度平衡计算中,还需要确定路基的初始储水量 S_0 ,它与土壤的初始湿度状况有关,其值等于土壤初始体积含水率 θ_0 (在此,取路基土压实施工时的湿度状态为初始湿度状况,且其碾压含水率为土的最佳含水率)与土层厚度 h (1.2 m) 之积。

不同土组饱和体积含水率 θ_s 与初始体积含水率 θ_0 取值如表 2 所示。

表 2 不同土组的特征体积含水率值

Tab.2 Characteristic values of volumetric water content for different soil types

土组	砂	其他砂类土	粉质土	粘质土
θ_s	0.24	0.29	0.33	0.37
θ_0	0.18	0.20	0.28	0.34

根据各月的大气降水和蒸发蒸腾总量,按图 2 所示的计算流程对路基土进行湿度平衡计算,即可获得各月的径流量和湿度不足量,通过累加得到相应的年度值。图 2 中的符号“①~④”,其含义与图 1 相同,表示湿度平衡之后土壤所处的 4 种不同状态。

1.3 年度湿度指数值

通过式(1)可以计算得到年度 TMI 值 I_{TMIy} 。需要说明的是,式(1)假设水分由外界渗入土壤比通过蒸发或植物蒸腾作用离开土壤更容易,因此,在计算 I_{TMIy} 时,年度缺水量 F_y 的扩大因子为 60,而径流量 R_y 为 100。

2 算例

本文以南京气象站点为例,详细介绍 TMI 值计算过程。

表 4 气象站点数据

Tab.4 Meteorological data of weather station in Nanjing, China

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
多年月均温度/℃	2.37	4.21	8.68	15.17	20.46	24.40	27.82	27.45	22.81	17.07	10.42	4.48
多年月均降雨量/cm	3.743	4.707	8.176	7.344	10.207	19.343	18.548	12.922	7.210	6.513	5.083	2.445

3 气候分区条件下湿度指数值归并

本文通过上述计算流程求得全国 400 个气象站

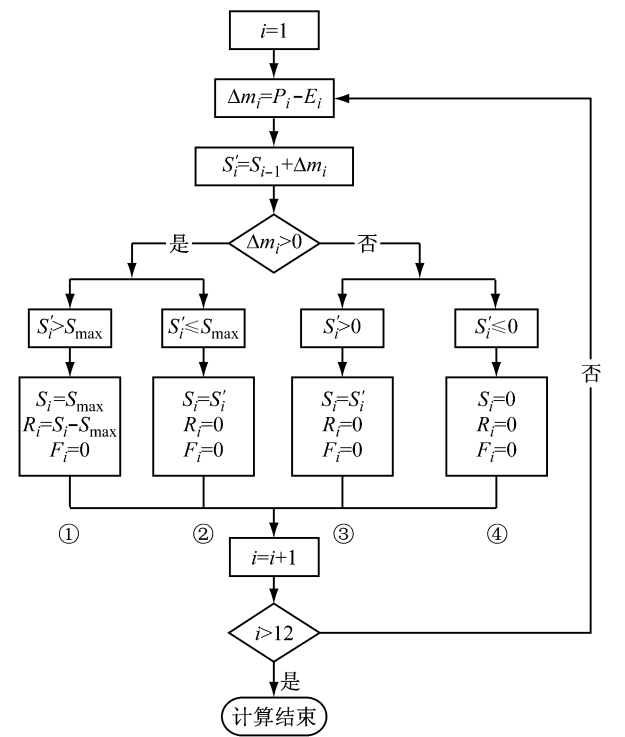


图 2 路基土湿度平衡计算流程

Fig.2 Calculation procedures of moisture balance for subgrade soil

2.1 气象站点数据

气象站点基本信息如表 3 所示。

表 3 气象站点信息

Tab.3 Information of weather station in Nanjing, China

站点编号	东经/(°)	北纬/(°)	站名	土组
58238	118.8	32	南京	粘质土

通过收集气象站点观测数据,整理分析得到 TMI 值计算过程中所需的原始资料,如表 4 所示。

2.2 修正后的各月潜在蒸发蒸腾总量

如前所述,南京气象站点潜在蒸发蒸腾总量计算过程与结果列于表 5 中。

2.3 湿度平衡与年度湿度指数值

湿度平衡与 I_{TMIy} 计算过程与结果列于表 6 中。

点对应的 TMI 值,并按照公路自然区划对 TMI 值进行了归并,得到不同区划、不同土组的 TMI 值范围与均值,如表 7 所示。

需要说明的是,有些区划可能因为某些气象站

TMI 值范围时,剔除了这些 TMI 值异常点.例如,二级区划 V_1 区共有 9 个气象站点,计算得到的各个站点所在地区的 TMI 值如表 8 所示(在此假设路基填土为除砂之外的其他砂类土).从表中可知,该二级区划的 TMI 值范围大致在 $-7.5\sim 0$ 之间,但编号为 57237 的万源站的 TMI 值为 38.73,远远大于区划内的其他站点,究其原因,万源位于大巴山腹地,植被保存完好,水汽丰富充足,因此,该地降雨大大超过附近地区,统计分析此区划的 TMI 值范围时,应剔除万源站的 TMI 值.

表 8 V_1 区 TMI 值计算结果

Tab.8 Calculation results of TMI in climatic zone V_1			
序号	气象站点	站名	TMI 值
1	56096	武都	-7.43
2	57034	武功	-0.80
3	57127	汉中	0
4	57143	商州	0
5	57232	石泉	0
6	57237	万源	38.73
7	57245	安康	0
8	57259	房县	0
9	57265	老河口	0

4 结论

(1) 路基湿度的影响因素众多,迄今为止国际上还没有一种能够精确预估路基湿度的理论或方法,而通过建立路基湿度影响因素表征指标与湿度的定量关系,进而预估湿度不失为一种有效方法,因此,影响因素表征指标选取与取值就成为湿度预估的基础.

(2) 气候是路基湿度主要影响因素,本文引入综合湿度指数 TMI,明确和细化了 TMI 的计算流程和步骤,并给出了具体算例.

(3) 相比潮湿系数 K 而言,TMI 指标反映影响因素更多,更能全面评价一个地区气候、地理状况,可以此作为公路自然区划新标准.

(4) 本文根据收集到的全国 400 个气象站点数据,计算得到各个站点对应的 TMI 值,并按公路自然区划进行归并,得到不同自然区划、不同土组的 TMI 值的范围与均值,使预估不同区划与土组路基湿度成为可能.

参考文献:

[1] 姚祖康. 铺面工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
YAO Zukang. Pavement engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.

[2] Barbour S L, Fredlund D G, Wilson G W. Prediction of moisture movement in highway subgrade soils[C] //Proc. 45th Canadian Geotechnical Conference: Innovation, Conservation, and Rehabilitation. Ottawa:[s. n.] 1996: 41A1-41A13.

[3] Lytton R L, Pufahl D E, Michalak C H, Liang, et al. An integrated model of the climatic effects on pavements[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1993.

[4] Perera Y Y. Moisture equilibria beneath paved areas[D]. Metro Phoenix: Arizona State University, 2003.

[5] Thornthwaite C W. An approach towards a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 8 (1): 55.

[6] Darter M I. Design of zero-maintenance plain jointed concrete pavement-volume 1-development of design procedures[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1997.

[7] By R Gordon McKeen, Lawrence D Johnson. Climate-controlled soil design parameters for mat foundations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(7): 1073.

[8] 李聪. 路堤土降雨入渗响应的模型试验研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(3): 550.
LI Cong. Experimental study on the response of road embankment to rainfall infiltration[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010, 34(3): 550.

[9] 邹维列, 李聪, 汪建峰, 等. 非饱和路堤对加载和降雨入渗响应的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1512.
ZOU Weilie, LI Cong, WANG Jianfeng, et al. Model tests on responses of unsaturated road-embankments to loading and rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1512.