

林带冬季相结构参数及透风系数的算法推导

王志刚, 任 昱

(中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要:从林带结构参数——疏透度 β 、立木表面积疏透度 S' 、立木体积疏透度 V' 、地上生物表面积密度 C 、地上生物体积密度 W 的定义和运算关系出发,推演出冬季相林带结构参数之间、以及它们与林带透风系数 α 、林带宽度 D 、枝条平均直径 d 的相互关系,其表达式为:

$$W = \frac{V'}{D} = \frac{1}{4}dC = \frac{dS'}{4D} = \frac{-\pi d \ln \beta}{4D} = \frac{-0.1\pi d \ln \alpha}{D}$$

该式是对几个主要结构参数之间具有同质性的证明,说明不同结构参数概念具有本质上的继承性和一致性,不存在严格意义上的排他性,在一定条件下是可以换算的,为林带防风效应评价运算提供了方便。导出一组适合我国北方干旱风沙区农田防护林带防风效应评价的运算公式。

关键词:农田防护林;疏透度;立木疏透度;表面积密度;体积密度;透风系数

中图分类号:S727.2

文献标识码:A

Algorithm Derivation of Winter Facies Wind Protection of Shelterbelts Structural Parameters and Wind Permeability Coefficient

WANG Zhi-gang, REN Yu

(The Experimental Center for Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: To solve the problem in the absence of permeability algorithm in China's forestry industry standard "Technical Specification for Oasis Shelter Belt Construction (LY/T 1682—2006)", by defining and calculating the forest structural parameters-porosity β , stumpage surface porosity S' , stumpage volume porosity V' , aboveground surface area density C , aboveground bulk density W , the relations among these structural parameters and their relations with wind permeability coefficient α , shelterbelt width D and mean diameter of branch d were calculated, which is expressed as:

$$W = \frac{V'}{D} = \frac{1}{4}dC = \frac{dS'}{4D} = \frac{-\pi d \ln \beta}{4D} = \frac{-0.1\pi d \ln \alpha}{D}$$

It is proved that the main structural parameters have homogeneity and different structural parameters are of inheritance and consistency on the nature, there is no exclusivity in the strict sense, and is convertible under certain conditions, which is convenient for evaluating the wind-resistance effect of shelterbelt. A set of computational formulas for wind effect evaluation of farmland shelterbelt in dry and sandy area in northern China is derived.

Key words: farmland shelterbelts; porosity; stumpage porosity; surface density; bulk density; wind permeability coefficient

在农田防护林的所有功能中,防风效应是最关键的功能。防护林的结构决定其功能,有关林带结

构和防风效应关系的研究一直受到重视。早期的研究者将林带的结构定性描述为紧密、疏透、通风3种类型及其过渡类型^[1],定量描述使用最早、最多的是疏透度(也称透光疏透度);单纯使用定性描述和脱离定性描述单纯使用疏透度描述林带结构都不够准确,使用类型和疏透度相结合的描述方法较好地解决了林带结构的描述问题。早期的疏透度测定主要依靠目测,误差较大,所得研究结果重复性差;随着数字技术的进步,疏透度的精准测量有了便捷的方法^[2-4]。

评价林带防风效应优劣的重要参数是透风系数。用透风系数评价林带防风效应的优劣是准确稳定的,而用结构类型或疏透度直接评价防风效应则不够稳定,如疏透度相同的疏透结构林带和通风结构林带防风效应有明显的差异,而透风系数相同的疏透结构林带和通风结构林带具有相似的防风效应^[5]。但透风系数的直接测定比较困难,在生产实践上应用受到一定限制。朱廷曜等^[5]从上世纪60年代开始用风洞模拟和野外观测相结合研究疏透度与透风系数的关系,并与国内外同行取得的研究结果对比,经多次实验修正得到了结构较为均一的窄林带疏透度和透风系数具有很好的换算关系,给疏透度赋予了动力学的意义,为利用疏透度进行林带防风效应评价提供了可能,在林带防风效应结构评价方面走出了最有价值的一步。

由于人们长期忽视了疏透度和透风系数运算特征的研究,描述林带结构和防风效应特性最经典、最可靠的参数——透风系数在林带结构设计和实践管理中没有得到充分利用;用最直观易测的结构参数——疏透度来描述林带结构特征的合理性受到怀疑^[6]。从而脱离疏透度提出新的林带结构参数并在新参数基础上建立新的运算方法,如曹新孙等^[1]于1964年提出“立木疏透度”、周士威等^[7]提出“隙高比”、朱廷曜等^[8]提出“林带地上生物体积密度”、Zhou等^[9-10]提出“表面积密度”和“体积密度”,范志平^[11]对北京杨(*Populus × beijingensis* W. Y. Hsu)林带的表面积密度和体积密度做了详细的三维解析。

作者从沙区防护林建设的实际需要出发,认识到以林带结构和防风效应运算指导林带结构设计的重要性^[12]。由林带断空形成的二项式概率推演了基于一定保存率的完整连续林带应有的最佳设计行数^[13];由树体表面积解析入手,利用二项式概率原

理推演出立木疏透度与疏透度的近似换算关系,证明了二者之间的同质性,找到了幼龄期林带冬季相结构设计的简便方法^[14],受到同行认可^[15-16],并在实际工作中得到应用。

我国林业行业标准《绿洲防护林体系建设技术规程(LY/T 1682—2006)》采用透风系数作为评价林带防风效应结构优劣的参数,但未注明透风系数的算法和所对应的季相,降低了规程的可操作性。这说明,在林带防风效应结构和评价参数的算法问题上,学术界并未达成共识;也说明解决这一问题是当前我国农田防护林建设和经营管理之急需。

本文从林带防风效应结构参数——疏透度、立木表面积疏透度、立木体积疏透度、表面积密度、体积密度的定义出发,推演其相互关系;探讨通过结构参数运算取得林带防风效应评价参数——透风系数的适用算法,以满足北方干旱区防护林冬季相结构设计、经营管理的实际工作需要。

1 冬季相林带结构参数和评价参数

1.1 疏透度和透风系数

1.1.1 疏透度 疏透度(或称透光疏透度)的定义是:林带林缘垂直面上透光孔隙的投影面积与该垂直面上林带投影总面积之比。在林带动力效应参数——透风系数 α 通过野外和风洞试验、动能减弱原理^[17]获得最优解的基础上,朱廷曜等^[5]研究得到结构基本均匀的窄林带疏透度 β 与透风系数 α 的近似对应关系

$$\alpha = \beta^{0.4} \quad (1)$$

它的基本含义是疏透度相同的疏透结构林带,透风系数基本相同。使疏透度的应用具有了动力学的含义,简洁明了,得到广泛重视,这是防护林学上最重要、最基础的关系式。

疏透度具有容易被目测的优点。比如疏透度0.35可以近似表述为透光孔隙率为三分之一,一般的基层工作人员(甚至农民)都能够较为准确地理解和把握,这一点对于防护林建设和管理非常重要。

疏透度还具有容易运算的优点。比如将疏透度 β 理解为纵断面上任意一点未被遮挡的概率,今利用二项式概率原理给出林带疏透度 β 与单行疏透度 β_1 、行数 n 的近似关系,推导方法参见文献^[14]。

$$\beta = \beta_1^n \quad (2)$$

这一结果与曹新孙等^[1]利用风障试验取得的对数曲线形式是吻合的,数值差别可能是试验过程中

的视觉误差造成的。若各行的疏透度不同,则林带疏透度为各行疏透度之积;若疏透度在高度上不均匀,则需换算不同高度的透风系数加权平均方可准确估计其防风效应。

朱教君、曾德慧 2001 年发明“透光分层疏透度测定方法”(申请号/专利号:01128255),关文彬等^[4]研究了林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用,较好地解决了基于数字化的林带疏透度精准测算方法,对于克服目测误差缺点有很好的帮助。

1.1.2 透风系数 透风系数 α 为林带背面风缘在林带高度以下的平均风速 u 与未受林带影响的旷野同一高度的平均风速 u_0 之比,即

$$\alpha = u/u_0 \quad (3)$$

透风系数反映的是林带动力效应的特征。透风系数相同的林带,防风效应(及其它效应)基本相同,林带宽度对防风效应影响不大,透风系数因此成为公认的林带防风效应评价参数。基于透风系数的林带动力效应研究起步早、且取得了令人满意的结果。透风系数最大的用途是对疏透度在高度上分布不均匀时,用以分层估计气流量、准确评估林带整体的防风效应。如最常见的下部通风结构林带,若直接将枝下高部分和树冠部分的疏透度按高度加权平均而得到平均疏透度,与合理疏透度值进行比较,会带来较大误差;而将不同高度的疏透度分别换算成透风系数,再按高度加权平均的透风系数与合理透风系数比较,能够得到较准确的评估结果。

1.2 立木疏透度

曹新孙于 1964 年提出了立木疏透度的概念^[1],定义立木疏透度为林带单位纵断面积上所拥有的立木总表面积(本文或称为立木表面积疏透度 S'),认为它能较好地描述林带对气流的阻挡和摩擦作用,较贴切地反映了林带防风效应的机理;同时认为,在通常情况下,林木的表面积与体积成正相关,为计算方便以体积代替表面积(本文或称为立木体积疏透度 V');进而考虑与一般对疏透度的概念理解相反,在应用时采用这一比值的倒数($1/S'$ 或 $1/V'$)。立木疏透度的物理意义可以理解为与气流发生摩擦的树木表面积的大小,忽略了气流与林带发生摩擦作用所走过的路程。

若令 S 代表长度为 L 段林带内的总地上生物量的表面积, H 为平均高,则立木表面积疏透度 S' 可表示为

$$S' = \frac{S}{LH} \quad (4)$$

若令 V 代表长度为 L 段林带内的总地上生物量的体积,则立木体积疏透度 V' 可表示为

$$V' = \frac{V}{LH} \quad (5)$$

王志刚等用二项式概率法推导林带冬季相两个结构参数——曹新孙提出的立木疏透度 S' (立木表面积疏透度)与疏透度 β 之间的近似数值关系,得出

$$S' = -\pi \ln \beta \quad (6)$$

该式是对曹新孙提出的立木疏透度与疏透度具有同质性的证明^[14]。根据生物器官间生长量的相关性,提出利用林带线性密度 N (单位带长拥有株数)设计林带冬季相结构的方法,测算了 6 个常用树种幼龄期的设计参数,可以方便地用于新林带幼龄期的结构设计,弥补了疏透度难以用于设计的实用性缺陷。

将立木疏透度 S' 及其倒数与疏透度的关系列表对照(表 1),发现疏透度 β 在 0.15~0.60 常用范围内,其数值与立木疏透度的倒数 $1/S'$ 惊人的接近,在疏透度合理取值范围 0.2~0.4 范围内几乎相等。按照疏透度的定义,则 β 的取值在 0 至 1 之间, S' 的取值应不小于 1,这时会发现在有意义的区间内几乎都是可以用 $1/S'$ 来代替 β 的。基于此,应当把“在应用时采用这一比值的倒数”的说法看成是曹新孙先生当年做出的科学预言。

表 1 疏透度 β 与立木疏透度 S' 的换算关系

S'	$1/S'$	β
9.41	0.11	0.05
7.23	0.14	0.1
5.96	0.17	0.15
5.06	0.2	0.2
4.36	0.23	0.25
3.78	0.26	0.3
3.3	0.3	0.35
2.88	0.35	0.4
2.51	0.4	0.45
2.18	0.46	0.5
1.88	0.53	0.55
1.6	0.63	0.6
1.35	0.74	0.65
1.12	0.89	0.7
0.9	1.11	0.75
0.7	1.43	0.8
0.51	1.96	0.85
0.33	3.03	0.9
0.16	6.25	0.95

立木疏透度也具有运算简便的特点,今给出林

带立木疏透度 S' 与行数 n 、单行立木疏透度 S'_1 的运算关系为

$$S' = nS'_1 \quad (7)$$

若各行的立木疏透度不同,则林带立木疏透度为各行立木疏透度之和;若立木疏透度在高度上不均匀,则需换算不同高度的透风系数加权平均方可准确估计其防风效应。

立木疏透度用于对现实林带结构合理性的评价则远不如疏透度直观、方便实用,基层人员和农民很难使用,仍应看作是研究、设计人员可以使用的专业术语或中间运算参数。

1.3 地上生物表面积密度和体积密度

朱廷曜等^[8]定义林带地上生物体积密度为林分生长空间内地上生物体积所占比例。认为林带地上生物量的体积密度可直接表示林带的结构特征,是真正意义上的林带结构参数。

若令 V 代表长度为 L 段林带内的总地上生物量的体积, D 为带宽, LD 为该段林带的总面积, H 为平均高,则林带地上生物体积密度 W 可表示为

$$W = \frac{V}{LDH} \quad (8)$$

实际上林带防风效应与林带内的干、枝、叶的表面积密度 C 密切相关,对应于林带地上生物体积密度,则林带地上生物表面积密度 C (林分生长空间内,地上生物表面积所占比例)能够比地上生物体积密度更好地反映林带防风效应的动力学机理。林带地上部分,林木的干、枝、叶,大致均匀的分布于所占空间,上部树梢部位偏小,向下接近根际部分由于修枝则更小,气流流过林带时,与干、枝、叶表面摩擦,产生阻力,林带地上生物量的总表面积越大,则气流受到的阻力也越大,因而气流速度减小越多。若令 S 代表长度为 L 段林带内的总地上生物量的表面积,则林带地上生物表面积密度 C 可表示为

$$C = \frac{S}{LDH} \quad (9)$$

在生产实践中 C 的数据(或 S 的数据)不易求得,也几乎无法精确测量,假设干、枝、叶表面积密度 C 和其体积密度 W 成正比,即 $C/W = R$,并认为比例参数 R 在数值上为一常数,采用体积代替表面积进行运算。 W 值大,则表示林带空间的干、枝、叶的分布茂密; W 值小则表示林带空间内干、枝、叶稀疏。

林带地上生物量密度与林带立木疏透度之间的区别就在于,立木疏透度的概念忽略了林带宽度对防风效应的影响,而林带地上生物量密度将宽度引

入林带结构参数,构成了三维立体的概念。林带地上生物量密度是作者为解决“当林带疏透度相同而林带宽度不同时,其防风效应(及其它效应)并不相同”的问题而提出的全新的概念。在新概念提出的同时,朱廷曜等建立了地上生物体积密度 W 与风速削弱系数 k 之间的拟合方程,给出了3种体积密度的测算方法,推演了体积密度 W 、风速削弱系数 k 、透风系数 a 的换算方法。

2 林带冬季相结构参数之间的相互关系

对照式(9)、式(4)可知,冬季相林带地上生物表面积密度 C 和立木表面积疏透度 S' 的相互关系为

$$C = \frac{S'}{D} \quad (10)$$

将式(6)代入(10)得到冬季相林带地上生物表面积密度 C 与疏透度 β 的关系为

$$C = \frac{-\pi \ln \beta}{D} \quad (11)$$

由式(1)得

$$\ln \beta = 0.4 \ln \alpha \quad (12)$$

将式(12)代入(11)得到冬季相林带地上生物表面积密度 C 与透风系数 a 的关系为

$$C = \frac{-0.4\pi \ln \alpha}{D} \quad (13)$$

对照式(8)、式(5)可知,冬季相林带地上生物体积密度 W 和立木体积疏透度 V' 的相互关系为

$$W = \frac{V'}{D} \quad (14)$$

对于任意一段枝条或树干,其体积 V 可近似表示为

$$V = \frac{1}{4}\pi d^2 h \quad (15)$$

其外表面积可表示为

$$S = \pi dh \quad (16)$$

对照式(15)、(16)得

$$\frac{V}{S} = \frac{\frac{1}{4}\pi d^2 h}{\pi dh} = \frac{1}{4}d \quad (17)$$

由式(17)得

$$V = \frac{1}{4}dS \quad (18)$$

将式(18)代入式(8)得

$$W = \frac{V}{LDH} = \frac{dS}{4LDH} \quad (19)$$

将式(9)代入式(19)得冬季相林带地上生物体积密度 W 与地上生物表面积密度 C 、枝条平均直径 d 的关系为

$$W = \frac{1}{4}dC \quad (20)$$

将式(10)、(6)代入式(20)得

$$W = \frac{1}{4}dC = \frac{dS'}{4D} = \frac{-\pi d \ln \beta}{4D} \quad (21)$$

将式(12)代入式(21)并化简得

$$W = \frac{V'}{D} = \frac{1}{4}dC = \frac{dS'}{4D} = \frac{-\pi d \ln \beta}{4D} = \frac{-0.1\pi d \ln \alpha}{D} \quad (22)$$

式(22)完整地表达了冬季相林带地上生物体积密度 W 和立木体积疏透度 V' 、林带地上生物表面积密度 C 、立木表面积疏透度 S' 、疏透度 β 、透风系数 α 、林带宽度 D 、枝条平均直径 d 的相互关系。是对几个主要林带结构参数之间具有同质性的证明。也说明不同结构参数之间具有内在本质上的继承性和发展性,在一定条件下是可以相互换算和替代的。

3 冬季相林带透风系数的算法及其应用

3.1 冬季相林带透风系数的算法

为便于比较,仍使用朱廷曜原例快杨 (*Populus canadensis* Moench) 林带数据^[8](株距 $L = 1.5$ m、行数 $n = 6$ 行、树高 $H = 12.99$ m、胸径 $d = 13.6$ cm、枝下高 $h_1 = 3$ m、树冠高 $h_2 = 9.99$ m、保存率 57.9%,林带线性密度: $N = 0.579n/L = 0.579 \times 6/1.5 = 0.579 \times 4 = 2.316$ 株·m⁻¹) 计算原林带冬季相透风系数 α , 说明其算法。

3.1.1 立木疏透度 S' 与透风系数 α 的换算关系

由式(1)得 $\ln \alpha = 0.4 \ln \beta$, 将其代入式(6)得 $S' = -2.5\pi \ln \alpha$, 即

$$\alpha = \exp[-S'/(2.5\pi)] \quad (23)$$

3.1.2 枝下高部分透风系数的算法

枝下高部分单株树干表面积近似取值为 $S_1 = \pi d h_1$

则枝下高部分立木疏透度

$$S'_1 = N \frac{S_1}{h_1} = N \frac{\pi d h_1}{h_1} = \pi N d \quad (24)$$

由式(24)、(23)得

$$S'_1 = \pi \times 2.316 \times 0.136 = 0.99, \alpha_1 = 0.882.$$

3.1.3 树冠部分透风系数的算法

由于快杨与二白杨 (*P. gansuensis* C. Wang et

H. L. Yang) 分枝习性基本相同,借用二白杨冬季相(无叶期)单株树冠立木表面积 S_2 与树冠基径 d_0 的关系式^[14]

$$S_2 = 0.0189 d_0^{2.87} \quad (25)$$

(d_0 单位为 cm, S_2 单位为 m²)。根据经验,当胸径 $d = 13.6$ cm 时,3 m 高处的树干直径(树冠基径) $d_0 = 11.6$ cm。

$$S_2 = 0.0189 \times 11.6^{2.87} = 21.45 \text{ m}^2$$

树冠部分立木疏透度

$$S'_2 = N \frac{S_2}{h_2} \quad (26)$$

由式(26)、(23)得

$$S'_2 = 2.316 \times 21.45/9.99 = 4.97, \alpha_2 = 0.531.$$

3.1.4 林带平均透风系数

$$\alpha = (\alpha_1 h_1 + \alpha_2 h_2)/h \quad (27)$$

由式(27)得

$$\alpha = (0.882 \times 3 + 0.531 \times 9.99)/12.99 = 0.612$$

从计算结果看,冬季相林带总的透风系数为 0.612,比使用林带地上生物体积密度计算的夏季相透风系数 0.366 大很多,是比较正常的。枝下高部分没有叶片,透风系数不存在季相变化,按本文算法得到的枝下高部分透风系数为 $\alpha_1 = 0.882$,与使用林带地上生物体积密度计算结果 $\alpha_1 = 0.903$ 相差 0.021,相对误差 2.3%,两种算法不存在很大区别。

3.2 结构调整的算法

若将该 6 行林带伐去一侧的 3 行(或疏伐 1/2),则枝下高部分、树冠部分的立木疏透度均为原林带的一半 $S'_1 = 0.99/2 = 0.50$, $S'_2 = 4.97/2 = 2.49$; 由式(23)、(27)得

$$\alpha_1 = 0.9383, \alpha_2 = 0.7283; \alpha = 0.782$$

用同样算法可以轻松得到各种疏伐强度的预期透风系数供选择使用;也可以假设修枝强度进行类似的运算,供选择参考。

4 冬季相防风效应结构和评价参数运算的应用

4.1 冬季相结构参数运算的应用范围

关于结构参数运算在新绿洲区冬季相防护林结构设计方面的用途,参见文献[13]。对于更新林带的结构参数设计,可按杨树轮伐期 20 年、隔带更新计算,则更新林带需要在造林后 10 年达到合理结构,其方法与新绿洲防护林设计基本相同,区别是新垦绿洲为及早发挥防护效益而很少大强度修枝,而更新造林则为追求木材价值而修枝,在进行结构设

计运算时应充分考虑枝下高部分透风性强的问题,对不同高度的透风系数进行分别计算。进入中龄林、成熟林、过熟林阶段,树木的分枝习性也与幼龄林有了很大的差异,文献[13]给出的树冠表面积拟合方程有较大误差,需要在今后修订补正。但此阶段结构管理使用疏透度判断则很方便,省去了由于脱离现场实际而使用复杂的经验公式运算带来的盲目性,因此不提倡对超过10年的林带进行结构参数运算用于林带结构管理的远程指导。

4.2 冬季相结构参数运算的应用效果

作者依据立木疏透度运算推定新疆杨株距1 m、2行的渠道式窄林带造林5~7年后形成良好结构,观测得到的防风效能数据验证了设计推定,达到了预期效果,平均防风效能达到了54.18%;但立木疏透度数值未达到推定的水平,可能是窄带密植时侧枝发育受抑制和下部修枝的结果,而防风效能较好可能与林网中林带防风效能的叠加有关^[18]。在我国北方干旱区绿洲防护林为减少土地占用,大量使用2行渠道式窄林带;作者曾基于内蒙古阿拉善盟孛井滩农业开发区渠道衬砌的实际和为防火的需要考虑,推荐其使用带间距较小的单行林带网,回访结果也是令人满意的。防风效能的叠加效应文献不多,今后可针对单行、2行密集通风结构林网的防风效应开展专门的系统研究,以适应生产需要。

5 结论

迄今为止,除隙高比外,防护林学界提出的表征林带防风效应结构参数——疏透度、立木疏透度、林带地上生物量密度均具有同质性,是可以近似换算的,不存在相互否定和排斥的鸿沟。可以根据本文推导的运算关系式按实际需要采用最方便的灵活算法。

推荐用于冬季相林带防风效应评价参数——透风系数的计算基于朱廷曜创建的源公式(1)、推演公式(6)、经验公式(25);应用层面推荐使用式(24)、(25)、(26)、(23)、(27)。这一算式序列可以弥补《绿洲防护林体系建设技术规程(LY/T 1682—2006)》中的透风系数算法缺失。

参考文献:

- [1] 曹新孙. 农田防护林体系学[M]. 北京:中国林业出版社,1983:101,107-108,112
- [2] Kenney W A. A method for estimating windbreak porosity using digitized photographic silhouettes[J]. Agric For Meteorol, 1987, 39(1):91-94
- [3] 姜凤岐,徐吉炎,傅梦华,等. 应用数学图像处理法测定林带疏透度. 林带经营技术与理论基础[M]. 北京:中国林业出版社,1992:54-57
- [4] 关文彬,李春平,李世峰,等. 林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用研究[J]. 应用生态学报,2002,13(6):651-657
- [5] 朱廷曜,关德新,周广胜,等. 农田防护林生态工程学[M]. 北京:中国林业出版社,2001:88-89,93-96
- [6] Torita H, Satou H. Relationship between shelter-belt structure and mean wind reduction[J]. Agr Forest Meteorol, 2007, 145: 186-194
- [7] 周士威,程致力,尹洁芬. 林带防风效应的实验[J]. 林业科学,1987, 23(1):11-23
- [8] 朱廷曜,关德新,吴家兵,等. 论林带防风效应结构参数及其应用[J]. 林业科学, 2004,40(4):9-14
- [9] Zhou X H, Brandle J R, Takle E S, et al. Estimation of the three-dimensional aerodynamic structure of a green ash shelterbelt[J]. Agro Forest Meteorol, 2002, 111: 93-108
- [10] Zhou X H, Brandle J R, Takle E S, et al. Relationship of three-dimensional structure to shelterbelt function: A theoretical hypothesis. [M]// Batish D R, Kohli R K, Jose S, et al. Ecological Basis of Agro Forestry[M]. New York: CRC Press, 2008:273-285
- [11] 范志平,高俊刚,曾德慧,等. 杨树防护林带三维结构模型及其参数求解[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(3):327-340
- [12] 王志刚. 乌兰布和沙漠东北部风沙灾害与防护林带参数探讨[J]. 中国沙漠,1995,15(1):79-83
- [13] 王志刚. 林带有断空概率的模拟计算与最佳设计行数的推导[J]. 林业科学,1991,27(2):126-131
- [14] 王志刚,杨东慧. 林带冬季相立木疏透度及其设计方法的研究[J]. 中国沙漠,1998,18(1):87-90
- [15] 马玉明,姚洪林,王林和,等. 风沙运动学[M]. 内蒙古呼和浩特:远方出版社,2004:271-275
- [16] 卢琦. 中国沙情[M]. 北京:开明出版社,2000:127-129
- [17] 傅抱璞. 论林带结构与防护效能[J]. 南京大学学报(气象学), 1963(1-2):109-120
- [18] 赵英铭,王志刚. 磴口绿洲防护林不同配置模式防风效应的试验[J]. 防护林科技,2009(1):10-12