

马铃薯仿生挖掘铲片的设计与仿真

石林榕, 孙 伟, 王 蒂, 赵武云, 刘全威, 张 华, 吴建民

(甘肃农业大学 工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 据蝼蛄前足胫节爪趾第 1 趾的体视显微镜照片设计了马铃薯挖掘机挖掘铲片, 为马铃薯挖掘机提供了一种减阻效率较高的挖掘铲。应用 AutoCAD 软件获取爪趾外侧曲线和内侧曲线的轮廓点, 并将点坐标值数据使用 LIST 命令导出, 并借助 EXCEL 软件多项式拟合法对爪趾的侧面轮廓线进行拟合, 在拟合多项式的基础上在 Solidworks 软件中进行仿生铲片的建模, 最后应用 LS-DYNA 软件仿真模拟普通铲片与仿生铲片挖掘土壤的过程, 并测定两种铲片的土壤阻力。仿真结果表明, 仿生铲片较普通铲片土壤阻力减小近 61%。所设计的仿生挖掘铲片为马铃薯挖掘机挖掘铲减阻技术要求提供了一种解决思路, 且结构新颖。

关键词: 马铃薯挖掘机; 仿生学; 挖掘铲; LS-DYNS; 减阻

中图分类号: S255.7+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0268-05

Design and simulation research on the potato bionic digging shovel

SHI Lin-rong, SUN Wei, WANG Di, ZHAO Wu-yun, LIU Quan-wei, ZHANG Hua, WU Jian-ming

(College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to provide a digging shovel with higher efficiency of drag reduction, a shovel was designed out for potato digger according to the stereomicroscope photo about first claw toe of Gryllotalpa hind tibia. The contour point of claw toe outward curve and inward curve were obtained using AutoCAD software, point coordinate values were leading-out by the commands of LIST. The claw toe contour was fitted with the help of Excel software. The model of bionic shovel was established by the Solidworks software. The process of cutting soil with ordinary shovel and bionic shovel were simulated by the Ls - Dyna software and measured the soil resistance for these two shovels. The simulation results showed that soil resistance was reduced approximately 61% by the bionic shovel compared with the normal shovel. The design can be supplied a solution thinking for the drag reduction technical requirements of the potato digger with a novel structure.

Keywords: potato digger; bionics; dig shovel; LS - DYNS; drag reduction

马铃薯挖掘铲的功用在于掘出薯块, 并将其输送给分离装置。挖掘铲基本设计要求为作业时既要掘出土层中的绝大部分马铃薯, 又要尽量减轻分离装置负担和降低能量消耗。同时还要防止挖掘铲上缠草和拥土, 并能顺利地把掘出物输送到分离装置^[1]。

挖掘铲是马铃薯挖掘机上的重要部件, 其性能直接影响着马铃薯挖掘机整体挖掘性能, 减小挖掘铲切削阻力可有效提高马铃薯挖掘机的挖掘效率。本文基于工程仿生学理论从土壤动物挖掘土壤中获取启发^[2], 对马铃薯挖掘机挖掘铲触土部件进行仿生改形设计, 进而提高其减阻性能, 是一种新的研究

途径。模仿田鼠爪趾弯曲轮廓形状设计的仿生弯曲线型深松部件减阻效果明显^[3-4]。蝼蛄是一种土栖昆虫, 具有高超的挖掘能力。作为主要触土部件, 其爪趾在构形与形态方面处于最优化状态, 可将切削土壤时的阻力减至最小^[5]。本文应用逆向工程方法, 提取蝼蛄胫节上第一趾的侧面曲线信息, 设计出马铃薯挖掘机仿生铲片。

1 马铃薯仿生挖掘铲片的设计

1.1 蝼蛄爪趾第一趾仿生信息的获取

如图 1 所示, 蝼蛄, 土栖, 触角短于体长, 前足开掘式。俗名拉拉蛄、土狗。全世界约 50 种。中国已

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 甘肃省重大专项(1102NKDM025); 国家科技支撑计划课题(2012BAD06B03)

作者简介: 石林榕(1983—), 男, 甘肃西和人, 在读硕士, 主要从事农机具研发。E-mail: getmao@qq.com。

通信作者: 吴建民(1958—), 甘肃定西人, 教授, 博导, 主要从事机械化保护性耕作技术研究与机具研发工作。E-mail: wujm@gsau.edu.cn。

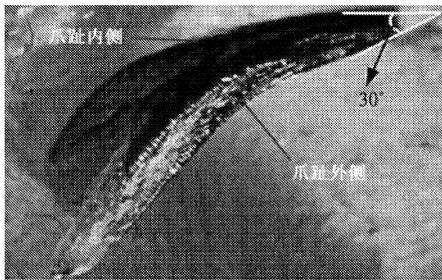
知 4 种:华北蝼蛄、非洲蝼蛄、欧洲蝼蛄和台湾蝼蛄。其中非洲蝼蛄为东方蝼蛄 (*Gryllotalpa orientalis burmeistr*),遍及全国,一般在长江以南东方蝼蛄较多,其主要生活于地下 15 ~ 20 cm 土层。东方蝼蛄前足爪趾正向上形状似铲,其构形适于土中挖掘,侧向上形成具有一定弧度的曲面,如图 2a。蝼蛄爪趾尖端为四方楔形,正、侧两面的楔角均为 30°左右,如图 2a 和 2b。楔形不仅能分散对土壤压力和最大程度地减少触土面积,还可减小爪趾挖掘时与土壤间的摩擦力和土壤粘附力。研究显示,蝼蛄的爪趾顶端形状与土体形状接近,这种构形有利于缓释应力集中,增加爪趾的机械强度,易于脱附,还可提高耐磨性^[5]。据生物进化和仿生耦合理论可知蝼蛄爪趾

必然具有优化的构形,能最大限度地减小楔入土壤时的阻力。

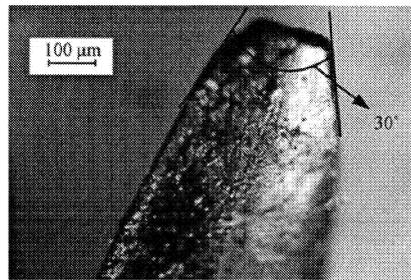


图 1 东方蝼蛄

Fig. 1 *Gryllotalpa orientalis burmeistr*



(a)侧面
Lateral fore claw



(b)尖部端面
End face of fore claw

图 2 蝼蛄前足爪趾

Fig. 2 Fore claws of gryllotalpa

1.2 蝼蛄爪趾侧面轮廓线拟合

为方便仿生技术在农业机械中的应用,本文仅获取蝼蛄爪趾第一趾的侧面轮廓线。蝼蛄爪趾基本沿身体轴线 45°的方向指向身体外侧,故规定图 2 (a)中蝼蛄前足爪趾尖部上侧为爪趾内侧,下侧曲线为爪趾外侧。

1.2.1 蝼蛄爪趾侧面轮廓线样条点获取 将蝼蛄前足胫节爪趾第 1 趾的体视显微镜照片以光栅图像的形式导入 AutoCAD2004 软件中,调整图片左下角与坐标(0,0)点对齐,使用样条曲线命令描绘爪趾第 1 趾的内外侧轮廓,图 3 中描边曲线为轮廓描绘样条曲线。使用“LIST”命令将轮廓描绘样条曲线数据导出,导出的数据如表 1 所示。

1.2.2 侧面轮廓线的拟合 将轮廓点数据导入到 EXCEL 软件,式(1)和式(2)分别为蝼蛄爪趾的内外侧曲线进行 2 次项拟合的方程表达式,拟合度分别为 0.9832 和 0.9975。拟合后的曲线如图 4 所示。

$$y = -0.0044x^2 + 0.9633x + 48.002 \quad R^2 = 0.9832 \quad (1)$$

$$y = -0.0057x^2 + 1.6547x - 30.531 \quad R^2 = 0.9975 \quad (2)$$

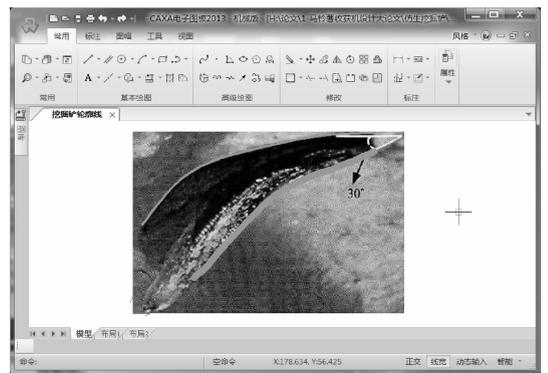


图 3 轮廓描绘界面

Fig. 3 Interface of contour-tracing

1.3 仿生挖掘铲片模型的建立

为对比普通铲片和仿生铲片切削土壤时的阻力,应用 Solidworks 软件对两种挖掘铲片进行建模。仿生铲片入土端两边仿蝼蛄趾尖部端部倒 30°角,为加强仿生铲片与挖掘机连接强度,模型后端设计有 3 个六角头螺钉的柱形沉头孔。仿生铲片如图 5a 所示,普通铲片如图 5b 所示。

表 1 侧面轮廓数据点坐标值
Table 1 Coordinate values of contour data

坐标 Coordinate	内侧曲线轨迹点 Inside contour data							
	1	2	3	4	5	6	7	8
x	5.1967	7.7576	11.5926	15.6141	21.3417	31.0468	42.3849	54.7951
y	49.3204	52.699	57.8614	63.098	69.8569	77.9448	83.6733	87.8005
坐标 Coordinate	内侧曲线轨迹点 Inside contour data							
	9	10	11	12	13	14	15	16
x	67.8319	82.3867	96.9134	110.0127	121.331	128.7179	132.3098	96.9134
y	91.3251	94.4617	97.7308	98.981	99.8684	99.927	99.9555	97.7308
坐标 Coordinate	外侧曲线轨迹点 Outside contour data							
	1	2	3	4	5	6	7	8
x	33.7675	36.6425	41.9568	48.4016	55.6805	63.1309	70.9551	79.0440
y	19.9378	22.4081	26.9742	35.6805	43.3064	51.2997	59.4461	66.3783
坐标 Coordinate	外侧曲线轨迹点 Outside contour data							
	9	10	11	12	13	14	15	16
x	88.2022	97.5983	107.3011	116.3335	124.287	129.7494	132.1949	88.2022
y	71.5261	76.3139	78.9244	82.959	85.8077	88.5618	89.7948	71.5261

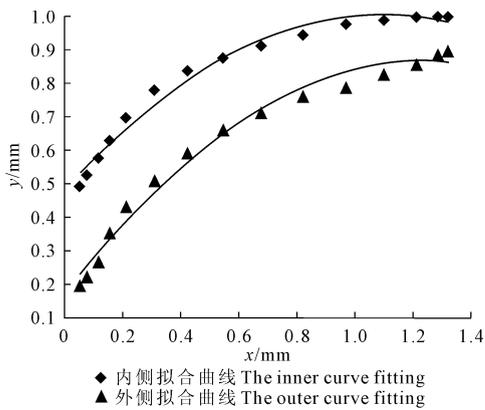


图 4 侧面轮廓线的拟合曲线

Fig.4 Curve fitting of contour-tracing point

2 仿生挖掘铲片切削土壤仿真

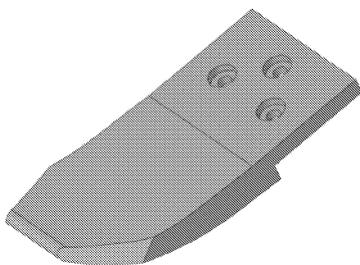
为对比分析仿生铲片与普通铲片在土壤介质中

的切削阻力。应用非线性有限元软件 LS-DYNA 对两种挖掘铲片模型进行土壤切削阻力数值模拟。土壤材料模型采用 MAT147^[6]并结合 SPH 理论,仿真获取相关的力学分析数据,揭示整个挖掘铲片切削土壤的物理过程。

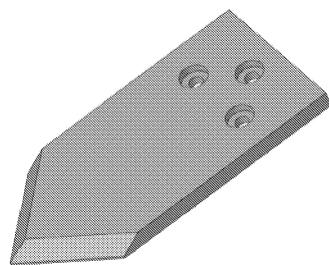
2.1 SPH 及土壤参数确定

SPH(Smoothed particle hydrodynamics)称为光滑粒子方法,是流体动力学算法的一种无网格 Lagrange 算法,可解决连续体结构的解体、碎裂、固体的层裂、脆性断裂等。是一种非常简单方便的解决动力学问题的研究方法。由于它是无网格的,它可以用于研究很大的不规则结构^[7]。

该数值模拟中,选用 LS-DYNA 软件提供的 MAT147 土壤材料模型。其采用了修正的 Mohr-Coulomb 的屈服准则^[8]。其表达式为:



(a) 仿生铲片 Bionic shovel



(b) 普通铲片 Nomal shovel

图 5 两种铲片三维模型

Fig.5 3D mode of 2 kinds of shovel

$$F = -P \sin \varphi + \sqrt{J_2 K(\theta)^2 + \gamma^2 \sin^2 \varphi} - c \cos \varphi \quad (3)$$

式中, P 为压力(N); φ 为内摩擦角($^\circ$); J_2 为应力偏张量的第二不变量; K 为应力罗德角函数; c 为黏聚力(N); γ 为定义修正后屈服面和标准 Mohr - Coulomb 屈服面之间贴合度的参数。当 γ 等于 0 时, 式(3) 为标准 Mohr - Coulomb 准则。

数值模拟试验土壤参数采自甘肃省定西市李家堡镇马铃薯种植基地, 土壤为黄绵土, 土壤试样高度为 11 cm, 直径为 5 cm。对土壤试样进行 3 轴剪切试验, 通过以剪应力为纵坐标, 法向应力为横坐标, 在横坐标轴上以破坏时的 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为圆心, 以 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为半径, 在 $\tau \sim \sigma$ 坐标系上绘制破坏总应力

圆, 并绘制不同周围应力下破坏总应力圆的包线, 得出内聚力为 16.7×10^3 Pa, 内摩擦角为 21° 。含水率测定使用环刀取土壤试样 1.5×10^{-2} kg 放入铝制称量盒内, 放在电子天平称重, 然后将盒置于烘箱内, 110°C 恒温下烘至恒量, 经测定土壤试样含水率为 12.8%。用环刀取土槽中的土壤试样, 经密度试验测得土粒密度(容积密度)为 $2\ 100\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 土粒相对密度指数为 2.1, 是一种典型的粘性土壤^[9]。其余参数参照 LS - DYNA 关键字手册中的 * MAT _ FHWA _ SOIL 和《Evaluation of LS - DYNA Soil Material Model 147》设定^[6]。试验测定的土壤试样部分参数如表 2 所示。

表 2 土壤试样的部分参数

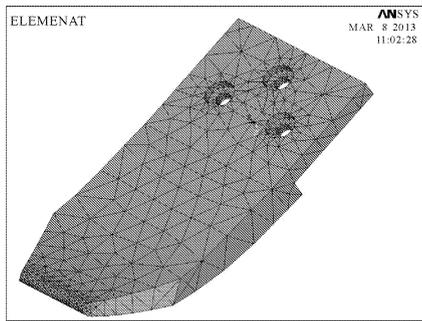
Table 2 Physical parameters of soil samples

土壤密度 Soil density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水密度 Water density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 Water content /%	体积模量 Bulk modulus /Pa	剪切模量 Shear modulus /Pa	内摩擦角 Angle of internal friction /($^\circ$)	土粒相对密度 The specific density
2100	1000	12.8	6.57×10^6	2.10×10^6	21	2.1

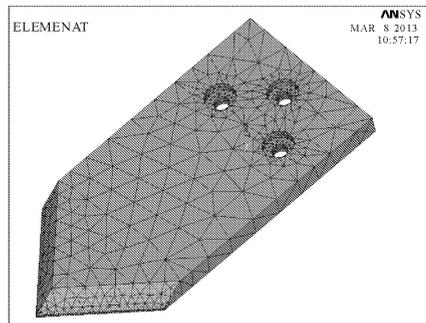
2.2 仿生铲片和普通铲片切削仿真模型的建立

2.2.1 ANSYS 和 LS - DYNA 前处理 将两种铲片模型以抛物线 .X _ T 格式导入 ANSYS 环境中进行前处理, 包括选择单元算法、填写材料属性、划分单

元等过程。单元选择的 Solid164。材料选用 65 Mn 钢, 具体参数: 密度 $\rho = 7.85 \times 10^3\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11}$ Pa、泊松比 $\nu = 0.3$ 。网格为自由网格, 两种铲片模型网格划分后如 6a 和 6b 所示。



(a) 仿生铲片 Bionic shovel



(b) 普通铲片 Nomal shovel

图 6 网格划分后的模型

Fig.6 Model after meshes

两种铲片模型在 ANSYS 中前处理完成后以 .K 文件形式导出并导入 LS - PREPOST 中进行其他前处理。包括土壤模型建立及材料选择、接触模型选择、仿真参数设置等。土壤模型以 SPH 无网格法建立, 材料选用 MAT147。铲片与土壤接触模型选用 AUTOMATIC _ NODES _ TO _ SURFACE。铲片牵引前进速度均为 $0.5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。仿真时间设置为 0.2 s、时间步为 0.001 s。建立好的铲片挖削土壤仿真模型如图 7 所示。

2.2.2 仿真及结果分析 如图 8a 和 8b 所示, 两种铲片在 0.1918 s 时切削土壤 Von - mises 应力云图。

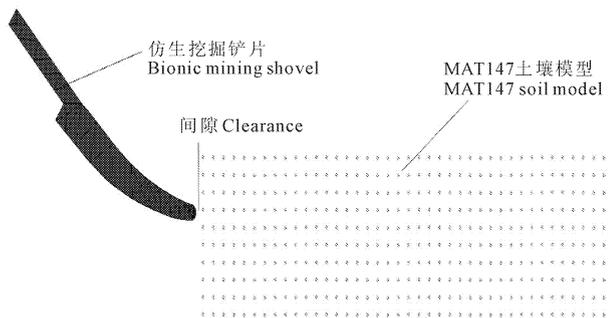
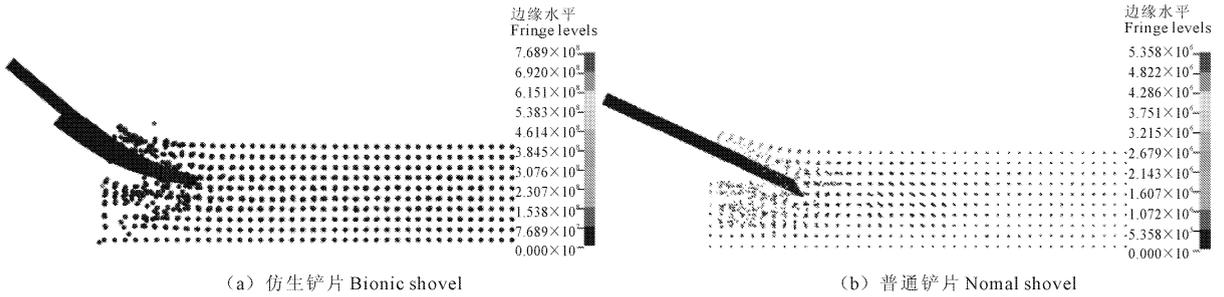


图 7 仿生挖掘铲片切削土壤仿真模型

Fig.7 Simulation model for the bionic shovel cutting soil



(a) 仿生铲片 Bionic shovel

(b) 普通铲片 Nomal shovel

图 8 0.1918 s 仿生铲片切削土壤仿真过程

Fig.8 Simulation process of 0.1918 s bionic shovel cutting soil

由图 8a 和 8b 可看出,两种铲片挖削土壤时对土壤的应力不同,图 8a 中仿生铲片对土壤应力较集中,且铲尖处应力较大,更利于土壤的破碎;图 8b 中普通铲片挖削土壤时对土壤应力较分散,土壤的应力分布于挖削的土壤上,最大应力值较小,不利于土壤的破碎,这是造成阻力较大的原因。因此,在对两种铲片对比中发现,仿生铲片具有优良的挖削性能。

图 9 为仿生铲片与普通铲片挖削土壤时的阻力曲线对比图。从图中可知普通铲片挖削土壤时的阻力明显大于仿生铲片,且其阻力波动大。仿生铲片较普通铲片挖削土壤时的阻力减小近 61%。因此,说明仿生铲片较普通铲片更具挖削减阻效果。

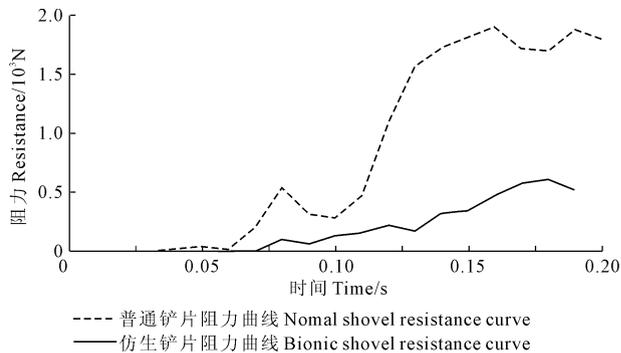


图 9 两种铲片挖削土壤时的阻力曲线对比

Fig.9 Comparison with resistance curves of 2 kinds of shovel cutting soil

5 结 论

1) 基于 LS - DYNA 仿真模拟仿生铲片与普通铲片挖削土壤过程发现,普通铲片对土壤应力比较分散,最大应力值较小;而仿生铲片对土壤应力较集中,且铲尖处应力最大。因此,仿生铲片更具有优良的挖削性能。

2) 仿真结果表明,仿生铲片较普通铲片土壤阻力减小近 61%。仿生挖掘铲片的设计成功为马铃薯挖掘机挖掘铲减阻技术要求提供了一种解决思路,且结构新颖。

参 考 文 献:

- [1] 鲁 振. 小型马铃薯收获机械技术问题的探讨[J]. 农业技术与装备, 2007, (8): 26.
- [2] 任露泉, 李建桥, 陈秉聪. 非光滑表面的仿生降阻研究[J]. 科学通报, 1995, 40(19): 1812-1814.
- [3] 郭志军, 周志立, 徐 东, 等. 高效节能仿生深松部件的试验[J]. 河南科技大学学报, 2003, 24(23): 1-3.
- [4] 郭志军, 杜 干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47-52.
- [5] 任露泉, 徐晓波, 陈秉聪. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析[J]. 农业机械学报, 1990, 21(2): 44-49.
- [6] Lewis B A. Manual for LS - DYNA soil material model 147 [R]. USA: Federal Highway Administration, 2004.
- [7] 郝好山. ANSYS12.0/LS - DYNA 非线性有限元分析从入门到精通[M]. 天津: 机械工业出版社, 2012: 360-364.
- [8] 蒋建东, 高 洁, 赵颖娣, 等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 33-38.

(上接第 257 页)

- [19] Kumar S, Dwivedi V K, Tyagi N K. Genetic variability in some metric traits and its contribution to yield in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Progressive Agriculture, 2003, 3: 152-153.
- [20] Hoogendoorn J, Rickson J M, Gale M D. Differences in leaf and stem anatomy related to plant height of tall and dwarf wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. J. Plant Physiol, 1990, 136: 72-77.
- [21] Keyes G J, Paolillo D J, Sorrells M E. The effects of dwarfing genes Rht1 and Rht2 on cellular dimensions and rate of leaf elongation in wheat [J]. Ann Bot, 1989, 64: 683-690.
- [22] Rebetzke G J, Ellis M H, Bonnett D G, et al. Height reduction and agronomic performance for selected gibberellin-responsive dwarfing

- genes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Field Crops Res., 2012, 126: 87-96.
- [23] Nirala RBP, Jha P B. Path coefficient analysis and selection indices in intervarietal crosses of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Res. Birsa Agric. Univ., 1997, 9: 129-132.
- [24] Khan H A, Mohammad S. Character associations and path coefficient analysis of grain yield and yield components in wheat [J]. Crop Res. (Hisar), 1999, 17: 229-233.
- [25] Mohsin T, Khan N, Naqvai F N. Heritability, phenotypic correlation and path coefficient studies for some agronomic characters in synthetic elite lines of wheat [J]. Food Agri. Environ., 2009, 7: 278-282.