

白桦根系力学特性的定量研究

王萍花, 陈丽华, 冀晓东, 周朔, 吕春娟, 蒋坤云

(北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 选取华北地区白桦(*Betula platyphylla*)为研究对象,以白桦单根拉伸的试验结果作为基础数据,应用方差分析的方法对白桦根系的力学特性进行了定量分析。依据试验设计的准则,选取拉伸速率、根长(标距)和直径这 3 个指标作为影响白桦根系力学特性的影响因素,以最大抗拉力、抗拉强度、弹性模量及极限延伸率这 4 个指标作为反映白桦根系力学特性的响应指标。结果表明,根径对白桦的最大抗拉力、抗拉强度和极限延伸率存在显著影响;根长(标距)、拉伸速率均对弹性模量和极限延伸率存在显著影响。对选取的 4 个反映白桦根系力学特性指标而言,拉伸速率与根长(标距)之间均不存在交互效应。对抗拉强度及最大抗拉力而言,拉伸速率与根径、根长(标距)与根径的交互效应均存在且有显著差异表达。对弹性模量、极限延伸率而言,根长(标距)与根径的交互效应的影响不显著,而拉伸速率与根径的交互作用有显著影响。

关键词: 白桦根系; 力学特性; 方差分析; 交互效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0154-05

中图分类号: S714.7

Mechanical Characteristics of *Betula Platyphylla* Root System

WANG Ping-hua, CHEN Li-hua, JI Xiao-dong, ZHOU Shuo, LÜ Chun-juan, JIANG Kun-yun

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of

Soil and Water Conservation & Desertification Combat of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: The arbor root of *Betula platyphylla* was investigated in North China and the mechanical characteristics of arbor root system were quantitatively researched based on analysis of variance by using the result of root tensile test as basic data. According to the experimental design criteria, three indexes, including rate, root length and diameter, were selected as influence factors reflecting birch root mechanical characteristics. Four indexes, including root tensile resistance, root tensile strength, elastic modulus and limit extensile rate, were selected as responding factors. The results showed that root diameter had significant effects on root tensile resistance, root tensile strength and limit extensile rate, both root length and tensile rate had significant effects on elastic modulus and limit extensile rate. As the four responsive indexes were concerned, there was no interaction between rate of extensile and root length. As for tensile strength and tensile resistance, the interaction between rate of extensile and root diameter, as well as root length and root diameter both existed and had significant expressions at different levels. As elastic modulus and limit extensile rate were concerned, the interaction between root length and root diameter was not significant, while the interaction between rate of extensile and root diameter was significant.

Keywords: *Betula platyphylla* root system; mechanical characteristics; analysis of variance; interaction effect

根系作为植物主要器官之一,在其生长发育和生理活动中,发挥着支撑地上部分、吸收土壤水分和养分、储存物质和能量等功能。林木根系一个很主要的

生态功能就是固持土体,它包括增强土壤抗冲能力,防止面蚀,稳定斜坡,防止重力侵蚀和防止河岸、库岸被冲淘等作用。自 20 世纪 90 年代以来,植物根系固

收稿日期: 2010-12-09

修回日期: 2011-02-26

资助项目: 中国教育部博士基金“林木根系拉伸特性的试验研究”(20090014110002); 国家自然科学基金项目“林木根系基本力学性能研究”(30872067); 国家自然科学基金青年基金项目“林木根系与土壤摩擦锚固性能研究”(30901162)

作者简介: 王萍花(1988—),女(汉族),湖南省浏阳市人,硕士研究生,研究方向为林木根系固土、水土保持。E-mail: wangpinghua319@yahoo.com.cn.

通信作者: 陈丽华(1957—),女(汉族),北京市人,教授,博士生导师,研究方向为流域治理、森林水文、城镇规划等。E-mail: c_lhua@bjfu.edu.cn.

土成为多学科交叉研究的热点问题,受到广泛关注^[4]。考虑植物根系固土能力时,通常情况下植物根系的抗张或抗拉力的作用的概率比受剪切力作用的概率要大,因为根系与土壤在共同附力作用下形成活性有机体,土壤在侵蚀条件下根系受到的剪切压力会变形拉直从而转为拉力的作用。因此根系的抗拉强度是直接代表根系抗外力的有效指标^[1]。所以,使用力学拉伸方法测定植物根系的抗拉强度,对进一步揭示植物提高土壤抗蚀性与抗剪强度的机理、合理选择和配置生态护坡植物具有重要意义^[5]。本研究选取河北围场林场常见的乔木——白桦(*Betula platyphylla*),对其进行拉伸试验,研究其在受拉情况下的力学特性,并在方差分析的基础上,对可能影响白桦根系力学特性的因素及其特性指标之间的作用机理进行定量分析。旨在为根系固土力学机制研究提供基础数据,为定量分析根系抗拉力学特性提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究区为河北木兰围营林场上属的北沟林场,地理坐标为 $116^{\circ}32' - 118^{\circ}14' E$, $41^{\circ}35' - 42^{\circ}40' N$ 。该区气候类型属半干旱向半湿润过渡、寒温带向中温带过渡的大陆性季风型山地气候,植物区系为东北区系。试验选择白桦为研究对象。于2009年8月19—20日第1次取林龄为20 a白桦单株的全部0~8 mm单根做为试验材料;2009年10月23—24日第2次取林龄为17 a白桦单株的全部0~8 mm单根做为试验材料。

树木根系取样时,选取林相整齐场所中与周围间隔较大的树木,伐倒地上部分,切下圆盘,数年轮测出树龄。地下部分采用完全挖掘法,完全挖出所有树根,经破碎过筛、挑拣活根之后,用游标卡尺逐一测量、分级。将取好的根样用密封袋保存,送往试验室冷藏保存在冰箱4℃环境下。取得的试样尽量在2个月内进行试验。白桦根系均为主直根系,根系强大,入土较深。

1.2 单根抗拉试验

采用的是微机控制电子式万能试验机,型号WDW-100E。试验力测量范围400~100 kN,全程自动换挡,速度范围0.001~500 mm/min,无级调速,试验力及位移准确度 $\pm 0.5\%$ 。

试验时选取表皮完好无损,直径变化不大的根系,在根系上作3个标记,分为4个部分(根径取: < 2.0 , $2.0 \sim 3.5$, $3.6 \sim 5.0$, > 5.0 mm共4个水平),用游标卡尺依次测量3个点处直径,然后取其平均值作为该根直径纪录,试验根系定为3个标距:50, 100

和250 mm,以10和400 mm/min这2种速度匀速拉伸树根直至完全拉断。具体试验设计表如下表1所示。10 mm/min拉伸速率下根系总在最细处断裂,断裂面参差不齐,并且有明显颈缩,属于弹性断裂。

根据力学试验理论,根系在受力时,可能由于被夹具夹断而断裂,所以在试验过程中,认为根系断裂处明显远离夹具时的试验为成功试验,数据有效。需要注意的是,当直径大于4 mm以上时,根系往往会由于抗拉强度过大而在夹具处断裂或者从夹具滑出,致使试验失败,所以夹具的改造与加工就成为试验的一个重要环节,本试验使用变口径钢制夹具,直径范围可在0~14 mm调节,以适应不同直径段的根系。本试验共拉伸白桦根系743根,其中有效根系441根,成功率59.4%,其中10 mm/min速率拉伸根系656根,成功357根,成功率54.4%;400 mm/min速率拉伸根系87根,成功84根,成功率96.6%。

1.3 指标选取

考虑3个影响因子,分别为:拉伸速率(G_1)、根长(标距)(G_2)以及根径(G_3)。 G_1 因子取2个水平, $G_1 = 1, 2$ 分别表示拉伸速率为10和400 mm/min。 G_2 因子取3个水平, $G_2 = 1, 2, 3$ 分别表示标距为50, 100, 250 mm。 G_3 因子取4个水平, $G_3 = 1, 2, 3, 4$ 分别表示根径小于2.0, 2.0~3.5, 3.6~5.0和5.0 mm以上。在各因子水平下,进行单根抗拉试验,并测定记录其4个响应指标: $X_1 =$ 最大抗拉力, $X_2 =$ 抗拉强度, $X_3 =$ 弹性模量, $X_4 =$ 极限延伸率。最大抗拉力即单根被拉断时所承受的最大拉力;抗拉强度即单位面积上单根所承受的抗拉力;弹性模量 E ,即材料在弹性范围内拉伸应力与相应拉伸应变之比,材料的弹性模量表征了材料抵抗弹性变形的能力;极限延伸率即单根纵向应变,单根抗拉试验中的纵向形变与单根标距之比。

2 结果与分析

2.1 根系力学特性影响因子的单因素多元方差分析

2.1.1 拉伸速率 选择400和10 mm/min这2种速率拉伸根系,白桦根系在10 mm/min大多是弹性断裂,但在400 mm/min下大多为脆性断裂,断口平滑,且断裂处颈缩不明显,根系的弹性变形没有完全进行后就进入了塑性变形,力学性能没有完全释放,使得抗拉力和抗拉强度都有所降低,说明拉伸速率对根系力学性质的有影响。为定量分析拉伸速率对根系力学性质的4项响应指标影响是否显著,对试验结果进行了多元方差分析(表1)。由表1可知,弹性模量、极限延伸率均与拉伸速率在0.05水平上有极显

著差异。但最大抗拉力、抗拉强度在不同拉伸速率上的差异不能通过 0.05 的显著水平检验,说明拉伸速率的变化对抗拉强度及最大抗拉力的影响效果不明显。所以,当土体发生滑坡时,滑动速度的变化将使根系的弹性模量、极限延伸率发生显著变化,从而造成破坏性。

2.1.2 根长(标距) 根系的外在形态直接影响根系的抗拉特性。本试验选择了 3 种标距进行根系拉伸,为 50, 100 和 250 mm, 分别代表不同根系长度。为定量探讨白桦根系的长短对其力学特性的影响显著与否,对试验结果进行多元方差分析(表 1)。从表 1 可以看出,弹性模量、极限延伸率均与根长(标距)在 0.05 水平上有极显著差异,且弹性模量与标距成正相关关系。抗拉强度、最大抗拉力在不同根长(标距)上的差异不能通过 0.05 水平的检验,不具有显著差异,说明根长(标距)的变化对最大抗拉力和抗拉强度的影响效果不明显。

2.1.3 根径 根据表 1 可以分析根系粗细程度对其抗拉特性的影响,由表 1 可以看出,最大抗拉力、抗拉强度均与根径在 0.05 水平上有极显著差异。且最大抗拉力与根径成正相关关系;而抗拉强度与根径成负相关关系。极限延伸率与根径的差异通过 0.05 水平的检验,具有显著差异。但弹性模量与根径差异不显著,可能的原因是抗拉强度与应变随根径变化的差异程度同步。

表 1 拉伸速率、根长(标距)和根径的多元方差分析结果

变异来源	因变量	F 值	p	调整 R ²
G ₁	X ₁	5.990	0.051	0.13
	X ₂	0.837	0.361	0.18
	X ₃	31.872	0	0.77
	X ₄	26.813	0	0.65
G ₂	X ₁	2.009	0.136	0.05
	X ₂	3.443	0.053	0.13
	X ₃	19.350	0	0.90
	X ₄	44.308	0	0.90
G ₃	X ₁	291.565	0	0.703
	X ₂	11.467	0	0.780
	X ₃	0.142	0.935	0.170
	X ₄	4.544	0.004	0.600

2.2 具有交互效应的一元双因子固定效应模型

单因素分析只能给出根系力学特性与某个因素的关系,不能给出与其中两个或两个以上因素的关系。实际上,以上各因素是同时作用的,建立交互效

应的一元双因子固定效应模型来考察 3 个影响因子:拉伸速率(G_1)、根长(标距)(G_2)和根径(G_3)的交互作用的影响,即 G_1 拉伸速率与 G_2 根长(标距)的交互作用, G_1 拉伸速率与 G_3 根径的交互作用, G_2 根长(标距)与 G_3 根径的交互作用。

在某种特定情形下,试验条件代表了单个处理的水平。试验测量值是在 3 个因子的不同水平上获得的。显然,在试验条件的各种组合下得出的观测值(即 4 个响应指标)是相互独立的。

设两组试验条件分别为因子 1 和因子 2 的两组水平。假设因子 1 有 a 个水平,因子 2 有 b 个水平,共有 ab 个水平组合,对每个水平组合可测得 n 个独立观测值。用 X_{lkr} 表示在因子 1 的水平 l , 因子 2 的水平 k 下得出的第 r 个观测值。此时一元双因子模型为:

$$X_{lkr} = \mu + \tau_l + \beta_k + \gamma_{lk} + l_{kr} \quad (1)$$

$$(l = 1, 2, \dots, a; k = 1, 2, \dots, b; r = 1, 2, \dots, n)$$

其中, $\sum_{l=1}^a \tau_l = \sum_{k=1}^b \beta_k = \sum_{l=1}^a \sum_{k=1}^b \gamma_{lk} = \sum_{k=1}^b \sum_{l=1}^a \gamma_{lk} = 0$, 且 $l_{kr} \sim N(0, \sigma^2)$ 。

式中: μ ——总水平; τ_l ——因子 1 的效应; β_k ——因子 2 的效应; γ_{lk} ——因子 1 和因子 2 的交互效应。因子 1 的第 l 水平和因子 2 的第 k 水平的期望响应为

$$E(X_{lkr}) = \mu + \tau_l + \beta_k + \gamma_{lk} + l_{kr} \quad (2)$$

$$(l = 1, 2, \dots, g; k = 1, 2, \dots, b)$$

平均响应= 总水平+ 因子 1 的效应+ 因子 2 的效应+ 因子 1 和因子 2 的交互效应交互效应 γ_{lk} 的存在意味着因子效应是不可加的,而且使结果的解释复杂化。

2.2.1 抗拉强度 根系抗拉强度是控制土壤稳定的最重要的因素之一。根据试验所得到的相关数据,如根系直径、最大抗拉力,计算根段的抗拉强度。根段的抗拉强度计算公式为

$$P = 4F/\pi D^2$$

式中: P ——根系抗拉强度(MPa); F ——最大抗拉力(N); D ——根系平均直径(mm),因为测定根系在拉伸过程中其截面积及其变化存在一定困难,故采用 Lagrange 的定义,认为直径为根系加载前的直径。

上述研究讨论了根系抗拉强度与根径、根长、拉伸速率等因素的关系,这实际上是单因素分析。引入具有交互效应的双因子固定效应模型,对 3 个因子及其交互作用对抗拉强度的影响进行方差分析。表 2 给出了 3 个因素及其交互作用对根系抗拉强度、最大抗拉力、弹性模量以及极限延伸率 4 个力学特性指标

影响的方差分析结果。由表2可以看出,在考虑对抗拉强度的影响时,拉伸速率和根长(标距)无交互作用。拉伸速率和标距的单个因素对抗拉强度的影响在0.05水平上也无显著差异,这与表1的分析结果一致。直径对抗拉强度在0.05水平上有显著差异。拉伸速率与根径、根长与根径均存在交互效应,且差异显著。说明拉伸速率与根径、根长与根径同时作用,且对抗拉强度有显著影响。

表2 3个因素及其交互作用对根系的4个力学指标特性影响的方差分析结果

力学指标	变异来源	自由度	F值	R ²	校正 R ²
抗拉强度	G ₁	1	0.058	0.880	0.861
	G ₂	2	3.015		
	G ₃	3	6.989**		
	G ₁ -G ₂	0	—		
	G ₁ -G ₃	3	1.944**		
	G ₂ -G ₃	6	1.139*		
最大抗拉力	G ₁	1	2.077	0.926	0.918
	G ₂	2	0.074		
	G ₃	3	43.120**		
	G ₁ -G ₂	0	—		
	G ₁ -G ₃	3	3.612**		
	G ₂ -G ₃	6	4.039**		
弹性模量	G ₁	1	4.878**	0.900	0.869
	G ₂	2	5.654*		
	G ₃	3	0.296		
	G ₁ -G ₂	0	—		
	G ₁ -G ₃	3	1.115**		
	G ₂ -G ₃	6	0.533		
极限延伸率	G ₁	1	5.427**	0.880	0.860
	G ₂	2	28.828**		
	G ₃	3	4.178**		
	G ₁ -G ₂	0	—		
	G ₁ -G ₃	3	2.661*		
	G ₂ -G ₃	6	1.327		

注:*表示在0.05的水平上差异显著,**表示在0.01的水平上差异显著;自由度为0,无F值,用“—”表示,意味着不存在交互作用。

2.2.2 最大抗拉力 根系的最大抗拉力与根径呈幂函数关系,不同树种二者的函数关系不同。考虑双因子的交互效应,建立关于最大抗拉力的双因子固定效应模型,计算并分析3个因子及其交互作用对最大抗拉力的影响。从表2可知,在考虑对最大抗拉力的影响时,拉伸速率和根长(标距)无交互作用。根长、拉伸速率单个因素对抗拉强度的影响在0.05水平上

也无显著差异,这与表1的分析结果一致。直径对抗拉强度在0.05水平上有显著差异。拉伸速率与根径、根长与根径均存在交互效应,且差异显著。说明拉伸速率与根径、根长与根径同时作用,且对最大抗拉力有显著影响。

2.2.3 弹性模量 弹性模量E,即材料在弹性范围内拉伸应力与相应拉伸应变之比,材料的弹性模量表征了材料抵抗弹性变形的能力。一般而言,落叶松根系弹性极限为抗拉强度极限的50%到70%^[5],所以本试验弹性模量取45%和25%极限应力时的抗拉割线模量。

从表2可知,在考虑对弹性模量的影响时,拉伸速率和根长(标距)无交互作用。根径单个因素对弹性模量的影响在0.05水平上也无显著差异,这与表1的分析结果一致。其余单个因素对抗拉强度均在0.05水平上有显著差异。拉伸速率与根径、根长与根径均存在交互效应,拉伸速率与根径的交互作用在0.05水平上有显著差异,但根长与根径的交互作用在该水平上无显著差异。说明拉伸速率与根径有交互作用,对弹性模量有显著影响;但根长与根径的交互作用对弹性模量无显著影响。根径的增加使得根长对弹性模量的影响幅度无显著变化,根长的增加使得根长对弹性模量的影响幅度亦无明显变化,这与方差分析的结果一致。

2.2.4 极限延伸率 纵向应变即延伸率。植物根系的形变决定了单根受外力时的整体应变状态,所以极限延伸率(极限应变)可以表现根系抵抗土体滑坡的能力。因为当土体间出现滑坡裂缝时,根系的极限延伸率较大时有利于把根系所受的拉力向土体深层传递,同时在根系伸长系数较大的情况下在受拉过程中根系的形变量较大有利于对土壤下滑力进行缓冲,这些都有利于提高根系固土能力。从表2可看出,在考虑对极限延伸率的影响时,拉伸速率和根长(标距)无交互作用。拉伸速率、根径及根长单个因素对极限延伸率均在0.05水平上有显著差异,这与表1的分析结果一致。拉伸速率与根径、根长与根径均存在交互效应,拉伸速率与根径的交互作用在0.05水平上有显著差异,但根长与根径的交互作用在该水平上无显著差异。说明拉伸速率与根径有交互作用,且对极限延伸率有显著影响;而根长与根径的交互作用对极限延伸率无显著影响。

3 结论

(1) 仅考虑单因子作用时,弹性模量及极限延伸率均在拉伸速率的两个水平和根长(标距)的3个水

平上分别有显著差异表达,但抗拉强度和最大抗拉力在拉伸速率的两个水平及根长(标距)的 3 个水平上差异表达不显著,未通过 0.05 水平的 P 检验。最大抗拉力、抗拉强度及极限延伸率在根径的 4 个水平上存在显著差异表达,但弹性模量在根径的 4 个水平上差异表达不显著。

(2) 考虑双因子的交互效应,对选取的 4 个反映白桦根系力学特性指标而言,拉伸速率与根长(标距)之间均不存在交互效应。对抗拉强度及最大抗拉力而言,拉伸速率与根径、根长(标距)与根径的交互效应均存在且有显著差异表达。根长(标距)与根径的交互效应对弹性模量、极限延伸率的影响均不显著,未通过 0.05 水平的 P 检验。拉伸速率与根径的交互作用对弹性模量、极限延伸率均有显著影响。

(3) 用方差分析对单因子模型进行假设检验,只能回答因子不同水平的效应之间是否存在显著差异。若通过检验,即因子不同水平的主效应之间存在显著差异,为进一步了解这种差异的具体模式,应该对该因子进行多重比较。因此,从本研究得出的结论中,对通过检验的单因子模型,可进一步进行多重比较,分析该单因子的哪一水平下对响应变量的影响最为显著。

(4) 考虑交互效应的一元双因子固定效应模型的假设检验,只能回答因子之间是否存在交互效应以及交互效应是否显著。若通过检验,可以进一步对其进行简单效应分析,分析这种交互作用差异表达的具体模式。

[参 考 文 献]

- [1] Roering J J, Stock J D, Schmidt K M, et al. Shallow-landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40: 237-253.
- [2] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area of forest species in Lombardy (Northern Italy)[J]. Plant Soil, 2006, 278: 11-22.
- [3] Norris J E. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England[J]. Plant Soil, 2005, 278: 43-54.
- [4] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [5] 刘国彬,蒋定生,朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28.
- [6] 宋维峰,王希群. 林木根系研究综述[J]. 西南林学院学报, 2007, 27(5): 8-13.
- [7] 程洪,谢涛,唐春,等. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 97-102.
- [8] 谢春华,关文彬,张东升,等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 76-79.
- [9] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2051-2057.
- [10] 程洪,张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [11] 程洪,颜传盛,李建庆,等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.

(上接第 153 页)

[参 考 文 献]

- [1] 张维理,冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策②. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [2] 杨正礼. 中国农田污染评价与防治道路探究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(9): 415-419.
- [3] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 81-84.
- [4] 宋涛,成杰民,李彦,等. 农业面源污染防控研究进展[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 40-42.
- [5] 申玉熙,王维岗. 新疆农业面源污染与控制[J]. 新疆农业科技, 2006, 6(S): 34-35.
- [6] 弥艳,常顺利,师庆东,等. 农业面源污染对丰水期艾比湖流域水环境的影响[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 278-283.
- [7] 申玉熙,王维岗. 新疆农业生态环境面临的问题与保护措施[J]. 新疆环境保护, 2004, 26(S): 75-78.
- [8] 杨光华,包安明,陈曦,等. 1998—2007 年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 436-444.
- [9] 李海鹏,张俊飏. 中国农业面源污染的区域分异研究[J]. 环境保护, 2009, 4(12): 43-45.
- [10] Heinz I, Bmuwer F, Label T. Interrelationships between voluntary proaches and mandatory regulations in the EU to control diffuse water pollutions caused by agriculture[C]. Netherlands: Proceedings of 6th International Conference in Diffuse Pollution, 2002.
- [11] 孜来汗·达吾提,努尔巴依·阿布都沙力克. 新疆水土流失时空分布规律性研究与防治对策[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(3): 600-606.
- [12] 王立洪. 新疆水土流失的成因分析与防治措施的探讨[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 165-170.
- [13] 焦锋,张晓萍,赵永安,等. 新疆水土保持与可持续发展研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(5): 54-56.