

不同利用方式对草甸草原抗风蚀能力的影响

周尧治^{1,2}, 王旭^{1,2}, 杨桂霞^{1,2}, 辛晓平^{1,2*}

(1. 呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081; 2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 为了解不同利用方式对呼伦贝尔草甸草原抗风蚀能力的影响, 采用植被调查结合风洞实验的方法对不同利用方式条件下的草甸草原植被变化和草甸草原原状土的抗风蚀能力进行了研究. 结果表明, 草甸草原不同利用强度条件下临界风蚀风速 (v) 随植被盖度 (Cover) 的变化基本服从二次幂函数关系. 随着利用强度的增加, 植被盖度降低, 在同样风速条件下 (大于临界风蚀风速), 风蚀率迅速增加. 较轻的利用强度下, 当植被盖度保持在 63% 时, 在风速为 25 m/s 条件下风蚀率也很小, 而当植被盖度 < 35% 时, 在风速为 20 ~ 25 m/s 条件下, 风蚀率随植被盖度的下降迅速上升. 草甸草原区的免耕农田由于完全失去植被的保护, 每分钟狂风 (25 m/s) 造成的土壤风蚀量达到 682.1 kg/hm², 接近 1 a 的土壤平均生成量 (1 000 kg/hm²).

关键词: 草甸草原; 土壤风蚀; 利用方式; 风洞实验

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1394-06

Influences of land Using Patterns on the Anti-wind Erosion of Meadow Grassland

ZHOU Yao-zhi^{1,2}, WANG Xu^{1,2}, YANG Gui-xia^{1,2}, XIN Xiao-ping^{1,2}

(1. Hulunbeier State Station of Grassland Ecosystem Field Observation and Scientific Research, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Resource Remote Sensing and Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to analyse the effects of the human disturbances to the ability of anti-wind erosion of the Hulunbuir meadow grassland, the methods of vegetation investigation and the wind tunnel experiment were made to research the changes of vegetation and the abilities of anti-wind erosion of meadow grassland under different using patterns of meadow grassland. The results indicate that, under different grazing intensities of meadow grassland, the critical wind velocity of soil erosion (v) changes with the vegetation cover according to the relation of second power function. Along with the grazing intensities increasing and the vegetation cover reducing, the velocity of soil erosion rapidly increased on the condition of similar wind velocity which is speedier than the critical wind velocity of soil erosion. When the meadow grassland is mildly grazed which the vegetation cover maintains 63%, the velocity of soil erosion is small even there is gale that the wind velocity reach 25 m/s. When the vegetation cover of meadow grassland reduced to less than 35%, the velocity of soil erosion rapidly increased with the vegetation cover's reducing on the condition of the wind velocity is among 20-25 m/s. And owing to the no-tillage cropland of meadow grassland is completely far from the protection of the vegetation, the soil wind erosion quantity achieves 682.1 kg/hm² in a minute when the wind velocity is 25 m/s, which approaches the average formation quantity of soil (1 000 kg/hm²) in a year.

Key words: meadow grassland; soil wind erosion; land use patterns; wind tunnel experiment

全球大约有 10% 的农业土地 (包括耕地和草地) 遭受轻度至中度的土壤侵蚀, 有 80% 的农业土地遭受中度至重度的土壤侵蚀. 同时全球有超过 50% 的草地由于过牧而遭受土壤侵蚀^[1]. 在干旱区由于气候的变化和人类不合理经济活动, 风蚀的影响越来越严重^[2,3]. 土壤风蚀的发生一方面为沙尘暴提供了物质来源, 另一方面带走了大量的土壤营养物质^[1,3], 从而使人口拥挤的地球在满足人类社会需求方面面临严峻挑战^[4]. 因此研究土地利用方式与土壤风蚀的关系, 对于选择合理的治理措施, 控制土壤风蚀具有非常重要的意义. 美国农业部的科学家们在 20 世纪 50 年代系统地研究了土壤风蚀因子, 如土壤粒度组成、土壤结构、土壤化学及有机质对土壤特性和抗风蚀力的影响, 并建立了“通用风蚀方程”^[5]. 20 世纪 90 年代在我国也开始定量研究风况、

植被、土壤含水量、地表类型等自然因素和土地翻耕、过度放牧、樵采等人为因素与土壤风蚀的定量关系^[6~11]. 但是我国已有的研究主要是以沙漠分布区的风沙土为对象^[12,13], 而对草原区的风蚀状况的报道较少, 尤其是草甸草原的土壤风蚀状况缺乏研究. 同时, 已有的关于人类活动对土壤风蚀影响的研究大多是采用模拟的方法^[14], 而对人类活动影响下的原状土的风蚀规律的研究鲜见报道.

本实验以呼伦贝尔草甸草原不同利用方式条件下的原状土为研究对象, 通过风洞实验方法分析不

收稿日期: 2007-05-30; 修订日期: 2007-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2007CB106806); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA10Z241); 国家科技支撑计划项目 (2006BAC01A12)

作者简介: 周尧治 (1976 ~), 男, 博士后, 主要研究方向为草地生态学, E-mail: zyzhn666@126.com

* 通讯联系人

同利用方式对草甸草原抗风蚀能力的影响,了解不同利用方式条件下的草甸草原土壤风蚀规律,以期 为草甸草原区的环境管理提供科学依据.

1 研究区域概况

呼伦贝尔市谢尔塔拉牧场地处大兴安岭西麓丘陵向蒙古高原的过渡区,海拔 630~760 m.年均气温 $-2\sim-1^{\circ}\text{C}$,最高、最低气温分别为 36.17°C 和 -48.5°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 $1\,580\sim 1\,800^{\circ}\text{C}$,无霜期 $95\sim 110\text{ d}$,年平均降水量 $350\sim 400\text{ mm}$,年度间极不平衡,主要集中在 6~8 月.大风日数年平均为 20 d,其中 70% 的大风日数分布在 3~6 月份,主要是西北风,年均风速为 $3.0\sim 3.5\text{ m/s}$,最高风速达 30 m/s .地带性土壤为黑钙土或暗栗钙土,土层厚 $30\sim 40\text{ cm}$,有机质含量 5.1% 左右.植被组成主要有羊草 (*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis* Roshev)、斜茎黄耆 (*Astragalus adsurgens* Pall)、山野豌豆 (*Vicia amoena* Fisch)等.谢尔塔拉牧场曾是呼伦贝尔草原生产力和牧草质量最高的区域,近年来由于过度开垦和过度放牧使大面积草场发生不同程度的退化.目前该区域风蚀主要发生在农田、道路和居民区周围.

2 材料与方法

在谢尔塔拉牧场 11 队,根据草场离居民区的不同距离的植被状况(植被盖度)确定不同放牧强度,

植被盖度为 20%、40%、60%,对应的放牧强度为重度、中度、轻度放牧.草原重度利用距牧民居住区 150 m、中度利用距牧民居住区 1 000 m、轻度利用距牧民居住区 2 500 m.3 个草原取样点基本在一条直线上.耕地分布在草甸草原距草甸草原取样点 1 300 m,当年种植夏小麦,9 月份收获后未翻耕.2006 年 10 月中旬在各取样点选择有代表性的地段,挖取长、宽、高分别为 95 cm、30 cm、20 cm 的土体,装在特制的木箱中,并用木板封好.在挖掘和土样装箱和运输过程中注意使土体和植被保持原状.2006 年 8 月中旬在草甸草原各取样点附近选 7 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方做植被调查,调查项目包括植被盖度、物种组成、各植物种地上生物量.

风洞实验在农业部保护性耕作研究中心的风蚀风洞中进行,该风洞风速为 $2\sim 30\text{ m/s}$,且连续可调,风洞总长 11 m,实验段长 6 m,截面积为 $0.8\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ (图 1).实验中保持土样表面与风洞底部平齐,样品有效风蚀面积为 $95\text{ cm}\times 30\text{ cm}$.土壤风蚀强度用风蚀率即单位时间(1 min)内单位(1 m^2)风蚀面积上的风蚀量(g)表示,单位为 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$.在实验过程中风速用德图 Testo 416 型叶轮风速仪在距离风洞底面 20 cm 处测得,风蚀率以百分之一天平称重求算.实验员在风洞实验过程中通过风洞壁上的玻璃窗口观察土壤样品土壤颗粒的运动状态来确定临界风速.本实验测定风速设为 5 个梯度,分别为 7、12、17、22 和 27 m/s .

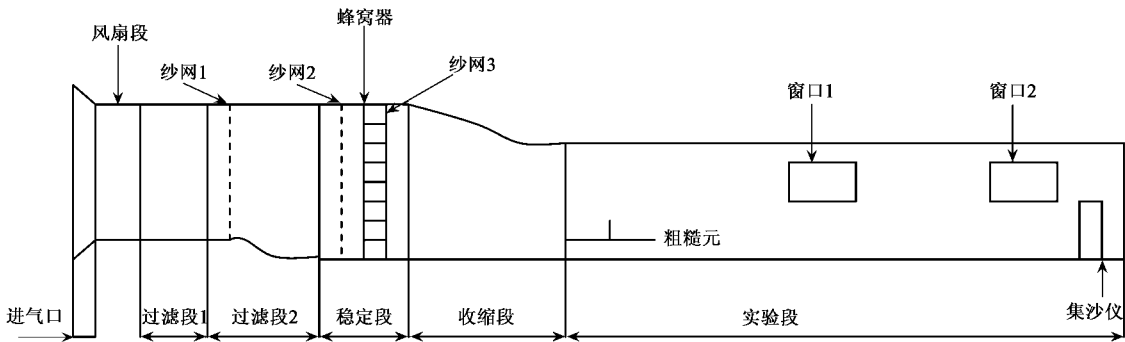


图 1 风洞试验装置截面
Fig.1 Section of the wind tunnel

3 结果与分析

3.1 不同利用方式对草甸草原植被的影响

从表 1 可以看出,在草甸草原距牧民集居点 2 500 m 处,草原植被处于轻度利用状态,草原植物

群落基本保持完整.7 个平米样方共发现 49 个植物种,平均每 m^2 样方有 23.8 个植物种,8 月中旬地上部分生物量为 188.55 g/m^2 ,枯落物为 91.47 g/m^2 .当植被逐步靠近牧民点,家畜活动强度增大,在靠近牧民点 1 000 m 处,7 个 1 m^2 样方共出现 48 个物种,每

m² 样方有 18.4 个植物种. 草甸草原利用强度从轻度利用到中度利用植物物种总数基本保持不变, 而每 m² 植物物种数量从 23.8 个下降到 18.4 个, 下降了 22.7% ($p < 0.05$), 说明尽管草甸草原植被利用强度由轻度利用到中度利用, 群落生物多样性基本保持不变, 但是放牧活动的增强改变了植物物种的布局. 同时随着放牧利用强度增加到中度, 地上平均生物量和枯落物显著下降 ($p < 0.01$), 分别比较轻度利

用草甸草原下降了 47.39%、29.34%. 草甸草原利用强度从中度利用到重度利用, 只有每 m² 植物物种数量下降不明显, 而群落中植物物种总数从 48 个下降到 35 个、地上部分生物量从 99.20 g/m² 下降到 46.75 g/m²、枯落物从 64.63 g/m² 下降到 23.61 g/m², 分别比中度利用草甸草原又减少了 27.1%、52.8%、63.5% ($p < 0.01$).

由于植物生理生态特性不同, 对草食动物的取

表 1 不同利用方式条件对草甸草原植被的影响¹⁾

Table 1 Effects of land using patterns on the vegetation cover

草地利用方式	植物种总数/个	物种数/个·m ⁻²	盖度/%	地上生物量/g·m ⁻²	枯落物/g·m ⁻²
轻度利用 (距牧民点2 500 m)	49	23.8 ± 4.7 (21 – 26)	63 ± 5.7 (55 – 70)	188.55 ± 57.99 (147.78 – 275.35)	91.47 ± 31.62 (62.76 – 116.42)
中度利用 (距牧民点1 000 m)	48	18.4 ± 2.8 (16 – 23)	42 ± 6.4 (35 – 45)	99.20 ± 11.64 (88.48 – 117.34)	64.63 ± 17.31 (43.75 – 88.69)
重度利用 (距牧民点 150 m)	35	18 ± 3.5 (15 – 24)	22 ± 5.6 (18 – 25)	46.75 ± 14.8 (30.44 – 67.78)	23.61 ± 8.4 (13.06 – 35.28)
免耕农田	0	0	0	0	0

1) “±”后面数字为标准差, 括号内数字为最小值和最大值

食反应不同, 因此随着草原利用强度的变化, 植物群落组成发生了明显的改变(表 2). 在轻度利用的草原, 生态系统的生态功能主要由贝加尔针茅、羊草、日荫菅来承担; 在中度利用草原上, 生态系统生态功能主要由羊草、苔草和隐子草来承担, 贝加尔针茅在群落中变为偶见种; 在重度利用草原上, 生态系统生

态功能主要由苔草、隐子草来承担, 而贝加尔针茅和羊草均为偶见种. 在呼伦贝尔草甸草原, 贝加尔针茅和羊草不仅草原生态系统产品功能的主要承担者也是草原生态系统水土保持和防止土壤侵蚀等服务功能的主要承担者.

3.2 不同利用方式条件下草甸草原风蚀率状况

表 2 不同的利用方式条件下草地植物种优势度的变化¹⁾

Table 2 Change of dominance of plant species under different land using patterns

轻度利用		中度利用		重度利用	
物种	优势度	物种	优势度	物种	优势度
贝加尔针茅	0.218 684 9	羊草	0.400 895	苔草	0.359 905
羊草	0.182 983 7	苔草	0.179 584	隐子草	0.225 371
日荫菅	0.112 032 6	隐子草	0.109 303	细叶白头翁	0.022 012
白头翁	0.072 082 9	裂叶蒿	0.041 147	羊草	0.021 225
苔草	0.037 490	日荫菅	0.014 389	裂叶蒿	0.020 336
狭叶青蒿	0.032 488 9	瓣蕊唐松草	0.013 004	蒲公英	0.018 432
裂叶蒿	0.030 205 9	狭叶青蒿	0.004 036	日荫菅	0.015 434
扁蓿豆	0.023 661 3	麻花头	0.000 818	麻花头	0.013 074
唐松草	0.023 459	扁蓿豆	0.000 474	双齿葱	0.006 406
麻花头	0.018 481 3			贝加尔针茅	0.001 89
隐子草	0.004 943				

1) 优势度 = (相对盖度 + 相对重量)/2, 优势度为 7 个 1 m² 样方的平均值

3.2.1 不同利用方式条件下的草甸草原土壤临界风蚀风速

尽管由于草甸草原土壤有机质含量高(在 5.1% 左右)有较好的土壤结构和不同程度的植被保护以及免耕农田形成结皮保护层, 使得本实验各处理样品的临界风速较高. 但是草甸草原不同利用强

度条件下土壤风蚀实验结果表明, 临界风蚀风速随着利用强度的增加而下降, 从植被基本保持完整的轻度放牧草甸草原到没有植被覆盖的农田, 临界风蚀风速从 25.3 m·s⁻¹ 下降到 12.7 m·s⁻¹. 临界风蚀风速(v)随植被盖度(Cover, 取值范围在 0 ~ 1 之间)的变化基本服从二次幂函数关系($n = 4$):

$$v = 12.613 - 2.476 \times \text{Cover} + 35.375 \times \text{Cover}^2$$
$$(R^2 = 0.998, F = 269.076)$$

随着草原利用强度的增加,贝加尔针茅和羊草在群落中由主要物种变为偶见种(表 2),同时植被地上部分生物量和枯落物显著下降(表 1),由于失去植被及枯落物的保护,草甸草原重度放牧和农田容易遭受风蚀.

3.2.2 不同土地利用方式条件下风速与土壤风蚀率的关系

由于风洞调速系统的误差,每组实验中实验段的风速难于严格控制,在拟定的风速条件下,由实验数据直接定量比较不同利用强度对风蚀率的影响存在较大困难,为精确起见,对实验结果(表 3)采用自然 3 次样条法插值,求出草甸草原不同利用方式条

件下,20 m/s和 25 m/s风速时的风蚀率(表 4).

(1)当风速超过临界风蚀风速,风蚀率随风速增大而增加.草甸草原在中度、重度和免耕农田 3 种利用方式条件下,在风速 20 m/s之后,土壤风蚀率大幅上升,因此在草甸草原区风速 20 m/s以上对农田和重度放牧草甸草原是灾害性大风,对中度放牧的草地也产生非常严重的影响.

(2)风蚀率随风速增大的增加率因土地利用强度的大小而异.土地利用强度越大,风蚀率随风速的增加率也越大.在 25 m/s风速条件下,重度放牧条件下土壤风蚀是中度放牧条件下土壤风蚀的 6 倍左右,免耕农田土壤风蚀是重度放牧条件下土壤风蚀的 7 倍左右.

3.3 草甸草原植被状况与风蚀状况的关系

表 3 不同利用方式和各风速下 0~5 min 内平均风蚀率¹⁾

Table 3 Rate of wind erosion under different land using patterns and wind speed

不同利用方式 对应植被盖度	临界风蚀风速 /m•s ⁻¹	单位	不同风速条件下的风蚀率 E			
轻度放牧 (63%)	25.0	v/m•s ⁻¹	11.8	16.7	21.5	26.3
		E/g•(m ² •min) ⁻¹	0	0	0	0.10
中度放牧 (42%)	18.1	v/m•s ⁻¹	12.1	17.0	20.8	25.5
		E/g•(m ² •min) ⁻¹	0	0	0.88	1.56
重度放牧 (22%)	13.5	v/m•s ⁻¹	12.6	17.2	22.5	28.5
		E/g•(m ² •min) ⁻¹	0	2.67	6.55	12.33
农田 (0%)	12.7	v/m•s ⁻¹	11.3	16.5	19.5	27.2
		E/g•(m ² •min) ⁻¹	0	3.33	5.22	72.87

1) 实验时土壤的含水量为 3.5%左右

表 4 不同风速条件下草甸草原利用方式与风蚀率的关系¹⁾/g•(m²•min)⁻¹

Table 4 Relationship between land using patterns and the rate of wind erosion under different wind speed /g•(m²•min)⁻¹

风速 /m•s ⁻¹	轻度放牧 (63%)	中度放牧 (42%)	重度放牧 (22%)	农田 (0%)
15	0	0	2.03	2.94
20	0	0.88	3.16	7.21
25	0.05	1.56	9.72	68.12

1) 括号内数字是相应利用方式条件下的植被平均盖度

草甸草原随着利用强度的增加,植被盖度降低,在同样风速条件下(大于临界风蚀风速),风蚀率迅速增加(图 2).较轻的利用强度下,当植被盖度保持在 60%时,在大风(25 m/s)条件下风蚀率也很小,而当植被盖度 < 35%时,在大风(20~25 m/s)条件下,风蚀率随植被盖度的下降迅速上升.

3.4 草甸草原不同利用方式的可持续性评价

由于植被可以增加地表粗糙度,阻挡风力对地表土壤物质的直接作用、分散近地表风动量、截留部分被蚀物质,因此植被发挥着抑制风蚀、保护地表的作用^[16~18].在呼伦贝尔草甸草原当植被盖度低于 42%(地上部分生物量干物质重低于 99.20 g/m²,枯落物低于 64.63 g/m²)时,地表将面临严重的风蚀.因为这种状态下的草甸草原除了通过畜牧业从草原生态系统输出大量物质(几乎没有人为的物质投入)以外,通过风蚀每年还要损失12 192 kg/hm²(当地气象资料表明,每年 4 月上旬至 5 月下旬呼伦贝尔草甸草原大风日数平均为10 d,该时段内,最大风速能达 25 m/s以上,其中 15 m/s左右的风速共计约24 h,20 m/s左右大风共计约有 16 h,25 m/s左右大风共计约有 4 h),土壤年风蚀量是土壤年生成量1 000 kg/hm²^[1]的 12 倍.而重度放牧[植被盖度为(22 ± 5.6)%、地上部分生物量干物质重为(46.75 ± 14.8) g/m²,枯落物低于(23.61 ± 8.4)g/m²]的草甸草原通

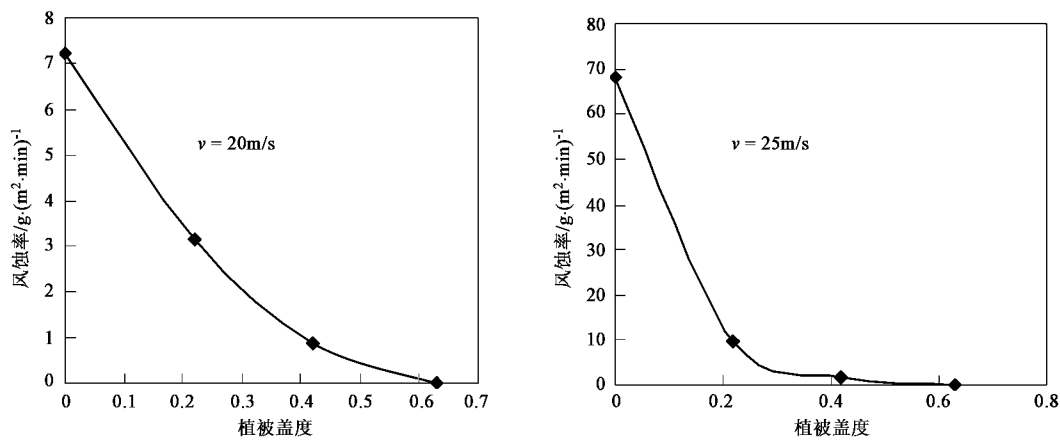


图 2 草甸草原在 20 m/s 和 25 m/s 风速条件下不同利用强度与风蚀率的关系

Fig.2 Intensity of land using patterns and rate of wind erosion under 20 m/s and 25 m/s wind speed

过风蚀每年损失的土壤大约为成土作用的 83.0 倍左右,即每年每 hm^2 草地损失土壤约 83.0 t.

呼伦贝尔草甸草原开垦为农田,在没有实行保护性耕作条件下是不可持续的,免耕农田在 25 m/s 的风速条件下每 min 的风蚀量($682.1 \text{ kg}/\text{hm}^2$)就接近于平均 1 a 的土壤生成量($1\,000 \text{ kg}/\text{hm}^2$).免耕农田有结皮的保护,能在一定程度降低风蚀率.如果翻耕后遇到大风气候,由于地表结构破损而降低了土壤的抗风蚀力,其风蚀量会以 2 个数量级的速率上升^[19].呼伦贝尔市的现有耕地大部分在草甸草原区,因此亟待推广保护性耕作.

呼伦贝尔草甸草原轻度放牧植被盖度在 63% 以上,植被系统基本保持结构和功能的完整,其年风蚀量($120 \text{ kg}/\text{hm}^2$)小于每年的土壤生成量($1\,000 \text{ kg}/\text{hm}^2$),因此是一种可持续的利用方式.

4 结论

(1)轻度放牧利用的呼伦贝尔草甸草原当植被盖度保持在 63% 左右时,群落以贝加尔针茅和羊草为优势种群,8 月份地上生物量为(188.55 ± 57.99) g/m^2 ,枯落物为(91.47 ± 31.62) g/m^2 .由于植被系统在轻度放牧条件下基本保持完整,能有效防止大风对土壤的侵蚀,风蚀率小,是可持续的利用方式.

(2)当草甸草原利用强度增大植被盖度保持在 42% 左右时,群落以羊草、苔草、隐子草为优势种群,贝加尔针茅变为群落偶见种.8 月份地上生物量为(99.20 ± 11.64) g/m^2 ,枯落物为(64.63 ± 17.31) g/m^2 ,与轻度利用条件下的草甸草原相比其地上部分生物量和枯落物显著下降($p < 0.01$),植被系统受到损伤

不能很好控制大风对土壤的侵蚀,每年 4 月上旬至 5 月下旬土壤风蚀率为 $12\,192 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,是土壤生成量 $1\,000 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的 12 倍左右.

(3)呼伦贝尔草甸草原在重度放牧利用植被盖度维持在 22% 左右时,群落以苔草、隐子草为优势种群,贝加尔针茅和羊草变为群落偶见种.8 月份地上部分生物量从中度利用的(99.20 ± 11.64) g/m^2 下降到重度利用的(46.75 ± 14.8) g/m^2 ,枯落物从(64.63 ± 17.31) g/m^2 下降到(23.61 ± 8.4) g/m^2 ,分别比中度利用草甸草原又减少了 52.8%、63.5% ($p < 0.01$),植被系统严重受损,重度利用的草甸草原通过风蚀每年 4 月上旬至 5 月下旬损失的土壤大约为成土作用的 83.0 倍左右,即每年每 hm^2 草地损失土壤约 83.0 t.

(4)草甸草原区的免耕农田由于完全失去植被的保护,每 min 大风(25 m/s)造成的土壤风蚀量达到 $682.1 \text{ kg}/\text{hm}^2$,接近 1 a 的土壤平均生成量.

致谢:感谢农业部保护性耕作研究中心李洪文教授、毛宁老师、王树东老师在风洞试验过程中的指导以及呼伦贝尔草原监察所朱丽博博士在植被调查中的帮助.

参考文献:

[1] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. Science, 1995, 267: 1117-1123.

[2] 许中旗,李文华,闵庆文,等.典型草原抗风蚀能力的实验研究[J].环境科学,2005,26(5):164-168.

[3] Shi P J, Yan P, Yuan Y. Wind erosion research in China: past, present and future[J]. Progress in Physical Geography, 2004, 28(3): 366-386.

[4] Palmer M, Bernhardt E, Chornesky E, et al. Ecology for a crowded

planet[J]. Science, 2004, **304**: 1251-1252.

[5] Woodruff N, Siddoway P. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society American Proceedings, 1965, **29**(3): 602-608.

[6] 刘玉璋,董光荣,李长治.影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究[J].中国沙漠,1992, **12**(4):41-49.

[7] Dong Z B, Liu X P, Wang X M, *et al*. Experimental investigation of the velocity of a sand cloud blowing over a sandy surface[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, **29**: 343-358.

[8] 陈渭南,董光荣,董治宝.中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J].地球科学进展,1994, **9**(5):6-11.

[9] 凌裕泉,屈建军,金炯.稀疏天然植被对输沙量的影响[J].中国沙漠,2003, **23**(1): 12-17.

[10] 刘小平,董治宝.直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J].中国沙漠,2002, **22**(1): 82-87.

[11] Dong Z B, Gao Sh Y, Fryrear D W. Drag coefficients and roughness length as disturbed by standing vegetation [J]. Journal of Arid Environments, 2001, **49**(3):485-505.

[12] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996, **16**(4):442-446.

[13] 董治宝, Fryrear D W, 高尚玉.直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J].中国沙漠,2000, **20**(3):260-263.

[14] 张春来,邹雪勇,董光荣,等.植被对土壤风蚀的风洞实验研究[J].水土保持学报,2003, **17**(3):31-33.

[15] 任继周.草业科学研究方法[M].北京:中国农业出版社,1998. 15-16.

[16] Chepil W S, Woodruff N P, Siddoway F H, *et al*. Vegetative and nonvegetative materials to control wind and water erosion [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1963, **27**(1): 86-89.

[17] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport sand on vegetated surface[J]. Earth Surface Processes and Land forms, 1986, **11**:505-514.

[18] Stephen A W, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1993, **17**(1): 50-68.

[19] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.关于人为地表结构破损与土壤风蚀关系的定量研究[J].科学通报,1995, **40**(1):54-57.