

塔克拉玛干沙漠的起沙风速

陈渭南 董治宝 杨佐涛
韩致文 张甲坤 张民力

(中国科学院兰州沙漠研究所, 兰州 73000)

提 要 起沙风速根据观测高度、风速时距以及流体或冲击起动性质分别确定。本文建立了塔克拉玛干沙漠腹地肖塘地区不同高度、不同时距的流体起动与冲击起动风速的相关方程。结果表明: 该地天然沙的瞬时冲击起动风速(2m 高度) 5.0m/s, 流体起动风速 6.0m/s; 1 分钟平均流体起动与冲击起动风速为 5.2m/s 和 4.3m/s。气象站观测高度(11.4m) 瞬时流体起动和冲击起动风速为 7.8m/s 和 6.6m/s; 10 分钟平均值为 7.4m/s 和 5.97 (≈ 6.0) m/s。

关键词 塔克拉玛干沙漠 起沙风速 时距换算 高程换算

1 前言

起沙风速是研究风沙运动规律、解决风沙工程问题的关键指标之一。学者们提出了许多计算起动风速的理论模式^[1-3], 但由于其所采用的边界条件互不相同, 加之模式中都还需要实地测定的参数, 因此, 到目前为止, 确定各地实际起沙风速, 还必须建立在实地观测的基础上。

要确定一地的起沙风速, 首先必须明确三个问题: 一是观测的风速时距; 二是观测高度; 三是起动性质, 即: 是流体起动还是冲击起动。本文根据在塔克拉玛干沙漠腹地肖塘(40°49'N, 84°17'E) 地区的观测结果确定该地区不同情况下的起沙风速, 为进一步研究风沙问题提供理论基础。

2 观测时距对起沙风速值的影响

大气边界层的气流在运动过程中, 加力于地面的沙物质, 当风力增大到一定临界值时, 沙粒获得足够的动量, 脱离静止状态而进入运动。这个使沙粒开始运动的临界风速称为起动风速^[1]。由此可见, 起沙风速具有瞬时性特点。但是, 现阶段受观测仪器精度以及沙漠环境等条件的限制, 输沙率的观测还只能使用 1 分钟时限的平均风速值, 而计算一地较长时期(日、月、年、多年) 风沙活动规律, 又必须使用气象台站 10 分钟时限的平均风速资料。显然这二种时距的风速值是有差异的。一般说来, 时距越大, 则所取得的风速值也越小。要

• 本文得到夏训诚先生的指导, 谨致谢忱。
来稿日期: 1993 10; 收到修改稿日期: 1994 05。

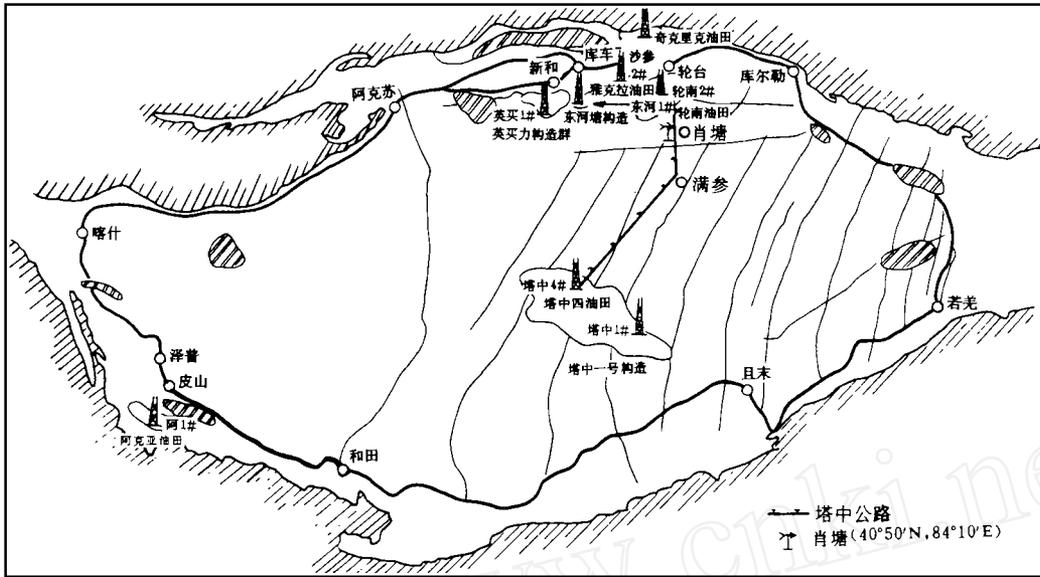


图 1 塔克拉玛干沙漠肖塘地区位置图

Fig. 1 Location of Xiaotang in the Taklimakan Desert

比较精确地计算风沙活动强度与输沙率，就要搞清时距对起沙风速值的影响，确定其相关关系，以满足对不同情况下起沙风速指标的需要。

2.1 2m 高度上的瞬时风速与 1 分钟平均风速的关系

观测结果如表 1 所示。显然，2m 高度上瞬时风速的平均值比 1 分钟平均风速的平均值大，而且瞬时风速的变化也较大。这充分揭示了风沙活动的瞬时波动性特点。1 分钟时距的风速值实际上代表了滤波作用后的平均值，其风速谱线已变平缓，从而失掉了许多揭示风沙活动实际信息的信息。例如第四组观测结果，1 分钟时距的风速记录为 4.9m/s，而相应时段的 56 个瞬时风速的平均值为 5.7m/s。其中小于 5.0m/s 的记录只占 23.2%，而大于 5.0m/s 的风速占该时段总记录数的 76.8%，最大瞬时风速可达 8.0m/s。这说明，风速时

表 1 2m 高度 1 分钟平均风速与瞬时风速的比较

Tab. 1 Comparison of one minute mean wind

velocity with the momentary wind velocity at the height 2m above ground surface

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均	标准差
1 分钟时距风速 (m/s)	4.9	5.1	5.2	6.0	4.9	3.5	2.7	2.5	2.5	2.8	4.0											
瞬时风速平均 (m/s)*	6.1	5.8	7.0	6.4	5.1	4.2	3.5	3.2	2.8	2.9	4.6											
		7.2	5.7	5.4	6.3	5.2	3.4	3.9	2.7	2.9	3.1	1.6										

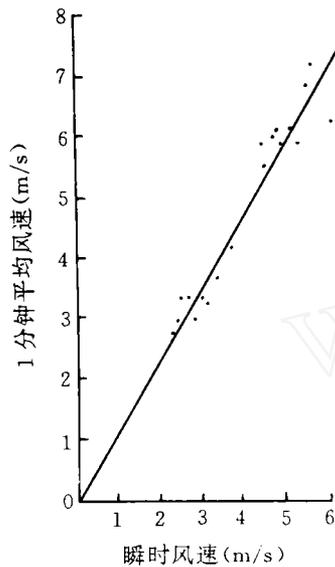
* 瞬时风速平均值是在与 1 分钟时距风速读数的同时读取的 50—70 个瞬时风速值的平均值。

距越大,反映风沙活动的精度也越低。分析结果表明,2m 高度 1 分钟时距风速与瞬时风速有下述关系:

$$V_m = 0.023 + 0.86V_i \quad (2-1)$$

$$R = 0.97 \quad \text{显著性水平为 } 0.01$$

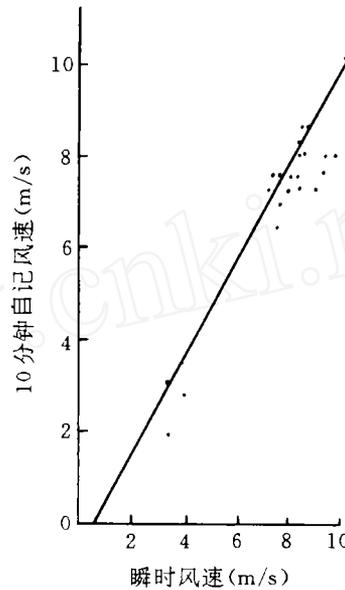
式中的 V_m 为 1 分钟时距风速, V_i 为瞬时风速, R 为相关系数。(2-1) 式和图 1 把 1 分钟时距风速同瞬时风速联系起来,从而能够互相换算,准确地表征起沙风速和计算输沙强度。



$$V_{1\text{min}} = 0.0023 + 0.86V_{\text{瞬时}} \quad (R=0.97)$$

图 2 2m 高度瞬时风速与 1 分钟平均风速的关系

Fig. 2 Relation between one minute mean wind velocity and momentary wind velocity at the height 2m above ground surface



$$V_{10\text{min}} = 1.03V_{\text{瞬时}} - 0.45 \quad (R=0.99)$$

图 3 2m 高度瞬时风速与 10 分钟时距风速的关系

Fig. 3 Relation between momentary and 10 minutes mean wind velocity at 2m height above ground surface.

2.2 2m 高度 10 分钟时距风速与瞬时风速的关系

10 分钟时距风速从自记表上读取,相应时段内的瞬时风速从电接风速仪指针上读取 150—200 个读数,再进行统计分析。结果表明瞬时风速与 10 分钟时距风速间也为简单线性正相关(图 2):

$$V_{10\text{m}} = 1.03V_i - 0.45 \quad (2-2)$$

$$R = 0.99 \quad \text{显著性水平为 } 0.01$$

式中 $V_{10\text{m}}$ 为 10 分钟时距风速, V_i 为瞬时风速。

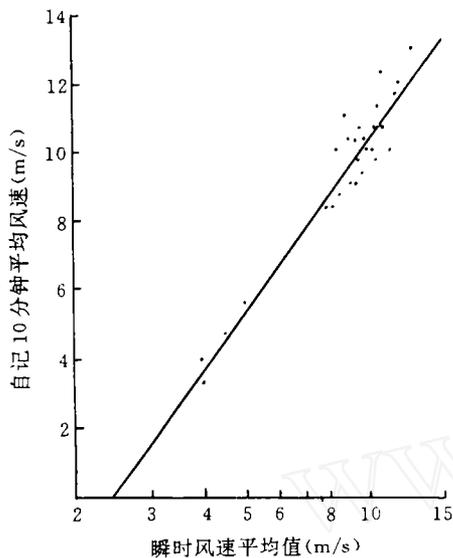
2.3 11.4m 高度瞬时风速与 10 分钟时距风速的关系

观测记录表明,气象站 11.4m 高度瞬时风速与 10 分钟时距风速的关系较为复杂。当风速小于 4.7m/s 时,瞬时风速平均值偏小;当风速大于 4.7m/s 以后,瞬时风速则大于 10 分钟时距风速,表现为半对数关系(图 3):

$$V_{10m} = 7.5 \ln V_t - 6.72 \quad (2-3)$$

$$R = 0.97 \quad \text{显著性水平 } 0.01$$

造成这种结果的原因，目前还不清楚，有待进一步观测分析。



$$V_{10} = 7.5 \ln V_{\text{瞬时}} - 6.72 \quad (R = 0.95)$$

图4 11.4m 高度瞬时风速与10分钟时距风速的产关系
Fig. 4 Relation Between momentary and 10 minutes mean wind velocity at the height of 11.4 meters above ground surface

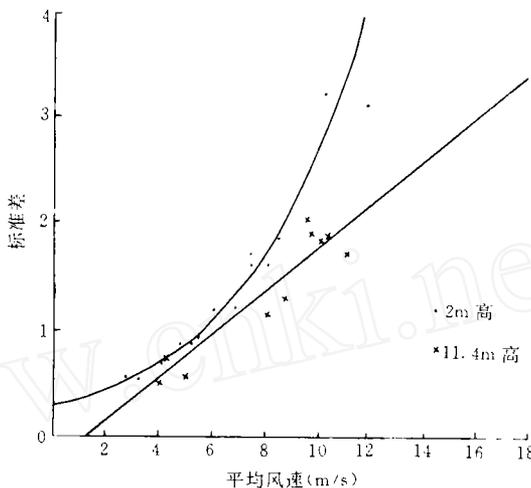


图5 风的稳定性与平均风速的关系
Fig. 5 Relation between stability and mean velocity of wind.

3 不同观测高度上的风况

近地表风速垂向分布的理论廓线在中性大气层结条件下表现为对数律。实际研究风沙运动规律时，由于环境条件的复杂多样，风沙流的垂向分布往往大大偏离对数律。因此，要满足风沙工程设计对不同高度风况资料的需要，也必须建立在实地观测的基础上。

3.1 瞬时风速随高度的变化

2m 高度与 11.4m 高度同步观测所取得的 2566 组时风速数据表明：首先，全部观测数据组中，2m 高度风速都低于 11.4m 高度的风速。第二，11.4m 高度瞬时风速组际变差大于 2m 高度者。第三，不同高度上瞬时风速的组内差异也很明显，表现为随风速而变的趋势：

$$S_2 = 0.296 \times 1.25^{V_2} \quad (3-1)$$

$$R = 0.98$$

$$S_{11.4} = 0.202V_{11.4} - 0.22 \quad (3-2)$$

$$R = 0.94$$

式中 V_2 、 $V_{11.4}$ 、 S_2 、 $S_{11.4}$ 分别为 2m 与 11.4m 高度的风速及其标准差。11.4m 高度风的稳定度随着风速增大呈线性减少（标准差增大），2m 高度在风速小于 6m/s 时，风的稳定度降低

的变率较小；而当风速大于 6m/s 时，风的稳定度降低很快。风的稳定度随风速增大按指数律降低的规律说明在较高风速时，风的波动性更大，稳定度更小（图 4）。第四，若 2m 与 11.4m 高度风速相等，则 2m 高度风的稳定程度显然远小于 11.4m 高度者，且风速越大，低层风速的稳定度也越小。

3.2 10 分钟时距风速随高度的变化

10 分钟时距风速随高度的变化有三个特点：第一，同瞬时风速的变化一样，随着风速增大，10 分钟时距风速距平均值和标准差也相应增大，即风的稳定度随着平均风速增大而降低；而且，高度越大，稳定度越小。第二，两个观测高度的风速资料都表现为在风速小于 6m/s 的情况下，随着风速增大，风的稳定度也增大；若风速大于 6m/s，则表现为相反的情形：随着风速增大，风的稳定性降低。第三，受其他因素影响，夜间高层气流风速稳定性大于低层气流，而昼间高层气流的稳定性则小于低层气流。这对应用连续自记风速资料计算地面风沙活动强度有很大的影响。只有搞清楚高层气流运行状态与贴地气流运行状态的关系，才能比较准确地计算近地面长期风沙活动状态。

3.3 不同高度层气流运动速度的相关性

虽然由于各种因素的影响，不同高度层风速有其不同的特点，但大量资料表明也存在着共性与必然联系。根据对 2566 组对应观测资料的统计相关分析表明，2m 与 11.4m 高度瞬时风速间具有简单线性正相关关系（图 5）：

$$V_{11.4} = 0.63 + 1.2V_2 \quad (3-3)$$

$$R = 0.99 \quad \text{显著性水平为 } 0.01$$

式中 $V_{11.4}$ 、 V_2 分别为 11.4m 和 2m 高度瞬时风速(m/s)。这揭示了 2m 与 11.4m 高度瞬时风速的同步一致性。

根据这一模式即可把 2m 与 11.4m 高度记录的风速进行互换，以满足风沙工程设计中对不同高度风速资料的需要。不同高度上 10 分钟时距风速的关系随时间有较大的变化。根据大量观测资料的分析发现，虽然每一时段观测所得关系并不完全一致（表 2），但都表现为正相关关系，相关程度都很高，显著性水平都在 0.01 以上，综合分析得到的总体相关方程为：

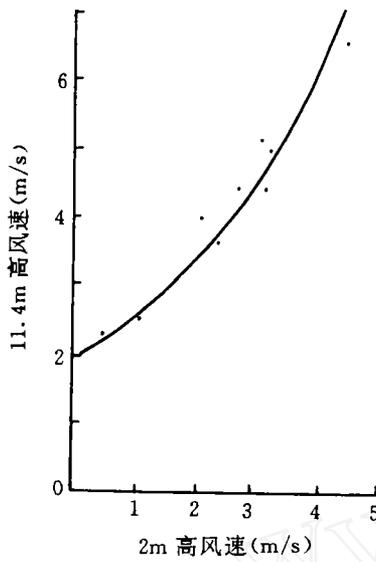
$$V_{11.4} = 1.87 \times 1.35V_2 \quad (3-4)$$

$$R = 0.98$$

这说明 2m 和 11.4m 高度 10 分钟时距风速表现为指数函数关系：垂向风速梯度随着风速增大而增大。

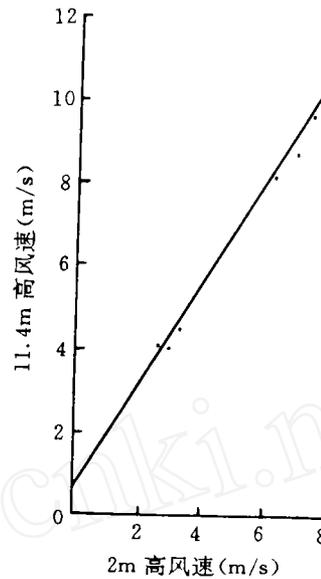
4 起沙风速的确定

风沙起动临界风速有大小与沙颗粒级配、沙层湿度、植被条件以及起动方式等因素有着密切的关系。塔克拉玛干沙漠地面以流动风成沙为主。细沙和极细沙含量占 70%—80% 左右，平均粒径 0.87mm^[4]。地面裸露，表沙层含水率很低，一般不到 0.1%。在这些因素大致相同的情况下，决定沙粒起动临界值大小的主要因素就只有流体起动或冲击起动两个边界条件。



$$V_{11.4} = 0.63 + 1.2V_2 \quad (R=0.99)$$

图 6 2m 与 11.4m 高度瞬时风速的关系



$$V_{11.4} = 1.87 + 1.35V_2 \quad (R=0.98)$$

图 7 2m 与 11.4m 高度 10 分钟时距风速的关系

Fig. 6 Relation between momentary wind velocities at different heights above ground surface

Fig. 7 Relation between 10 minutes mean wind velocities at different height above ground surface

表 2 2m 与 11.4m 高度 10 分钟时距风速相关方程

Tab. 2 Relative equations of 10 minutes mean wind velocities at different heights above ground surface

观测日期	相关方程	相关系数 R
4 月 3 日—6 日	$V_{11.4} = 2.04 \times 1.26V_2$	0.95
4 月 7 日	$V_{11.4} = 2.42 + 0.16V_2^2$	0.93
6 月 22 日	$V_{11.4} = 1.94 \times 1.28V_2$	0.95
6 月 25 日	$V_{11.4} = 1.44 + 1.21V_2$	0.93
6 月 26 日	$V_{11.4} = 0.38 + 1.28V_2$	0.96
7 月 21 日	$V_{11.4} = 0.97 + 1.35V_2$	0.98
7 月 30 日	$V_{11.4} = 0.76 + 1.35V_2$	0.97
8 月 6 日	$V_{11.4} = 0.27 + 1.42V_2$	0.98
9 月 22 日	$V_{11.4} = 1.92e^{-0.25V_2}$	0.99
9 月 25 日	$V_{11.4} = 1.45 + 1.21V_2$	0.93

流体起动指纯气流对沙粒的直接推动作用，冲击起动则是指已形成的风沙流对地面的冲击作用，使沙粒进入运动状态。野外实测起沙风速，在上风向尚无来沙情况下，使观测

点沙粒开始运动的风速就近似于流体起动风速；上风向已有风沙流形成，挟沙气流以及蠕移（surface creep）、蠕跃（reptation）和跃移（saltation）运动的沙粒使观测点沙粒进入运动状态的临界风速就是冲击起动风速。

流体起动风速的实地观测场布设在肖塘气象站西北侧平坦开阔的冲淤积粘土平原上。观测点附近无流沙分布。事先将用标准筛筛好的不同粒级沙丘沙平铺于光滑试验板上（试验板面与周围地面保持在同一水平面上）。观测点旁 2m 处设立测风杆，杆上 0.5m、2m 高度分别安装瞬时风速仪，同时记录风速。5 名观测员分别观察地面沙粒状态，每人测读 12 组数据，然后求其平均值，作为该组观测的起动风速。

观测结果表明，在 0.5—0.063mm 粒径区间，2m 高度瞬时流体起动风速随粒径增大而增大。混合沙（地面天然沙）的瞬时起动风速为 6.0m/s，与较小粒级沙的起动风速一致。同步观测的 0.5m 高度上的流体起动风速随着粒级增大而降低，混合沙的起动风速与较大粒级者一致。这说明净风作用下的沙粒起动乃是由于风的剪力与垂直风速梯度差所造成的剪力共同作用的结果，垂直梯度力的作用更大。就所观测三级粒级而言（0.063—0.125mm，0.125—0.25mm，0.25—0.5mm），起动风速的垂直梯度随着粒级的增大而增大，混合沙的起动风速梯度略大于平均粒级沙的临界风速梯度值。

冲击起动风速的观测场设在自然平沙地上。3 名观测员每人观测 15 次，取 45 组数据的平均值作为冲击起动风速指标。结果表明，2m 高度冲击起动瞬时风速观测值变化于 4.8—5.3m/s，平均为 5.0m/s。

为了使观测结果能适合于不同时距和不同高度，需对观测结果进行时距和高度换算。按 (2-1) 式，2m 高度一分钟时距的冲击起动风速为 4.3m/s，而流体起动临界值为 5.2m/s。11.4m 高度的起动风速按 (3-3) 式换算，瞬时冲击起动风速为 6.6m/s，流体起动风速为 7.7m/s，10 分钟时距的冲击与流体起动风速按 (3-4) 式分别为 6.0m/s 和 7.4m/s。

5 结论

(1) 工程风沙学要求使用准确规范的动力指标参数。起动风速是研究风沙运动规律和进行风沙工程设计的关键参数之一，应有明确的取值条件。发表起沙风速资料应说明其环境条件、风速时距、观测高度与起动方式，以提高资料的使用价值。

(2) 本文建立了不同时距、不同高度上风速的相关方程，可以用来解决塔克拉玛干沙漠腹地肖塘地区风沙运动规律研究与风沙工程设计中的问题，是否可以用于其他地区，还需要进一步研究。

(3) 塔克拉玛干沙漠公路沿线 2m 高度瞬时流体起动风速为 6.0m/s，冲击起动风速为 5.0m/s；1 分钟时距流体起动风速为 5.2m/s，冲击起动风速为 4.3m/s。11.4m 高度上瞬时流体起动风速为 7.8m/s，冲击起动风速为 6.63m/s；10 分钟时距流体起动与冲击起动风速分别为 7.4m/s 与 6.0m/s。风沙工程设计中可以根据不同情况分别采用之。

参 考 文 献

- 1 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. 35—39.
- 2 耿宽宏. 中国沙区的气候. 北京: 科学出版社, 1986. 107—110.
- 3 耿宽宏. 起风沙和流沙. 地理学报, 1959. 25 (1): 21—39.
- 4 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠 84°E 沿线沙物质的粒度特征. 地理学报, 1993. 48 (1). 33—46.

THRESHOLD VELOCITIES OF SAND-DRIVING
WIND IN THE TAKLIMAKAN DESERT

Chen Weinan Dong Zhibao Yang Zuotao

Han Zhiwen Zhang Minli Zhang Jiashen

(Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Key words Taklimakan desert, threshold velocity of sand-driving wind, time duration adaptation, height adaptation

Abstract

Sand-driving wind is one of the important factors in the study of aeolian sand movement, therefore it is of great significance to determine the threshold velocity accurately for the estimation of sand transport rate and recommendaton of proper sand control measures. On the basis of field observation, this paper attempts to make out the fluid threshold and impact threshold and adapt them for different heights and time durations. Consequently, the wind data derived from the meteorological observatory will be more efficiently used in the study of sand movement. By means of the work mentioned above, the following results have been reached.

At the height 2m above ground surface, for naturally mixed sands, the instant fluid and impact threshold velocities are 6.0 and 5.0m/s respectively, equivalent to one minute averages of 5.2 and 4.3m/s respectively. While averaging on ten minutes duration, the fluid and impact threshold velocities are 5.7 and 4.7m/s respectively. Both fluid and impact thresholds have been adopted for the height of 11.4m (the height of anemometer tower) at which the instant velocities for the former and later are 7.8 and 6.63m/s respectively, equivalent to 7.4 and 5.97 (≈ 6.0) m/s of ten minute averages.

作 者 简 介

陈渭南, 男, 1955年2月生, 研究员。1986年在陕西师大地理系获理学硕士学位, 1989年在中科院兰州沙漠所获理学博士学位。主要从事干旱区地貌、风沙沉积、风沙工程、土壤风蚀及全新世沙漠环境演变的研究。曾参加5部专著的编写, 发表论文40多篇。