内蒙古半干旱草原土壤－植被－大气相互作用综合研究*

吕达仁

（中国科学院大气物理研究所，LAGEO，北京，100029）

陈佐忠　　陈家宜

（中国科学院植物研究所，北京，100093）　　（北京大学物理学院大气科学系，北京，100871）

王庚辰　季劲钧　陈洪滨　　刘钟龄

（中国科学院大气物理研究所，LAGEO，北京，100029）　　（内蒙古大学资源研究所，呼和浩特，010021）

摘　　要

为深化对中纬度半干旱草原气候－生态相互作用过程、机制及其对全球变化的响应与贡献的认识，一项名为“内蒙古半干旱草原土壤－植被－大气相互作用（IMGRASS）”的基金重大项目于 1997～2001 年在内蒙古锡林郭勒草原执行。IMGRASS 计划在 1998 年草原生长季节在所选定的以典型草原为主，包括草甸草原、稀疏沙地草原等在内的中尺度试验区开展了多点、多要素的综合观测。观测内容包括土壤、植被、大气的相关要素和发生于地-气界面的潜热、感热通量，还包括 N_2O，CH_4，CO_2 等微量气体交换量、辐射与降水分布。除 1998 年中尺度观测试验外，1999～2001 年在代表性地点进行了微量气体收支、遥感和沙尘天气相关的专项观测，结合草原站已进行的长期监测资料，分析气候－生态长期相互作用，特别是人类活动干预的影响。在分析观测结果的基础上，对该地区的气候－生态相互作用进行了数值模拟研究。文章简要介绍 IMGRASS 计划目标和初步成果，包括：计划目标与实验区背景；半干旱草原不同地表陆气相互作用特征；浑善达克沙地及其沙尘气溶胶特征；半干旱草原温室气体收支与碳循环测量分析；人类活动干预下半干旱草原生态退化与恢复演替规律；半干旱草原的遥感测量。

关键词：陆气相互作用，IMGRASS，半干旱草原，沙漠化，温室气体，中尺度模拟，BAHC，气候－生态相互作用。

1　IMGRASS 的科学目标与背景

全球变化研究是 20 世纪 80 年代中期以来国际地球和生命科学界共同关注的研究前沿，已经形成了以 4 大计划（WCRP，IGBP，IHDP，DIVERSITAS）为总体框架的全球变化研究计划，并在执行中对总体目标与各项具体核心研究计划的构成进行协调。从全球变化研究开展以来突出的一点是，科学界更为强调气候、环境、生态和人类活动之间高度复杂的相互作用和对人类活动引起的全球变化过程的干预作用。这些相互作用及其人类活动干预体现于地球系统的各层圈之间的各种过程。其中陆面过程，即水文过程和土壤－植被－大气相互作用及其对全球和区域的气候、环境和生态系统各自的响应和反馈是最基本的前沿问题之一。在全球变化研究的各核心计划中，WCRP/GEWEX，IGBP/BAHC 以及IHDP/LUCC 3 个核心计划均与此密切相关。十几年来各国和国际合作已经执行了以上述 3 个核心计划之一为主的大量实验计划。中国科学界对此也已有积极的投入[1]。其中 HEIFE 计划对西北地区黑河流域沙漠、戈壁、绿洲的陆气相互作用进行了系统的研究[1]。陆气相互作用研究的重要特点是，

* 初稿时间：2005 年 8 月 8 日；修改稿时间：2005 年 9 月 2 日。
资助课题：国家自然科学基金重大项目（49790020）和中国科学院重大项目（BKZ951）。
作者简介：吕达仁，1940 年生，研究员，从事大气物理，大气遥感与全球变化等方面研究。

陆地地表的不同气候-生态类型在相互作用的过程与陆气交换量的强度与季节变化方面有巨大的差别。因此,需要在具有代表性的各类陆地生态系统区域进行野外实验,以取得对过程的认识和对交换量的模式参数化。中纬度半干旱草原是全球陆地生态系统的主要类型之一,在中国也是主要的地表类型之一,从东北、内蒙、到西北广大地区均有分布,同时又是中国少数民族和边疆区域经济社会可持续发展的重点关注地区。由于人口的急剧增长,不合理的农垦和严重的过度放牧已经造成草原生态系统的退化。在全球变暖的大背景下,这种人类活动干预所造成的生态恶化更为严重,并引发新的沙尘暴源和更频繁的沙尘环境灾害。这类现象不仅在中国,在许多发展中国家所处的中纬度半干旱草原开发中均有类似情况。因此,对这类地区进行重点研究,是全球变化中的重要问题之一。

在国家自然科学基金委员会支持下,针对上述需求,开展了"内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)重大项目研究[2],选择内蒙古锡林郭勒草原作为开展中纬度半干旱草原气候-生态相互作用的研究实验基地。由于该区域已有中国科学院草原生态定位站科学工作者有关草原生态较长期的野外观测,建立了良好的研究和科研支持的条件,使这一项目的开展得以顺利进行。IMGRASS计划于1997年开始执行。原定计划4 a。2000年由于华北沙尘暴天气突发增强,2001年该计划延长1 a,开展沙尘暴有关专题研究。

IMGRASS以中纬度温带半干旱草原的气候-生态相互作用为研究主题,涉及气候生态相互作用的几个主要方面。这里至少包括两个层面:(1)典型草原土壤、植被系统与大气之间交换的定量关系、控制因子和过程分析;(2)自然过程与人类活动共同作用下的草原生态系统变化及其对全球变化的响应和反馈。就锡林郭勒草原(包括浑善达克沙地)区域而言,至少包含以下几个方面:草地/沙地的形成与季风气候的关系;在人类活动与气候变动影响下的草地生态系统与生产力变化;草原的中小尺度水循环;草原的碳循环与草地温室气体源汇作用及其对全球变化的贡献。上述几方面的问题都是全球变化与区域响应中的重要问题。为了对上述科学目标进行研究,必须采取区域性的综合观测实验、在代表性地点进行气候与生态的长期监测、开展过程分析与数值模拟相结合的综合研究。

基于上述要求,我们选择了已有较长期定位观测的中国科学院草原生态定位站及所在的锡林郭勒典型草原区域作为实验区。该区域具有中纬度半干旱草原的代表性,具备典型草原的生物多样性、地表类型(草原、沙地)与地形的中等程度的复杂性(图1,2)。

IMGRASS地面综合观测选择的实验区处于锡林河流域及周围地区。有关该区域的详细情况可参考文献[3~5]。在IMGRASS的计划介绍论文[6,7]中也有介绍,这里简要概括如下:

中心实验区所在的锡林河流域处于内蒙古高原东部,东接大兴安岭西麓低山丘陵地区,南接昭盟玄武岩高原,地理坐标43°26′~44°39′N,115°32′~117°12′E,面积超过10,000 km^2。区域内东南高西北低,从海拔1500 m降至900 m。地形为多山丘陵,坡度较缓,相对高差低山不大于300 m,丘陵30~150 m。实验区中还有盐碱地和风沙带。这是具有中等复杂性的地形地貌。区域内有总长为175 km的内陆河——锡林河,从东南山麓发源向西北流并消失,年平均流量为23.5×10^6 m^3,流域面积不足4000 km^2。实验区东南有达里诺尔湖,面积约为1.68 km^2,是区内唯一较大的湖泊。实验区土壤总体具有地带性,从东南向西北由黑钙土、暗栗钙土、淡栗钙土逐渐过渡。本区土壤的一个重要特点是存在深度较浅的钙积层,使土壤浅层水与深层水相隔离。实验区主体处于典型草原带内,东边有草甸草原,西北部则临荒漠草原带,区内有锡林河流经,南部有浑善达克沙地疏林草原。植被类型具有多样性和复杂性。区内天然植被占总土地面积的96.4%,其中草地植被约占90%,该区植被的生产力由于水热同季,相对较高。生产力与降水量有密切关系。另一个重要特征是地下生产力较地上生产力大得多[5]。这对了解该区的碳循环有重要价值。

该区属温带大陆性季风气候,四季分明,冬季严寒漫长,年平均气温仅1 ℃,气温年较差与日较差均很大,夏季有长日照。降水集中于6~8月,占年降水60%~75%,降水的年际变化极大,比值达3.8,年降水量从东南的350 mm降至西北不足250 mm,气温则从西北向东南递减,春季大风日多,年平均沙尘暴日为8.4 d,但与降水一样,沙尘日数与强度有很强的年际和年代际变化[6]。

该区域在1950年以前基本无人类活动,1950年居民为20人,而目前已有10,000人以上。草原

的载蓄量迅速增加,草地农垦亦有一定规模,已经构成对草原退化和沙化的严重压力。到 20 世纪 90 年代末期,草原和浑善达克沙地的生态退化已经极为严重,并成为华北春季沙尘灾害的新的重要威胁。

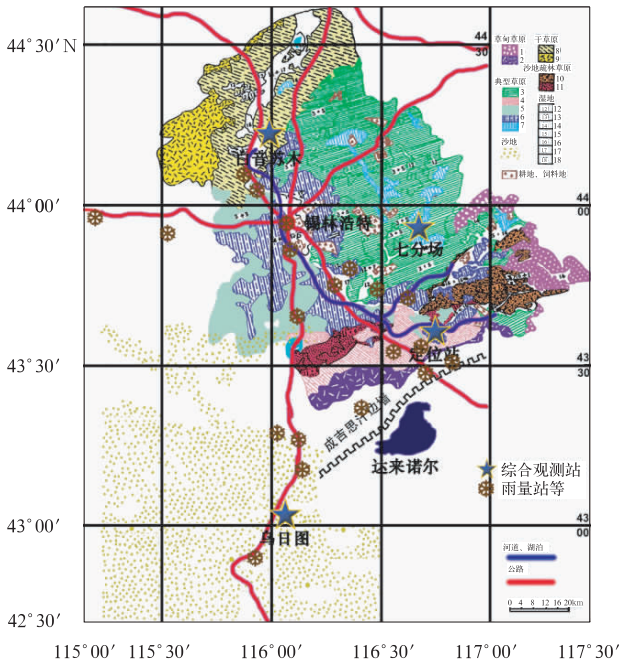


图 1　实验区锡林河流域的植被分布图[5]

Fig. 1　Vegetaton map of the experimental area－Xilin river basis[5]

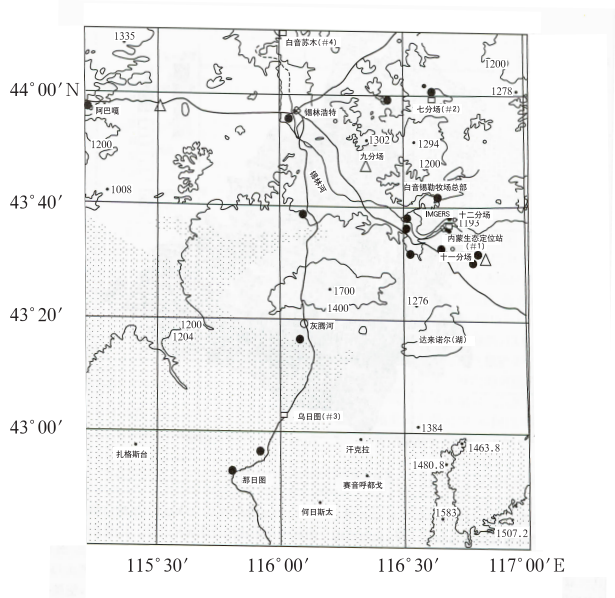


图 2　IMGRASS 中尺度实验布局图

(□－核心站,△－自动气象站,○－测雨雷达,●－雨量自记点;图中标有地形高程)

Fig. 2　Map of IMGRASS mesoscale experiment

(□－core station, △－automatic meteorological station, ○－meteorological radar, ●－automatic raingauge; topography is marked)

2　IMGRASS 野外综合观测和数据库建立

2.1　综合观测与后续观测

IMGRASS 野外观测包括 1998 年 5～9 月的中尺度区域综合观测及 1999～2001 年的单点继续观测,其中 2001 年春季开展了浑善达克沙尘气溶胶观测。综合观测布局见图 2。

中尺度实验由 4 个主要的土壤－植被－大气边界层综合测量点、3 个自动气象站、利用锡林浩特常规探空和低空探空点、约 25 个降雨自记点、1 个双波长测雨雷达站、若干项特殊观测组成。观测的时段为 1998 年 5 月初～8 月底,代表一个完整的生长季节。在此期间,选择 3 个时段进行加强期观测,分别代表生长初期(5 月)、盛期(7 月)和成熟期(8 月)。加强期的观测将提供中尺度和其他模式的较为完整的验证。

土壤－植被－大气边界层综合测量点选择图 2 中实验区的 4 个方向,代表自然状况保持完好的羊草草原(东北方,七分场)、具有多样性代表性的典型草原(东南方,定位站)、沙地稀树草原(西南方,乌日图)、干草原(西北方,白音苏木,典型草原中的干旱类型)。在这些点上开展了系统的土壤理化要素、土壤水分和温度、植被生理和生产力、地-气间的水、热、动量和辐射通量、大气和地表辐射、地表和大气边界层气象等要素的综合观测。

为获得加强期对流层中下部的气象场。除锡林浩特常规探空站外,在七分场上开展了低空探空,在乌日图开展 GPS 导航微型飞机的低空探空,由于实验区中等复杂的地形和明显的高度、植被类型、温度、降水的梯度,为获得尽可能真实的地表气象场,除边界层观测点外,在区域内增加布设 3 个自动气象站,以获得温、湿、压、风、地温、辐射、降雨等地面气象数据。

为获得区域内的雨量和雨强分布,将布置以 3 条线为主的雨量自记仪网,即沿张家口—锡林浩特南北向公路沿线,从阿巴嘎旗—白音锡勒牧场 7 分场的东西一线,从实验区东南角嘎松山向西北锡林浩特之间靠近锡林河沿岸一线。由此了解降雨分布与地形、植被中尺度分布的关系。在灰腾河站架设 X/C 双波长测雨雷达,以观测实验区 100～150 km 内的降雨分布,以此与雨量自记仪网配合,形成实验区降水强度的较高密度的测量。

在每个综合测量点每隔 10 d 进行土壤水分垂

直分布、植被生理参数、叶面积指数、生物量等配套测量。此外，在各典型植被区域，如羊草样地、大针茅样地、退化草场等地开展温室气体排放和有关碳循环的测量。

为了解该区域的大气气溶胶、大气水汽和云水、地表(双向)反射率，为卫星遥感反演地表和大气参数、大气辐射传输等提供定量订正与验证根据，我们先后开展了一系列大气和地表的光谱测量。对气溶胶还建立了直接的采样分析。

在1998年综合观测以后，1999～2003继续在定位站进行了温室气体收支、微型飞机观测与遥感等不定期观测。2001年春在浑善达克沙地开展了沙尘气溶胶综合观测。

2.2 IMGRASS数据库的建立

以1998年IMGRASS中尺度综合实验的多点多要素地面观测数据为主体，我们已经建立了IMGRASS实验数据库。数据库的结构采用Windows NT平台的SQL Server结构，可以用专用软件或直接由互联网访问数据。数据库中存有经过初步质量检验的各种观测数据供调用，对于一些时间序列或垂直分布的要素变化有图形显示辅助分析。所建数据集包括如下几类：

大气要素　自动气象站观测、边界层系留气球探空、微型飞机探空、低空探空、大气与地表多波段辐射、降水分布、大气气溶胶测量；

地气交换通量　地表湍流温度、风脉动记录、波文比、N_2O、CH_4、CO_2通量；

土壤与植被测量　土壤温度、土壤湿度、土壤微生物、植物群落调查、叶面积指数、生物量、地表反射率；

此外，部分相关的区域气象资料、卫星资料和微型飞机航拍资料亦将收集其中。以上IMGRASS数据库将向国内外研究人员提供作进一步研究。

3 半干旱草原不同类型地表的陆气相互作用特征

3.1 不同地表边界层变化的观测

图3给出定位站典型草原边界层日变化的一个个例(1998年8月20日)。可以从中清晰看出边界层温度层结的变化过程。在近地表至离地面200 m，日变化振幅分别达到16 ℃和8 ℃。而离地面300 m以上直至观测最高点900 m处等温分布，日变化振幅约6 ℃，各高度呈同步变化。逆温的建立与消失分别出现于约19时和09时，而逆温发展最高高度约400 m，强度达－8.5 ℃，呈单层逆温型，这是由于草地地面相对均匀形成的。

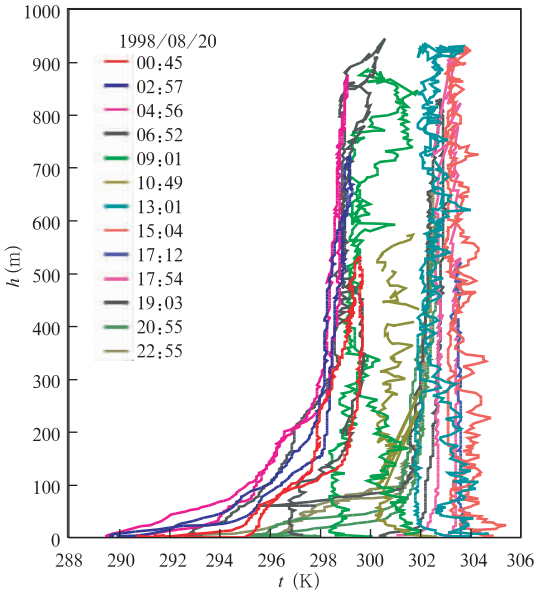


图3　定位站晴朗天气边界层温度层结日变化的系留气球探测(1998/08/20)

Fig. 3　Tethered balloon-borne observation of clear day boundary layer temperatureprofile over typical steppe

图4是在沙地草原站乌日图用GPS导航微型飞机所测1998年5月26日早、中、晚3次飞行探空的结果。该日早上有云，云底离地约400 m，中午消散，近地层出现很强的超绝热层结，而在其上层结稳定，相对湿度线性增加。注意到该日风速(v)在离地约1200 m高度出现从早上8 m/s到中午大于16 m/s风速变化。用系留气球既不可能进入云内探测，更不可能在16 m/s风速下测量，而微型飞机实现了这类在内蒙草原经常出现的较强风天气下的边界层探测。有关半干旱草原大气边界层日变化的中尺度实验模拟将在另文介绍。

3.2 半干旱草原地表不均匀性对地气通量和水量平衡的影响

中尺度地表覆盖不均一引起的地表能量、水分和物质通量的差异对大气边界层，乃至局地气候的影响是区域气候和环境研究的重要课题，也是气候模式中次网格尺度地表过程参数化的难点所在。内蒙古草原试验区对不同地表类型进行了同时的强化观测，为研究这一问题提供了若干基础数据。这里则利用几个测点不同类型草地的1998年夏季试验

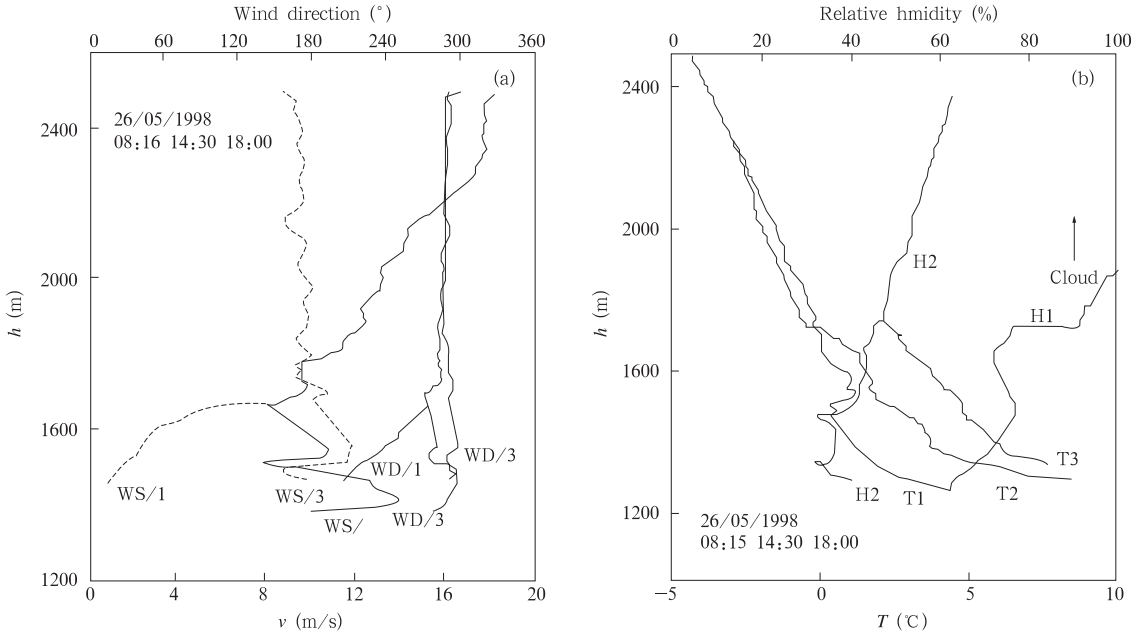


图 4　沙地草原乌日图站边界层温(T)湿(H)风(WS 表示风速，WD 表示风向)的微型飞机探测

Fig. 4　Miniature UAV observation of boundary layer atmospheric profiles oversandy land

期的观测资料为例结合陆地表面过程模型(AVIM)[8]对地表的水热通量作一个初步的分析。

选取试验区中 3 个不同类型的草地测站，即灰腾河(43° 16′ N，116° 07′ E)，七分场(43° 57′ N，116°38′E)和嘎松山(43°30′N，116°49′E)，彼此相距约 30～40 km，分别属于荒漠与草地过渡带，典型草原和草甸草原，年平均降水量在 300～350 mm，表面土壤为暗栗钙土，灰腾河在较薄的土层下是透水性很好的沙壤。资料时段是自 1998 年 7 月 11 日至 8 月 1 日，共 22 d。所用的 AVIM(Atmosphere－Vegetation Interaction Model)模式是一个包括土壤－植被－大气之间物理和生理生态过程的陆面模型。主要由 3 个部分组成，即描写地表面物理状态和辐射、热量和水分传输过程的物理模块；描写植被生长过程的生理模块和由植被形态参数确定物理参数的模块。气候和土壤状况影响植物生长，植被形态和生理反过来影响土壤植被与大气之间的物质和能量的交换，形成了一个双向反馈的系统。在已知大气状态变量和土壤、植被类型后，可以得到植物生长状况，土壤和植被冠层的物理状况和地气间能量、水分和二氧化碳的通量。

先以灰腾河站实验期 1998 年 5 月 20 日至 8 月 10 日共 83 d 由 AVIM 计算的地表各通量的变化说明半干旱草原夏季地表水分和热量交换的特点。图 5 是灰腾河观测的太阳短波辐射、日降水量和计算所得到的地表净辐射、感热和潜热通量。从5月至

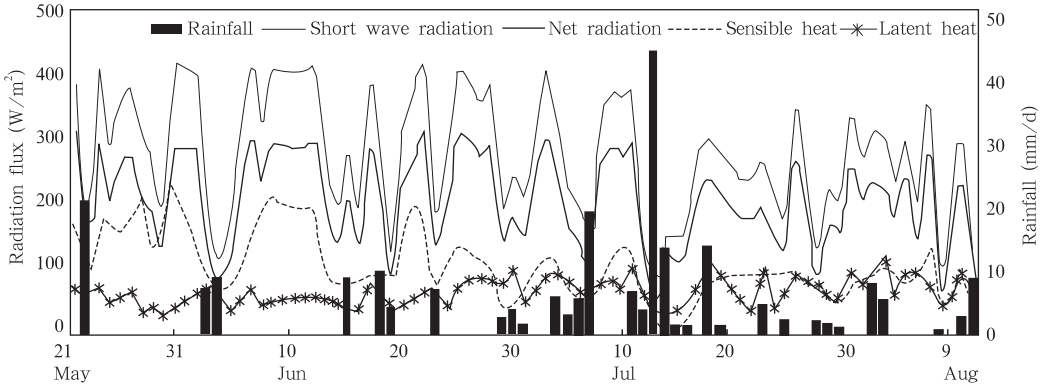


图 5　灰腾河 1998 年 5 月 21 日～8 月 20 日 AVIM 模式通量模拟结果

Fig. 5　Simulated fluxes of Huitenhe during 21 May－20 Aug, 1998 with AVIM model and meteorological observation

8月有明显的季节变化。自5月下旬至7月上旬，因雨季未到，云量少且变化不大，总辐射和净辐射没有很明显的变化，分别为400 W/m² 和300 W/m²左右。7月中旬以后由于雨季开始，云量明显增多，总、净辐射降到300 W/m² 和200～250 W/m²。5和6月份感热通量占净辐射的70%以上，6月以后逐渐下降，而潜热逐渐增大，5和6月约为50～60 W/m²，6月下旬开始上升，7月以后与感热相当。这一变化趋势与降水增多、土壤湿度加大有关。同时草地覆盖度和叶面积指数增大，使蒸腾加大是重要原因。这一时段草地地表能量水分通量的分配和变化反映了半干旱草原夏季的一般情况，但草地内部仍存在着不均一性。

分析3个不同地表类型点上地表水量平衡各分量的气候平均特点和差异(图6)，表明，嘎松山位于实验区东南面的山坡上，降雨较多，是草甸草原。7月地上生物量接近最大值(通常8月最大)，七分场和灰腾河次之。灰腾河植被覆盖相比稀疏，不足30%～40%，其他两站覆盖度在80%以上。在1998年7月中下旬，3站降水没有明显差别。其中大部分降水量以蒸散形式输送给大气，灰腾河占50.7%，七分场占90%，而嘎松山占86.9%。这与锡林河流域夏季总的蒸发、降水关系是一致的，在半干旱草原是很典型的。但灰腾河蒸散显然低于其他2站。在蒸散中又以叶面的蒸腾为主，灰腾河、七分场和嘎松山的蒸腾分别占降水的33%，53.5%和59.6%。这是由于草原覆盖度的差异形成的。其次，灰腾河降水中相当一部分降水增加了表层土壤的含水量和下渗到深层，分别占降水的23.9%和19.0%。而七分场和嘎松山的土壤含水量只有很小的变化，而且还有少量深层水上升，补给地表的蒸腾，这是很大的差异。这两站的地表径流分别为降水的7.3%和11.4%。

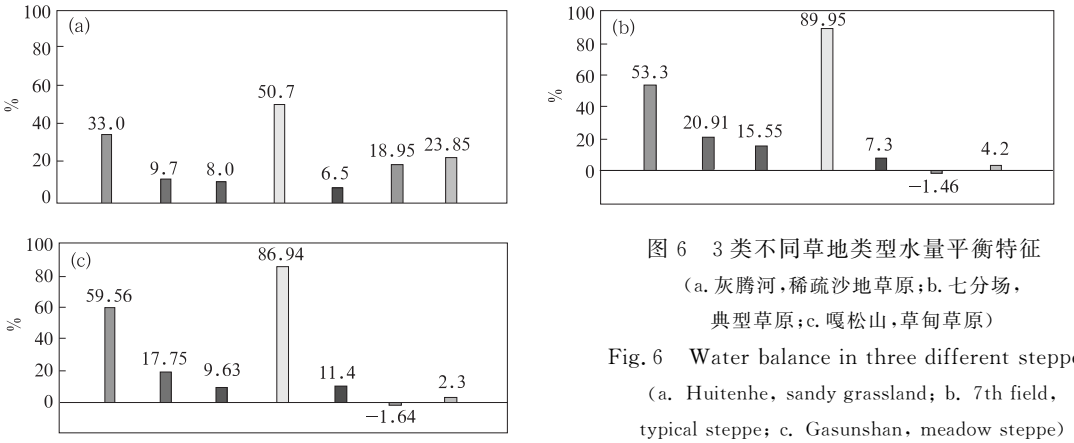


图6 3类不同草地类型水量平衡特征
(a.灰腾河，稀疏沙地草原；b.七分场，典型草原；c.嘎松山，草甸草原)

Fig. 6 Water balance in three different steppe
(a. Huitenhe, sandy grassland; b. 7th field, typical steppe; c. Gasunshan, meadow steppe)

由上可见，在相距数十公里的地区，因为土壤地表植被覆盖的差异，使地表水量平衡的特点有很显著的不同，这对研究区域尺度的气候和环境是必须加以考虑的。

不同类型地表不仅对地气通量有明显影响，对大气边界层结构，特别是晴天的情况也产生极为显著的影响。在IMGRASS试验区内包含着不同的地表类型，其中最为明显的是典型草原和沙地草原2类。在观测的基础上，开展了以中尺度数值模式NCAR MM5为基础的各类陆面通量和边界层结构的模拟。模拟方法是将MM5和法国陆面过程模式NP89为基础，并对冠层内部叶片的遮阳效应进行了考虑。采用IMGRASS预试验期1993年8月17～20日的观测为基础，模拟4个观测点的通量与边界层结构[9]，这里给出主要结论。

(1) 草原生长后期无降水时白天大部分时间潜热通量大于感热通量。草原站08时波文比由负转正，19时由正转负。而沙地站乌日图白天波文比大于1，夜间向地面输送的感热较大，地面向上输送水汽亦较大。与草原点相比，沙地波文比的转折时间分别为07时和20时，即较草原站提前转正，推迟转负。这表明土地类型对通量的影响。其结果与上节用AVIM模式模拟一致。

(2) IMGRASS实验区4个点的边界层结构与变化符合中纬度陆地边界层的演变规律。边界层内温度、湿度和风廓线的对应关系较好，对流交换盛期白天位温和比湿不随高度改变，风速随高度变化也不大。沙地的对流边界层形成比草原早，午后最大混合层高度可达1600 m。陆面类型和土壤水热条件直接影响边界层要素的廓线结构(图略)。

3.3　强降水年草原土壤水分向深层渗漏

1998 年降雨量达到近 25 年来的最大值,由此打破了草原定位站自建站以来从未观测到土壤水向 2 m 以下深层土渗漏的记录,多雨使阻挡水下渗的钙积层出现了渗漏。在定位站由蒸渗仪所测土壤水动态和渗漏速率进展表明(图 7),1998 年 2 m 以下出现渗漏,使 2 m 土体水分在生长季末反而亏损了30 mm(牛海山等,私人通信)。这一测量表明在考虑干旱和一般降水年的土壤水平衡时,不必考虑深层水渗漏[5],但对极端多降水年时则需考虑这一问题。

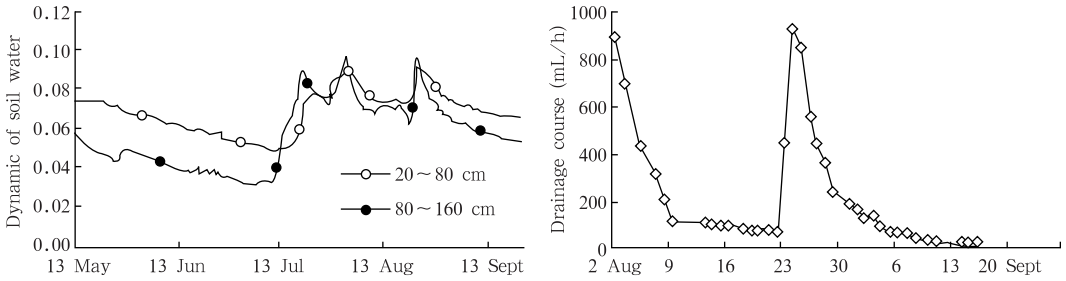


图 7　定位站 1998 年土壤水动态(a)和渗漏速率进程(b)

Fig. 7　Dynamic of soil water(a)and its drainage course (b) of 1998 growing season at typical steppe measured by lysmeter

3.4　草原辐射通量观测

图 8 为定位站所测辐射通量的典型情况。其中图 8a,b 分别是 2 个典型晴天的日变化曲线,包括总入射辐射、反射辐射、净辐射和土壤热通量。可以看出总辐射和反射辐射存在于 4～21 时的长时段,而典型草原上反射辐射占总辐射约 20%。6 月 2 日其值较 5 月 20 日为小,这是由于植被生长的原因。图 8c 则给出 5 月 20 日～9 月 8 日若干典型晴天中午的各分量值。可以看出 7 月初以前总辐射较其后大,而反射辐射与总辐射之比 8～9 月低于前期,净辐射则以 7 月为最强,而热通量则以 7 月以后为强。这既与太阳入射有关,也与因降水而产生的土壤导

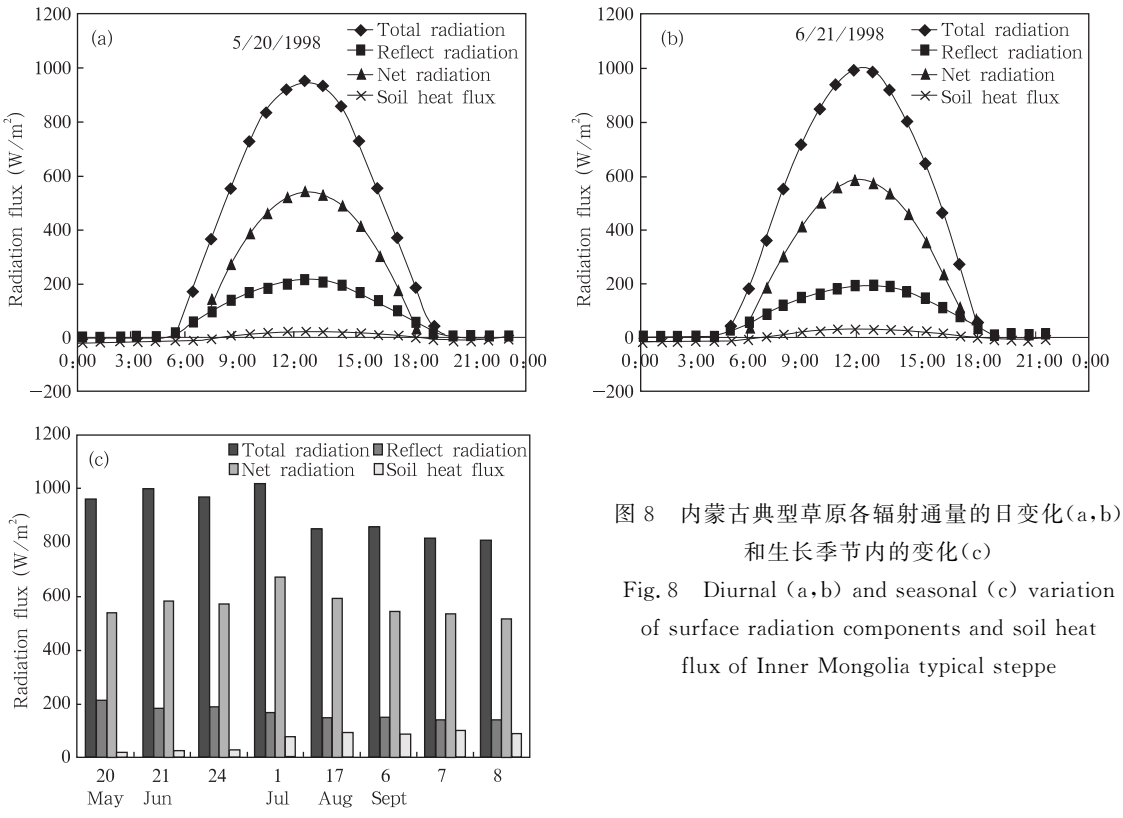


图 8　内蒙古典型草原各辐射通量的日变化(a,b)和生长季节内的变化(c)

Fig. 8　Diurnal (a,b) and seasonal (c) variation of surface radiation components and soil heat flux of Inner Mongolia typical steppe

热率变化有关。

3.5 夏季风与草原夏季降水

试验区的主要降水集中于夏季，特别是 7～8 月，而降水的性质主要是对流性降水。降水形成的对流过程本质决定了该区域地表的地形、植被、土壤状况的非均匀性会促成降水分布的区域特征。由于这一区域的地形分布存在着东南高而西北相对低的格局，而地表特征又是南部存在浑善达克沙地，而北部主体为典型草原，其中的大部分存在着显著的退化，除了这一中尺度宏观特征外，区域内部的小尺度不均匀性亦十分突出。因此研究该地区的夏季降水与水汽通道的典型情况是十分有价值的。为此，我们进行了区域降水的观测，同时又进行了中尺度模式的降水模拟。

试验区的降水观测采用架设于灰腾河(43°16′N，116°07′E)的一部双波长(C/X)雷达和分布于试验区的 25 个自记翻斗式雨量站网进行[10]，以自记雨量站的点记录标校雷达反射率值，再推广用于区域雷达回波强度反演区域降水强度分布。图 9 为 1998 年 8 月 22 日用这两种手段联合获得的日降水量分布。当日在东北低涡天气形势下，出现了混合型降水。从早到晚雷达观测的雨区从西向东移动(图略)，日降雨量中心集中在雷达站西北、东北与东南。其中以东南为最强。

该个例为一次典型的低涡降水，针对此个例，我们利用由美国俄克拉荷马大学的 ARPS(Advanced Regional Prediction System)模式进行了中尺度降水模拟。本模拟所采用的模式修改版本由中国科学院大气物理研究所与俄克拉荷马大学合作完成。数值模拟中采用三重嵌套，各层模拟中的水平格距分别为 20 km，10 km 及 5 km。输入真实地形及植被，以 T106 客观再分析资料提供初始场及侧边界条件。同时，我们还用 MM5 中尺度模式作模拟，结果二者基本一致。

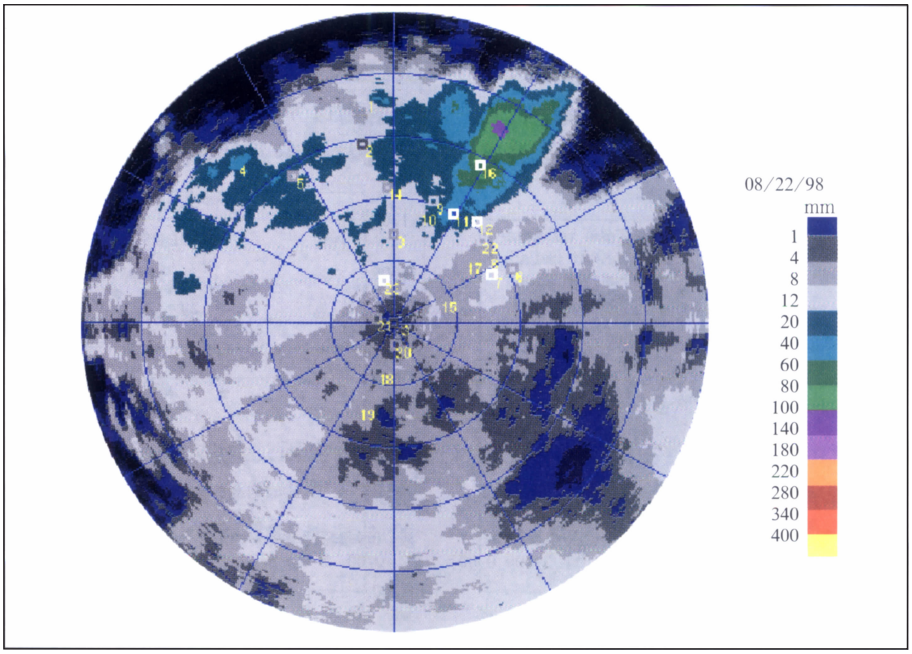


图 9 利用 C/X 波段降水雷达和区域内雨量自记复合获得的降水量分布

Fig. 9 Daily rainfall (mm) of distribution of Aug. 22, 1998 in experimental area obtained by composite retrieval of X/C dual-wavelength radar and automatic raingauge network

从模拟结果中可以看出，在典型的夏季风天气形势下，存在着由南向北的一条水汽通道。这一通道是驱动试验区形成降水的水汽源；图 10 给出了模拟所得 2 个时刻的水汽通量在 850 hPa 的区域分布(a，b)，而(c，d)二图则给出了定位站和乌日图二站水汽通量密度的垂直分布的时间变化过程。

降水的区域分布中地形起着十分重要的作用。在模拟结果(图 11)中，降水更多分布于东南相对高而地形复杂的区域，这与该区域降水分布趋势是基本相符的。模拟的降水分布与图 9 雷达降水能量所

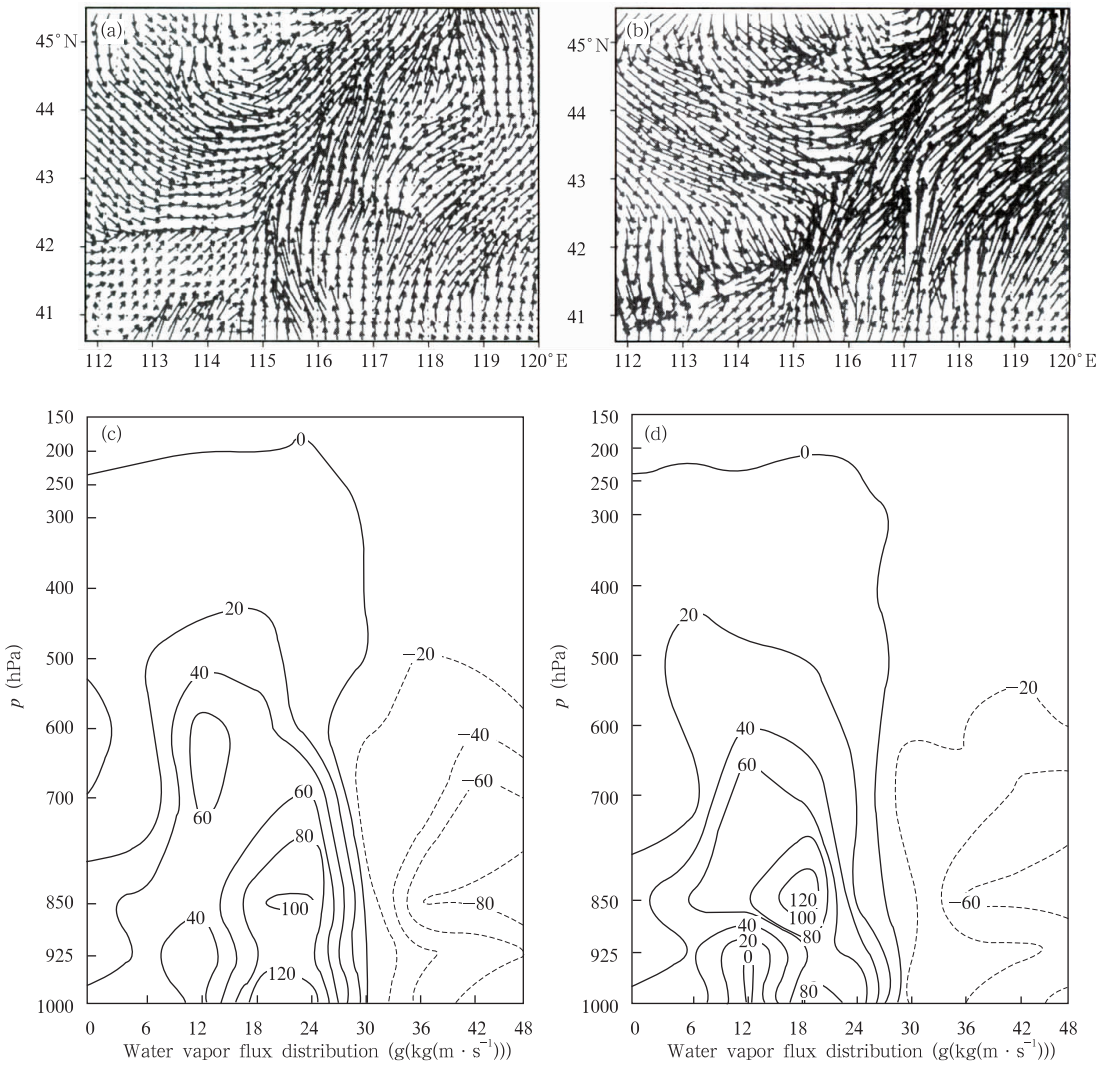


图 10　用 MM 5 模式模拟的 1998 年 8 月 22 日实验区上空水汽通量密度分布

(a,b. 00 和 06 时的 850 hPa 高度水汽通量密度分布,c,d. 定位站和乌日图上空水汽通量密度廓线的时间变化)

Fig. 10　Simulated water vapor flux distribution in experimental area of Aug 22, 1998 with MM 5 mesoscale model (area water vapor flux at 850 hPa for 00:00 (a) and 06:00 (b), respectively; time variation water vapor flux profiles over two sites, Dingweizhan (c) and Wuritu (d))

得分布相当接近。

4　浑善达克沙地沙尘暴及沙尘气溶胶特征

处于实验区南部的浑善达克沙地是一个独特的温带稀树草原区,是风积沙覆盖在高平原上的东西伸展的沙地。从东部的草甸草原向西伸展到荒漠草原,长度达 260 km,南北宽约 50～100 km。沙地内部由于其原始地表的复杂性,存在着风成沙丘与丘间低地(塔拉),并有大小不等的湖泊。沙地内土壤类型多样,包括沙质草甸土和风沙土以及半固定流动半流动沙丘。相应地植被类型也极为多样,包括稀疏树木、灌丛、草甸、直至流动半流动沙丘上的一年生先锋植被群落,其土壤植被与大气的相互作用本身就不同于相对平坦的典型草原。更重要的是该地带中存在大量流动半流动沙丘,从而在春季成为华北地区一个重要的沙尘源。在本项目执行前对这方面未有过系统的观测研究。IMGRASS 通过野外观测与数值模拟分别了解了沙地的水土、植被特征、沙尘气溶胶的理化特征,对华北上空沙尘气溶胶的可能贡献,并对于冬季风驱动形成沙地进行了初步的数值模拟研究。

4.1　沙地的土壤水分分布特征

研究组在沙地中部乌日图作 2 条分别为东北－西南和北－南走向的样线,长度各约1000 m,跨越

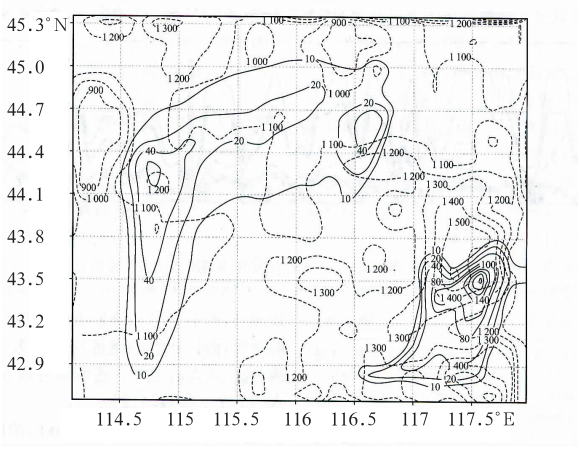


图 11 1998 年 8 月 22 日 24 h 降水(实线)及地形高度(虚线)的 ARPS 中尺度模式模拟结果

Fig. 11 Simulated daily rainfall distribution (solid lines) of 22 Aug, 1998 with ARPS mesoscale model (topography is marked as dashed lines)

代表性地表类型,在 5～9 月每 10 d 进行一次地表至 110 cm 共 9 层的土壤水分测量,并作相应植被调查,由此获得了沙地内各典型地表类型的土壤水分分布特征。表 1 给出了几个地形部位的平均土壤水分及其离散度,即空间不均匀性。从测量结果可以看出,土壤水分是按丘间低地、北坡、丘顶、南坡依次降低。值得注意的是北坡各点的土壤水分随坡度大小而变化,当坡度小于 10°时,水分随坡度增加而减小,而当坡度大于 15°时,水分随坡度增加而增大。这显然与北坡日照与其坡度大小有关,当坡度小时,直接日照起重要作用,而坡度大于 15°时,在此纬度区北坡不再有直接日照,这可能是水分随坡度增大的一个可能因素。土壤水分与植被盖度与植被类型的相关测量与调查也发现其间有密切的相关性。土壤水分与植被盖度有明显的正相关,即盖度大的地点土壤水分大,但对低地和沙丘两者表现出不同的定量关系。低地表层土壤水 W(%)与植被盖度 P 之间的统计关系为 $W=3.88\exp(1.66P)$,$R^2=0.454$,而对沙丘则有 $W=-4.65P^2+11.59P+4.79$,$R^2=0.372$。而更值得注意的是各类地形、土壤含水量与植被类型有密切的相关性。例如低地草甸植被,表层土壤含水平均为 18%,高沙丘北坡生长灌丛,表层土壤水达平均 12%左右。沙丘南坡生长冷蒿等,土壤水分平均 7%。半流动风沙土上生长斑块状沙蒿等,表层水为 4%。上述结果为利用遥感植被与遥感土壤水分提供了一个很好的相关分析手段。

表 1 浑善达克沙地不同地形部位的土壤湿度[11](%)

Table 1 The soil moisture on distinct landform position in Hunshandake sandy land(%)

地形部位	样线 1(7 月 20 日)	变化范围	样线 2 (8 月 12 日)	变化范围
丘顶	5.49±1.65	9.58～3.23	8.22±2.58	13.00～4.77
南坡	6.09±2.37	11.58～0.55	6.56±1.71	13.30～3.60
北坡	8.86±6.72	30.94～2.64	9.79±3.79	24.73～3.72
丘间平地	13.09±6.02	39.05～3.65	10.34±3.64	19.97～4.96
总平均	9.09±5.77	39.05～0.55	8.63±3.47	24.73～3.60

对沙地中一个低沙丘沙蒿群落点的土壤水分在整个生长季节的动态(图 12)分析表明,该沙地生长前期土壤较干,随后在波动中上升,8 月中旬达到最高,随后下降,直至 9 月。各层土壤水的动态特征在此总趋势下仍有明显差异,以表层土变动最大,而以 20～50 cm 层在 6 月中下旬达极低值,这显然与植被根系在此深度的吸水有关。在底层土 70～110 cm,9 月份含水明显高于 5 月初,这一动态与草原的降水周期有关。

4.2 沙地沙尘气溶胶的物理与化学特征

2001 年 4～5 月在沙地中心地区桑根达来(42°41′N,116°57′E, 海拔 1326 m)与沙地西北边缘东苏两个地点开展了沙尘气溶胶的实地测量,时间共 2 周。测量采用了 PMS FSSP100 激光粒谱仪,还采用气溶胶滤膜采集器分别在离地 1.5 和 8 m^2 个高度进行了采集。所收集的气溶胶按 PM10,PM2.5与 PM1.0 分别进行元素成分分析,同时进行了地面气象和辐射观测。有关沙尘气溶胶的基本特征在这里作一介绍,详细的分析可见文献[12]。

4.2.1 沙尘气溶胶的浓度与粒谱特征

(1) 浓度特征 所进行的 2 周观测(晴朗无沙尘天气每 4 h 测量 1 次,沙尘天气每小时测量 1 次,包括了极晴朗天、弱沙尘与强沙尘天,其单次测量粒子浓度(直径 0.5～100 μm 范围)变化范围达 400 倍,

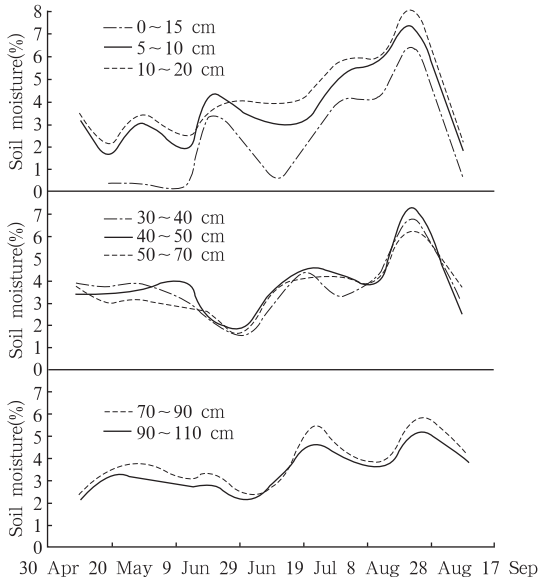


图 12　浑善达克沙地半固定风沙土壤湿度动态[11]

Fig. 12　The dynamic of soil moisture on semi-fixed dune in Hunshandake sandy land

即最洁净时刻浓度为 13.9 个/cm³,而最大浓度达 5776 个/cm³。最洁净天的日平均值为 23.8 个/cm³,强沙尘暴日平均为 1079 个/cm³,日均变化超过 40 倍。其最低日平均值与宁夏贺兰山地区的背景值(23.0 个/cm³)非常接近,这代表了中国西部沙尘源区在洁净状况下的大气气溶胶浓度本底值。

关于沙尘气溶胶数浓度的变动特征也是十分值得注意,不同沙尘天气的浓度变动范围无论绝对浓度变动最大达 3 倍,弱沙尘日变动达 16 倍,而强沙度值还是相对变化均随沙尘强度而增大。洁净日浓尘日变动超过 100 倍。这充分反映在沙尘源区其沙尘气溶胶具有极强的阵性,这一情况提出一个重要的问题,即估计起尘量时必须有足够密的时空采样密度,否则会导致严重的误差。

(2) 粒谱特征　表 2 为从洁净到强沙尘 4 个不同天气的平均分档粒谱分布[12]。从表中可以看出,就浓度而言,在所有观测日小粒子均占绝大多数,随着沙尘强度增大,大粒子的比例相对增加更快。从粒子总浓度与粒谱特征看,浓度小于 360 个/cm³ 的晴天与轻微扬尘天其粒谱呈单峰结构,而中等以上扬尘与沙尘天气则呈现明显的双峰结构。用单或双对数正态分布可以较好地拟合粒谱面积谱和体积谱特征。从浑善达克沙尘气溶胶粒谱与世界多个地点沙尘粒谱的对比看,有不少相似性。但浑善达克沙尘气溶胶中极少有土壤源的小粒子。作为辐射效应最关注的面积谱峰值半径较撒哈拉与中亚沙尘的峰值半径为小。针对气候辐射效应,文献[12]提出了浑善达克沙尘气溶胶粒谱的典型参数。

表 2　沙尘气溶胶数浓度(个/cm³)随粒径(μm)的分布

Table 2　The size-segregated number concentration of dust aerosol

直径(μm)	0.5～1.0	1.0～1.5	1.5～2.0	2.0～3.0	3.0～4.0	4.0～5.0	5.0～6.0	6.0～8.0	8.0～10.0	10.0～100.0	平均浓度
晴天	13.0	6.0	2.8	3.0	2.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	27.8
扬沙	78.7	44.9	23.6	27.3	12.3	7.6	2.1	1.2	0.6	0.3	198.2
弱沙尘暴	263.4	154.6	77.8	81.7	44.0	18.0	9.1	9.7	1.4	2.9	662.8
强沙尘暴	910.6	655.1	398.4	528.6	334.7	107.5	49.1	51.0	4.5	5.5	3044.6

4.2.2　沙尘气溶胶粒子的元素成份特征

利用安德森撞击式采样仪在 2001 年 4～5 月分别在桑根达来、东苏和北京同时进行了 TSP,PM10 和 PM2.5 的采样。采样滤膜为日本产聚四氟乙烯膜,流量 28.3 L/min,采用 ICP-1100 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)分析。表 3 为桑根达来 4 种天气下总颗粒物(TSP)采样的 6 种主要元素含量与相对含量比。同时列出的有东苏(沙地北缘)和北京同期观测结果。

2001 年春季在桑根达来、东苏和北京同时采集大气气溶胶质量浓度与化学元素浓度,12 d 观测期间 TSP 的平均值在东苏为 2.778 mg/m³,桑根达来高地塔高 8 m 处值和地面值分别为 0.545 和 0.366 mg/m³,北京为 0.360 mg/m³。所有站观测中 PM10 含量均超过 TSP 的 61%,而 PM10 中地壳元素(Al,Ca,Fe,Mg,Mn)占 TSP 中相关元素的 65%～86%,而主要污染元素(Pb,Zn,Cu)方面 PM10 占 TSP 的 63%～79%。风速增大引起的沙尘粒子中,包含着当地的栗钙土土壤粒子和风沙土粒子。来源于富钙的土壤中 Ca,Fe,Mg,Mn 和 Ti 的含量更多,而对 Ba 和 K 则情况相反。沙地沙尘粒子中的污染元素 Cu,S,Pb,V 和 Zn 则来自上风方向的远源区,包括上游工业活动(Pb,S)和外部沙尘源(Mo,V,Co 等)[13]。

表3 2001年春在桑根达来、东苏和北京观测的气溶胶质量浓度和元素浓度[13]

Table 3 Mass concentrations and chemical element concentrations in aerosols collected at SD, SZ and Beijing during the field period in spring, 2001

	桑根达来①			桑根达来②			北京①			东苏②
	TSP	PM10	PM2.5	TSP	PM10	PM2.5	TSP	PM10	PM2.5	TSP
无沙尘天(mg/m³)	0.073	0.062	0.028	0.072	0.053	0.036	0.212	0.142	0.081	0.146
有风天(mg/m³)	0.188	0.174	0.102	0.456	0.275	0.120	0.305	0.217	0.108	1.659
弱沙尘天(mg/m³)	0.330	0.282	0.172	0.482	0.354	0.193	0.325	0.262	0.119	3.701
强沙尘天(mg/m³)	4.144	4.128	2.815	0.927	0.584	0.297	0.648	0.444	0.200	14.095
总平均(mg/m³)	0.545	0.522	0.341	0.366	0.226	0.126	0.360	0.254	0.123	2.778
Al (μg/m³)	4.121	3.434	1.842	5.741	3.838	2.215	9.572	6.912	2.628	72.694
Ca (μg/m³)	2.781	2.141	0.897	3.019	2.207	1.310	12.444	8.574	3.059	22.694
Fe (μg/m³)	3.449	2.605	1.079	4.376	3.116	1.786	9.952	6.542	2.008	57.982
K (μg/m³)	1.992	1.712	0.917	2.511	1.786	0.908	6.076	4.014	1.955	29.051
Mg (μg/m³)	1.057	0.852	0.448	1.334	0.958	0.561	3.589	2.533	1.109	16.150
S (μg/m³)	0.523	0.383	0.213	1.204	0.949	0.583	5.525	3.921	2.170	3.663
Pb (μg/m³)	0.032	0.023	0.014	0.061	0.041	0.022	0.320	0.240	0.124	0.164
Zn (μg/m³)	0.137	0.087	0.063	0.034	0.023	0.016	0.440	0.303	0.171	0.307

① 塔高8 m处采样值；② 地面采样值。

4.3 浑善达克沙地沙尘天气的气候特征与控制因子

4.3.1 沙地沙尘暴气候特征

利用浑善达克沙地区域内的11个气象站1961～2000年沙尘暴与扬沙观测资料，分析了该区域沙尘天气的地理分布与季节变化，以及年际和年代际变化[14]。结果表明，近40 a来，沙地东部沙尘暴日趋于减少，而西部则呈现波动式增长。年际与年代际变化趋势与中国北方地区沙尘天气变化趋势一致，这是与大风日数减少有密切关系。而沙地西部沙尘暴日波动式增加则反映了下垫面条件有利沙尘暴发生的恶化状况。图13中列出了沙尘暴日的年

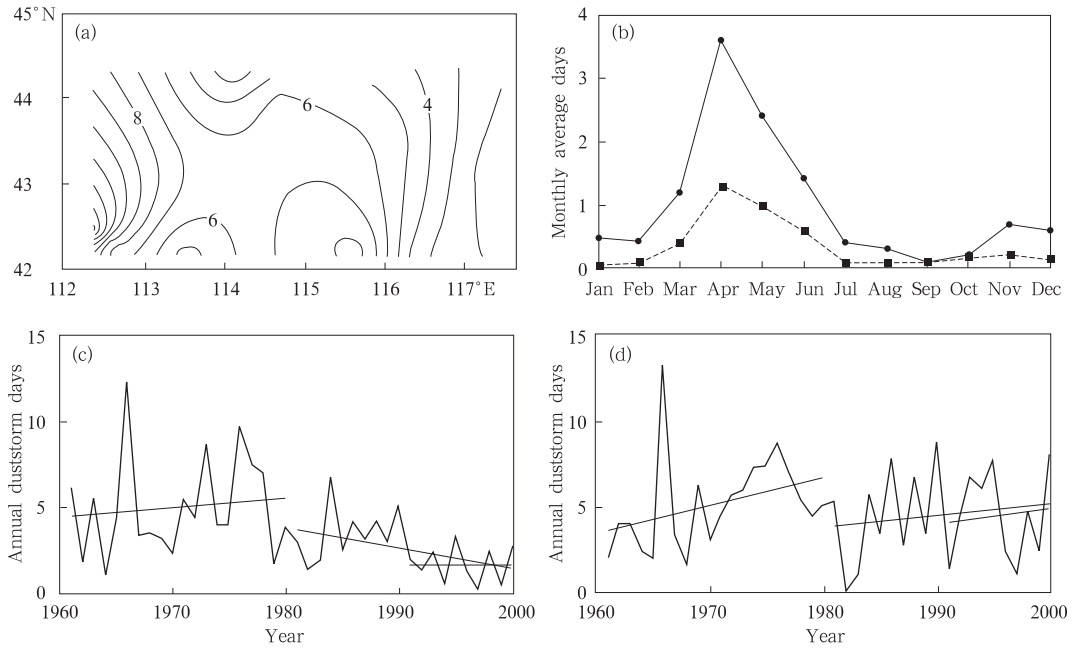


图13 1961～2000年浑善达克沙地沙尘暴天气分布与变化

(a. 年沙尘暴日数分布；b. 月平均沙尘暴日数；c. 东部年沙尘暴日数变化；d. 西部年沙尘暴日数变化)

Fig. 13 Distribution and trend of dust storm events in Hunshandake sandy land

(a. distribution of average annual dust storm days for 1961－1990, b. monthly average of dust storm days for 1961－2000, c. variation of annual dust storm days for eastern part, d. variation of annual dust storm days for western part)

均分布、平均季节分布以及东西两部分的沙尘暴日数变化。图 13(c,d)中的直线代表用不同时段记录拟合所得线性年际变化趋势,从中可以看出明显的年代际变化。

4.3.2　气候因子对沙尘暴频率的影响

沙地沙尘暴频率变化是沙地气候(包括大气温度、风速、降水、土壤水分等)因子的共同作用结果。为了探求气候因子对沙尘暴频率的定量控制作用,我们利用沙地相关的 5 个气象站的气候资料首先建立表征该地区沙尘暴频率年际变化的沙尘暴指数。在用气象要素建立沙尘暴频率指数中我们采用了春季平均风速,风速大于 10 m/s 天数,用冬春温度差与冬季降水组成的回暖指数和由今春降水和前冬降水构成的春季植被生长指数作为自变量,经统计分析建立多元线性回归关系[15]。所建立的沙尘暴指数模式与沙尘暴年日数相关系数 0.7 左右,且通过信度 0.01 检验。同时所建立的气候影响指数模型能用以解释当前该地区沙尘暴频率的分布格局。表 4 给出了沙尘暴日数与有关参数的相关系数。图 14 给出了沙尘暴日与沙尘暴指数的年际变化曲线。其中 1995年二者的重大差异是由于该年的沙尘暴主要来自蒙古国沙漠。

表 4　浑善达克沙尘暴日数与有关参数的相关系数

Table 4　The relativity between dust storm days and some meteorological records in Hunshandake sandland

	春季平均风速	风速大于 10 m/s 天数	植被参数 T_0	春季回暖指数 P_0
平均沙尘暴日	0.658	0.536	－0.432	－0.601
沙尘暴日总和	0.685	0.657	－0.459	－0.596

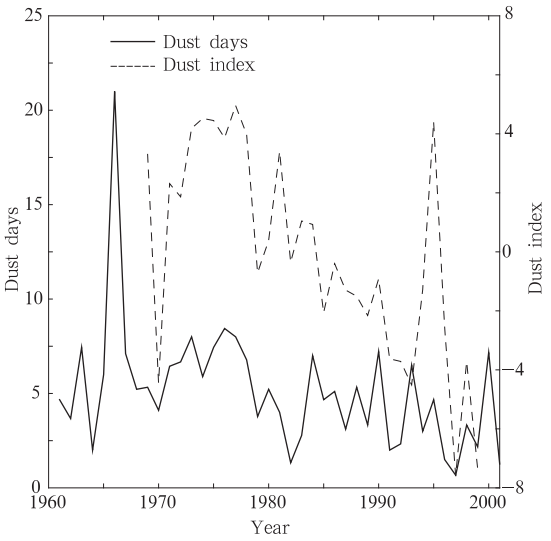


图 14　平均沙尘暴天数(实线)与沙尘暴指数(虚线)

Fig. 14　Mean dust storm days and dust storm index

为了定量了解沙尘暴发生频率的季节变化,我们还建立了符合该区气候条件(特列是考虑该地区冻土及融合所表征的土壤湿润指数变化)的气候影响指数模型[15]。

4.4　冬季风与浑善达克沙地形成的外部原因

根据地质研究浑善达克沙地包含着外来沙输送形成的重要因素,也包括本地荒漠化的因素。由于西部是广阔的中亚、蒙古和中国西北干旱沙漠区,每年冬春季存在着强沙尘暴的气候条件。因此可以推测,浑善达克沙地的形成过程中,冬季风的存在、西北沙漠沙尘源地以及区域本身的地形特征应是重要的复合因素。为此,我们针对这一问题进行了初步的中尺度数值模拟,着重研究盛行冬季风状态下该区域的流场结构,包括水平风场和垂直气流。由于对西北沙尘源的历史地质情况未予调查,还不能对实际的沙地作定量模拟。试验采用的中尺度模式为 ARPS。以锡林浩特为模拟水平中心,采用 20 km 及 5 km 两层单向模式嵌套,20 km 网格模拟采用 NCEP 1979～1996 年 17 a 平均的 3 月风场作为初始场及外界强迫。

图 15 为距离地区 200 m 高度的风场(水平格距 5 km)的模拟结果。可以看出,在试验区内盛行西偏北风,而在浑善达克沙地所在区域出现强风速与风速梯度。另一方面,在下游区域存在着较为系统的(连续成片)下沉气流区。显然这是有利于风沙传输时的沉降,从而形成沙带。注意到在模拟区域的中部偏左下部位风具有强水平流场(图 15a),而在垂直速度图中右方(下游方)下部存在着宽阔的下沉气流区。相比而言,在上游(左上方)下沉区分布较窄,这从动力场上解释了浑善达克沙地西部窄,东部宽的一个原因。由于沙带的形成是地质年代时段的产物,可以设想上述水平流场与垂直气流结构在沙带长时间沉积形成过程中的作用。作为对比,我们对 8 月份的情况也做了模拟。这时的基本流场为西偏南,在下游风速较大,而相应下沉区面积及强度均较春季为小(图 16a,b)。有关这方面的工作我们将结合起沙过程与外源过程作进一步研究。

5　半干旱草原的温室气体收支与碳循环初步实验结果

温带半干旱草原的碳循环与温室气体(N_2O,CH_4,CO_2)收支是全球变化的关注热点之一。虽然

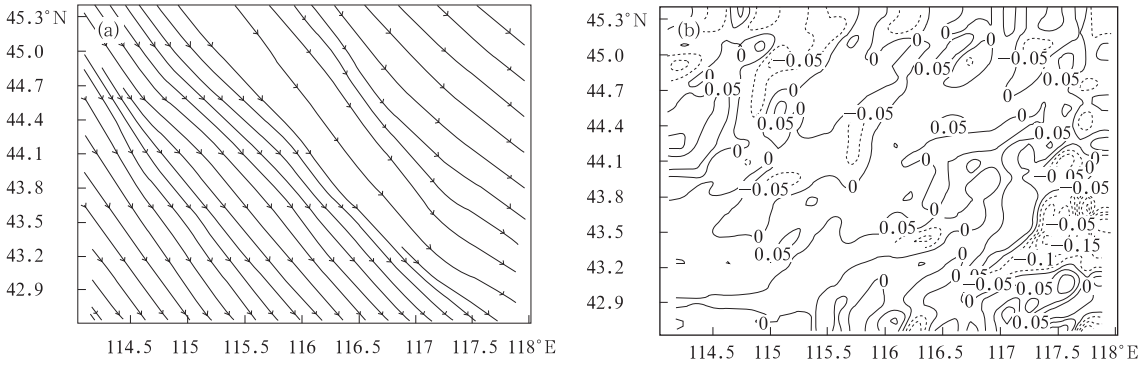


图 15 3月份 200 m 高度的平均流场结构(a)和垂直风场分布(b)的数值模拟结果

Fig. 15 Average wind distribution (a) and vertical velocity distribution (b) as simulated by ARPS meso-scale model with NCEP data of March meteorological field of 1979－1996 as input

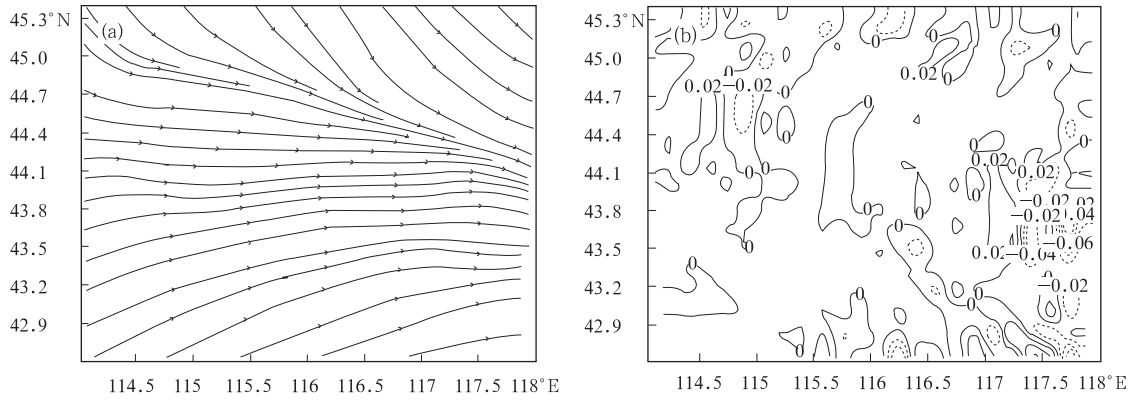


图 16 8月份 200 m 高度的平均流场结构(a)和垂直风场分布(b)的数值模拟结果

Fig. 16 Same as Fig. 15 but for August

草原生物量与生产力不如森林和农田,但由于其在全球陆地面积中的比重大,其总贡献量不可忽视。当前对这方面的实验测量仍相当不足,因而定量结果的不确定性仍很大。例如,IPCC2001 报告[5]中明确指出"至今未能确切地肯定 N_2O 和 CH_4 各排放源的排放率"。这是由于这类过程的时空变化极大。IPCC2001 报告中估计 N_2O 的总排放率为 16.4 TgN/a,其中自然排放率为 9.6 TgN/a,其中热带干草原与温带草原各占 1.0 TgN/a,而不确定范围均为 0.5～2.0。已经知道草原 CH_4 总体而言是一个小的汇,但同样有较大的不确定性。至于 CO_2 通量与草原碳循环更是当前重要的全球变化前沿课题。IMGRASS 计划中对此进行了较为系统的实验测量与过程研究。

5.1 实验方法与观测地点

实验区内主要由羊草(Leymus chinensis)草原和大针茅(Stipa grandis)草原组成。前者分布于相对偏高偏湿的地带,而后者则分布于偏低偏干的地带。实验中气体采样用静态箱法[16],箱体尺寸为 400 cm×400 cm ×250 cm。实验在 3 类草地地表进行,即羊草(围栏禁牧)样地,大针茅(围栏禁牧)样地和羊草自由放牧(退化)样地。每个样地设 3 个采样箱,每周采样一次。自 1998 年 5 月起持续 1 a,得到具有 4 个季节的代表性结果。所采样品采用 GC/ECD 和 GC/FID 进行分析,并作严格的质量控制。由于温室气体收支具有明显的日变化,为此我们还进行了各生长阶段的通量日变化测量。为深入了解形成温室气体界面交换的土壤微生物过程,还专门在气体采样同时取土样,随后在实验室内进行微生物培养和生物量测定。

5.2 N_2O 和 CH_4 通量的日变化规律

当前国内外对草地地气间 N_2O 和 CH_4 的通量测量很少有对其日变化的测量研究,而是以一天中某一时间的测量作为日均值,这显然会带来误差[17,18]。为此 1998 年我们进行了 N_2O 和 CH_4 通量日变化的测量。针对羊草草原 4 个不同生长阶段

分别进行了日变化测量,它们是抽穗前期(6 月 6～7 日)、开花期(7 月 7～8 日)、结实后期(8 月 12～13 日)、果后营养期(9 月 9～10 日)。表 4 列出 N_2O 和 CH_4 的日变化统计值[19]。

图 17 给出羊草样地(a)和放牧样地(b)N_2O 通量日变化的测量结果。N_2O 的通量峰值出现在白天,最强值在开花期。值得注意的是放牧草地 N_2O 通量在一些时段出现了负值,且总体值变小。而 CH_4 通量日变化规律不明显(图略),最强值出现在抽穗前期。土壤温度和水分对通量日变化的影响在不同生长阶段各异。有关形成日变化的机制,尤其是在放牧条件下出现 N_2O 负通量的机制,在文献[20]中已有详细讨论。

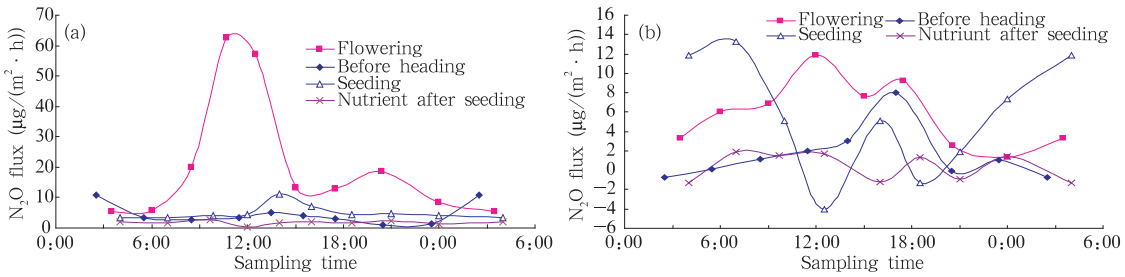


图 17　羊草样地(a)和放牧草地(b)N_2O 通量日变化观测结果

Fig. 17　Diurnal variation of N_2O fluxes at fenced (a) and grazing (b) Leymus chinense steppe

5.3　N_2O 和 CH_4 地气交换通量的季节变化

图 18 和 19 分别给出大针茅样地、羊草样地和放牧草地等 3 类草地 N_2O 和 CH_4 通量的测量结果[21,22]。对比图 18 中 N_2O 通量时变曲线可以看出,草原是 N_2O 的排放源,具有很强的季节变化。其中夏季通量最强,春秋次之,冬季最弱。通量变化的另一个特点是,即使在同一季节内相邻一周的测量结果也存在较大的脉动,甚至出现 N_2O 的吸收通量,但这未能掩盖季节变化的总体趋势。形成夏强冬弱的主要原因是夏季由于土壤养分、土壤水势条件、地下微生物总量均对 N_2O 排放有利。冬季则相反,大部分土壤微生物代谢活动受到抑制。我们所作的土壤样品室内微生物培养结果表明,土壤微生物代谢,尤其是异养硝化作用过程,是 N_2O 排放的主要机制[20]。

由图 19 同样可以看出,草原总体而言是 CH_4 的汇,其通量春季最强,强度依次向夏、秋、冬降低。但 CH_4 季节通量的变化有明显的年际特征,这一过程主要与土壤中甲烷氧化菌的生物量和代谢活性随土壤水分和温度变化密切相关[22]。

5.4　半干旱典型草原 N_2O 和 CH_4 通量年均值的估计

表 5 给出半干旱草原 3 类样地 N_2O,CH_4 和 CO_2 通量的各季排放量比例。

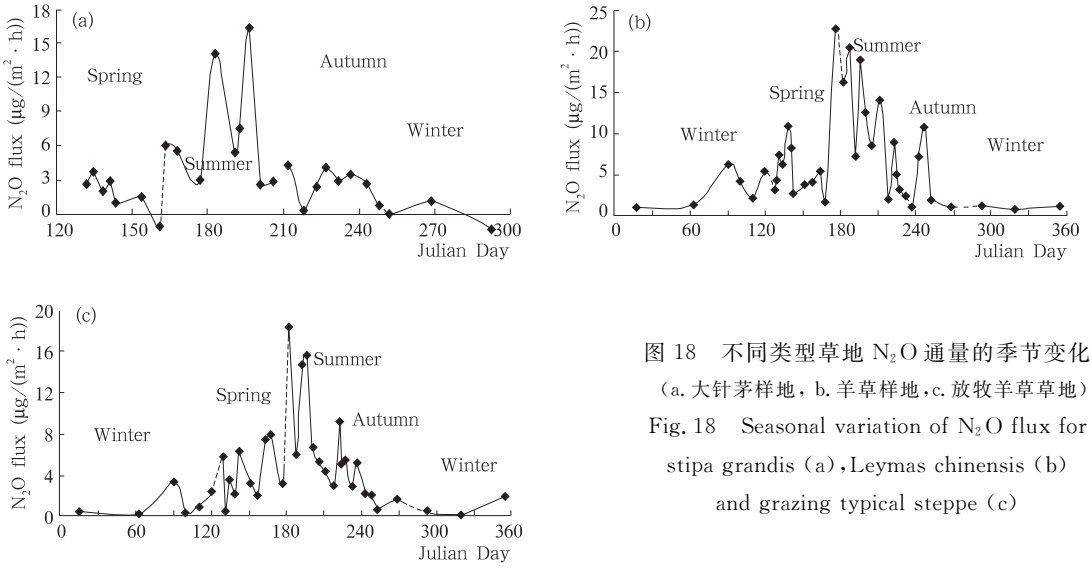


图 18　不同类型草地 N_2O 通量的季节变化

(a. 大针茅样地, b. 羊草样地, c. 放牧羊草草地)

Fig. 18　Seasonal variation of N_2O flux for stipa grandis (a), Leymas chinensis (b) and grazing typical steppe (c)

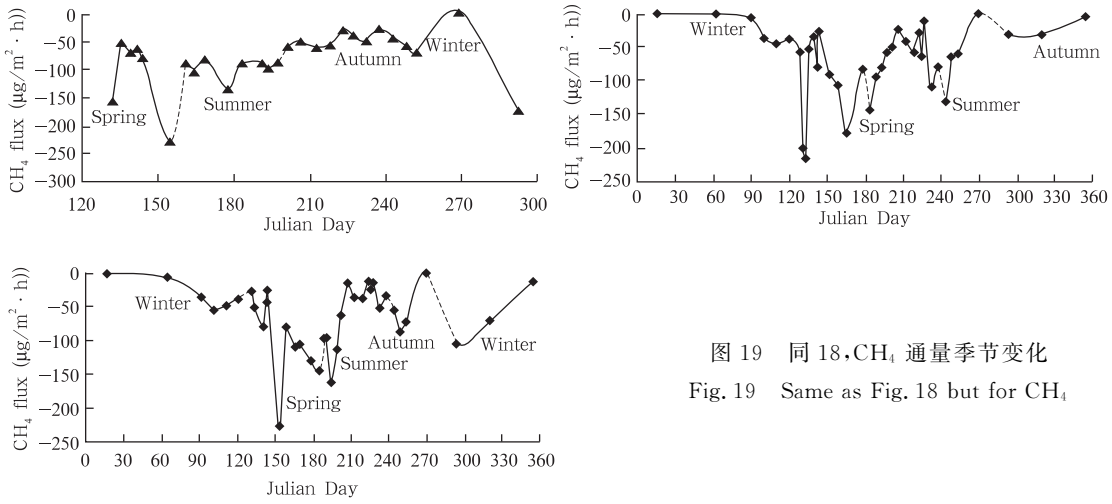


图19 同18，CH_4 通量季节变化

Fig. 19 Same as Fig. 18 but for CH_4

表5 3类草地 N_2O，CH_4，CO_2 通量的测量统计季节平均值

Table 5 Seasonal average fluxes of N_2O, CH_4, CO_2 for Leymus chinense, Stipa grandis, and grazing steppe of Inner Mongolia

类型	羊草草原			大针茅草原			放牧草原		
温度气体	N_2O μg/(m²·h)	CH_4 μg/(m²·h)	CO_2 mg/(m²·h)	N_2O μg/(m²·h)	CH_4 μg/(m²·h)	CO_2 mg/(m²·h)	N_2O μg/(m²·h)	CH_4 μg/(m²·h)	CO_2 mg/(m²·h)
春季	8.7	−102	−270	2.9	−128	−271	3.8	−64	−61
夏季	10.5	−84	−494	6.2	−76	−287	6.0	−58	−201
秋季	4.1	−50	−21	1.2	−28	−20	1.6	−32	3
冬季	2.0	−17	50	1.4	−16	29	1.0	−27	8

从表5可以看出，就3类草地而言，围栏羊草草地 N_2O 通量最大，放牧羊草草原次之，而围栏大针茅草草原最小。显然这与草地种群特性有关。就羊草草原而言，无放牧与放牧草地的 N_2O 通量差别约40%。本项研究在1995，1998和2001～2002年均分别进行过，结果表明 N_2O 有明显的年际变化。若按全球温带草地为1500 Mhm^2 计，以本工作获得的代表温带草地 N_2O 排放率计算，则全球温带草地 N_2O 年排放量约为0.66 TgN，这个值小于IPCC2001报告中给出的相应平均值1 TgN/a，说明内蒙古典型草原 N_2O 排放值相对较低，造成 N_2O 排放偏低的可能机制可见文献[11]。由于IPCC2001报告中已说明 N_2O 和 CH_4 等各类陆地地表排放通量的极大不确定性，而对草地 N_2O 排放的估计自IPCC 1995年报告以来没有变动过[23]，因此这一问题还值得进一步分析和测量。3类草地 CH_4 通量很接近，均表明草地是 CH_4 的汇，但对全球 CH_4 的总体收支而言，贡献较小。

5.5 温带半干旱草原的碳循环的初步观测研究

IMGRASS在1998，1999，2000年均开展了利用箱法观测土壤、植被与大气之间的 CO_2 交换的测量。实验中采用了不同尺寸的暗箱和透明箱，并在对所有样本进行统计分析的基础上做出了对植物生长不同阶段(其光合和呼吸作用受环境变化的影响差异极大)箱法测量结果的订正方案，由此获得表5中所列出的3类草地的 CO_2 通量的估计值。从中可以看出，羊草和大针茅封育样地 CO_2 通量比起放牧草地来有相当大的差异。放牧草原由大气进入土壤－植被的 CO_2 年均量不到封育样地的50%～60%。在春天和秋天减少值极为显著，而在夏天其作为汇的强度亦减小很多。

1998～2000年3 a的测量结果表明，在草原生长期，典型草原群落呼吸量平均变化范围为夜间221～880 mg CO_2/(m²·h)，白昼为425～924 mg CO_2/(m²·h)，其中土壤总呼吸占群落总呼吸的比例夜间为82%～88%，白天为70%～78%。草地植被呼吸平均变化范围为夜间26～58 mg CO_2/(m²·h)，白昼为95～130 mg CO_2/(m²·h)。这说明草地土壤呼吸无论白昼夜晚都是向大气释放 CO_2 的主要贡献者。干旱和半干旱年份草地土壤呼吸平

均约为 390 g C/(m^2.a),但值得注意的是,草原群落呼吸量具有极大的年际变化,1998 年较 1999 和 2000 年都高出 2 倍以上[24]。

6　人类活动干预下的草原退化与恢复演替模式

锡林郭勒草原的主体部分是处于人类放牧状态的自然草原,并无人工的其他干预,如灌溉、施肥或翻耕(农垦地除外)。因此通过长期观测来了解草地群落实际存在的退化状态,并通过对退化草地进行封育试验,使其在自然气候变化状态下恢复到原来的顶级群落状态,对演变过程监测分析是十分有价值的重要工作。参加 IMGRASS 项目的植物生态学家们在这一地区已经进行了十数年的长期观测,结合 IMGRASS 期间的深入研究,获得了对典型草原过度放牧退化过程与封育恢复演替过程的系统认识。对于这方面的认识,可以归结为以下主要点。

6.1　典型草原退化演替模式与诊断

(1) 研究表明[25,26],人类活动干预下的草原植被退化演替的本质是人类对草原的不合理管理与超限度利用导致草原正常群落的生产力、生物组成发生明显的退行性变化,土壤退化,水文循环改变,相应的小气候环境恶化这一过程总体。其中人类活动的干预包括过度放牧、超负荷收割,由此超越了原有群落中某些种群的再生能力,从而导致生物量减少、群落稀疏矮化、优质牧草减少、劣质牧草增长。相应的草地动物种群亦有变化。值得提出的是,由于半干旱草地所面临的气候相对恶劣,存在着水分因素的严重制约,而且有重大的年际变化,导致低于草原生物群落自我维持阈值从而产生退化。以降水为关键制约因素的生态环境变化还包含着春季大风对土壤表层的风蚀、水热组合的非同季性对植被生长的制约等。因此即使是针对平均气候状态年份的相对合理的人类活动干预也会在气候恶劣年份造成植被退化,并难以在短期内恢复。因为植被恢复演替有其自身的规律与时间表。

(2) 根据 1983 年以来刘钟龄研究小组[25,26]的长期监测,已经观测到典型草原在过度放牧下的退化模式。该地区主要为大针茅草原、克氏针茅草原和羊草草原。在过度放牧情况下各自出现不同的退化演替序列,最终趋同于冷蒿占优势的草原变型。但当实行长期高强度放牧,则会进一步退化为星毛萎陵菜占优势的群落。由于冷蒿是一种广泛适应于草原的地上芽植物,具有很强的耐牧性,因而成为草原放牧演替退化过程的“优胜者”。

表 6 列出了内蒙古草原植被退化演替分级及相应的退化指标值。可以看出退化演替包括着植物群落生物量、成份比例、株高、盖度、土壤侵蚀、土壤物性的全面变化。同时不同退化程度草原的可恢复年限也不同。当然在退化与恢复演替中均与气候因子密切相关。

从表 7 中典型草原 3 种群落退化过程中优势种的消长率可清楚地看出,退化过程增长造成的原优势种生物量迅速减少,而冷蒿比例增长。表 8 则给出了相对于未退化草原的基本情况,不同饲用价值植物的生物量消长及其相对比例关系。非常明显的是,退化过程包含着两个方面,即草原总生物量的降低和可饲性草的比例迅速降低。因而人类活动干预的结果一方面是陆-气界面的通量变化更趋于稀疏植被的陆气界面,改变地表的温度、反照率、蒸发与

表 6　内蒙古草原植被退化演替的生产力衰减分级[26]

Table 6　The rate of productivity reduce in regressive succession of Inner Mongolia grassland[26]

退化指标	Ⅰ轻度退化	Ⅱ中度退化	Ⅲ强度退化	Ⅳ严重退化
植物群落生物产量下降率%	20～35	36～60	61～80	＞80
优势植物种群衰减率(%)	15～30	31～50	51～75	＞75
优质草种群产量下降率(%)	30～45	46～70	71～90	＞90
可食植物产量下降率(%)	10～25	26～40	41～60	＞60
退化演替指示植物增长率(%)	10～20	21～45	46～65	＞65
株丛高度下降(矮化率)(%)	20～30	31～50	51～70	＞70
植物群落盖度下降率(%)	20～30	31～45	46～60	＞60
轻质土壤侵蚀程度(%)	10～20	21～30	31～40	＞40
中、重质土壤容重、硬度增高(%)	5～10	11～15	16～20	＞20
可恢复年限(a)	2～5	5～10	10～15	＞15

蒸腾以及微量气体收支，另一方面则是草原生态系统自身的变化及由此产生的微气候特征的变化。前者有可能对大气边界层的输送通量有影响，而后者则是影响退化植被本身的生态环境条件。系列研究表明，当前锡林郭勒草原的绝大部分处于不同程度的退化状态，但同样绝大部分退化草原仍处于可恢复演替的阈值以内。在减轻或停止放牧的措施下，退化草原有可能通过不同年限的自然过程恢复到其顶级群落。

表7 3种草原群落退化过程中优势种的消长率[25]

Table 7 The rate of dominant species reduced and increase in regressive succession of three steppe community[25]

草原群落	优势植物	Ⅰ轻度退化种群(%)	Ⅱ中度退化种群(%)	Ⅲ强度退化种群(%)	Ⅳ严重退化种群(%)
羊草草原	羊草	−28.3	−48.2	−68.6	−94.5
	大针茅	−32.2	−55.0	−77.6	−96.0
	糙隐子草	+5.5	+6.3	+1.8	−2.6
	冷蒿	+21.5	+37.2	+66.4	+68.7
大针茅草原	大针茅	−30.5	−52.6	−75.8	−95.4
	糙隐子草	+8.8	+10.5	+6.2	−5.4
	冷蒿	+22.8	+33.3	+61.4	+67.1
小针茅草原	小针茅	−31.0	−49.6	−72.2	−81.7
	无芒隐子草	+10.6	+8.2	−7.7	−20.4
	小亚菊	+24.0	+411.4	+64.2	+68.2

表8 典型草原退化群落的饲用植物比例变化

Table 8 The diagnostic of forage plant property in degenerated community of typical steppe

	优		中		劣		不可食		总生物量
未退化	138.3 g/m²	5.3%	38.1 g/m²	14.2%	67.1 g/m²	25.4%	9.0 g/m²	3.8%	267.7 g/m²
轻度	120.2 g/m²	53.3%	31.6 g/m²	14.1%	65.8 g/m²	29.0%	7.8 g/m²	3.5%	225.4 g/m²
中度退化	48.5 g/m²	34.0%	26.5 g/m²	18.0%	61.0 g/m²	42.7%	6.6 g/m²	4.7%	142.6 g/m²
重度退化	18.8 g/m²	28.5%	13.1 g/m²	19.9%	30.4 g/m²	46.0%	3.8 g/m²	5.9%	66.1 g/m²

6.2 退化典型草原对禁牧的动态响应

根据刘钟龄研究小组从1983年开始对已严重退化的典型草原围栏封育，进行长时间序列定位监测。每年生长季(5～9月)以15 d为周期进行每期10个或20个1 m×1 m的样方测定，测量包括现存生物量的分种、植株密度、高度、覆盖度等。根据对十几年来封育样地恢复演替的研究，表明退化的与稳定牧压相适应的冷蒿占优势的群落在封育后的恢复中存在如下特征：

(1) 恢复演替经历4个阶段，即冷蒿优势阶段、冷蒿加冰草优势阶段、冰草优势阶段和羊草优势阶段。这4个阶段的变化是十分明显的。值得注意的是退化草地中的植物种数及未退化前与恢复演替后的植物种数没有变化。

(2) 生物量逐步增高，但呈现出台阶式的跃变。1983年开始封育时为74 g/m²，1984年改变至160 g/m²，此值(160～170 g/m²)一直维持到1988年，1989年出现下降调整，1990年跃升为250 g/m²，此后维持200～250 g/m²，接近于原生群落的生产力水平。

(3) 生物量的台阶式提高与恢复演替中的优势种的急剧调整相联系。当生长量高的种恢复演替为优势种(如羊草)，则出现生物量的跃升。反之，在相对缓慢的种之间相对关系调整时，生物量变化不大。

(4) 在恢复演替的不同阶段，气候与环境因子的影响并不相同。在初期(1984～1988年)5年间，年降水量有明显差异，但生物量无明显差异，在161～171 g/m² 范围内。直到第8年后，年降水与气候的小波动才开始出现对群落生产力的明显作用。

(5) 退化草地群落处于资源过剩状态，包括相对的水资源过剩。这种过剩是群落恢复演替的物质基础。而恢复演替是基于各物种自身的生物学特性而进行对过剩资源的争取和种间竞争的过程。最终形成自身特有的生态位。

(6) 现有监测表明，该地区退化草地经11 a恢复后生产力已接近原生群落。从草场利用角度看，经5～8 a封育，可以适度和合理放牧或割草利用，并可持续地维持优势种群(羊草、大针茅、冰草)的再

生机制。在这个阶段,气候变动性对草原生产力已有明显的调制作用。因而适度与合理利用就要与当时的气候状况相联系。

6.3　草原放牧率与地上初级生长力的关系

实验区所在草原除极小块为研究用的试验围栏样地外,都处于放牧利用之中。人类活动的这种干预是普遍的。从有利于草原生态系统的可持续发展出发需要研究自然草场放牧率与初级生产力的关系。草原定位站对比已开展多年实验研究,在典型的退化草地上开展了不同放牧率的试验[27~32]。结果表明,就初级生产力而言(地上现存生物量＋采食量),轻度放牧有利于达到最大值,但最大值的大小明显受到气候的调制。图 20 为 1993 年与 1997 年所作试验得到的结果,从中可以明显看出:

(1) 地上现存量随放牧率的增大单调下降。将采食量与地上现存量总和计算则表现出在轻牧(1.33～2.67 羊只/hm^2)状态下其值最大[28]。从陆气相互作用的角度看,地上现存量决定了当时的植被覆盖度和叶面积指数等一系列影响蒸散、辐射平衡及地面粗糙度的因素,因而是变化的[31]。

(2) 虽然 1993 与 1997 年表现出相对和相似的趋势,但 2 a 的初级生产力绝对值表现出重大差异[27],最大值分别约为 90 和 65 g/m^2,达到最大值的时间分别为 8 月 20 日以后和 7 月 5 日,这是因为 1993 年降雨量大且均匀分布,而 1997 年总雨量少且 7 月未下雨。因此在考虑人类活动(放牧)与气候的联合作用时可以表现出初级生产力与地上现存量的重大变化。

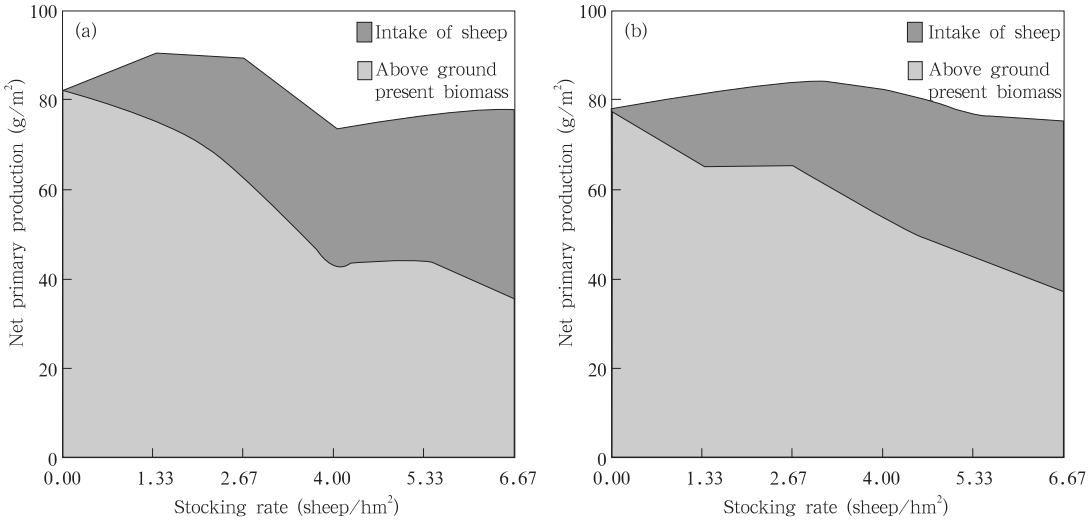


图 20　地上净初级生产力与放牧率的关系[28]

Fig. 20　Relationship between above ground net primary production and stocking rate[28]

7　总　结

本文对 IMGRASS 计划的目的、意义、执行过程,特别是几个主要方面的初步结果进行了简单而系统的介绍。其要点小结如下。

(1) 完成了一项内蒙古半干旱草原土壤－植被－大气相互作用的地面中尺度试验比较系统地获得了温带半干旱草原不同类型地表(主要是锡林郭勒典型草原和浑善达克沙地稀树草原)陆气相互作用的实际综合观测资料。并结合多年草原生态观测与气候资料,形成半干旱草原具有代表性的数据集。由于半干旱草原在全球陆地地表中占有相当的比例,这一实验数据集将作为一个代表性地表类型提供学术界进一步研究。

(2) 通过观测与初步分析。同一天气气候条件下不同土壤植被的地表其陆气交换感热与潜热以及大气边界层结构具有不同的季节变化与日变化特征。这些测量结果支持了相应的大气植被相互作用模式与边界层数值模式的模拟结果。用区域降水分布与中尺度模式的模拟验证揭示了夏季季风形成的水汽输送在草原地形地表共同作用下的降水分布特征。

(3) 对于浑善达克沙地、沙尘天气、沙尘气溶胶特征和沙地形成的综合研究表明。数值模拟表明,冬季风从上游区输送沙尘对沙地形成起着重要的作用。对沙地沙尘气溶胶的物理化学特征进行了较系

统的定量研究和源地解析，从而提供了对影响华北的沙尘暴源特征。建立了用气候参数表征沙尘暴频度的经验模型。

(4) 对典型草原的 N_2O，CH_4 和 CO_2 等温室气体的地气交换进行了系统的测量，获得了至今最为认真的估计。结果表明，该地区 N_2O 排放远小于IPCC 2001 报告对温带草原贡献的估计值，其原因在于土壤微生物对环境的响应。对 CO_2 的观测表现出极大的变动性。观测表明，草地退化对草地作为 CO_2 汇有重要减小作用；

(5) 基于 IMGRASS 和其他研究计划的长期支持，对于在本区域放牧所造成的草原生态退化和禁牧恢复演替过程已进行了较为系统的研究，包括其土壤理化性能、植被群落整体与个体的变化及相应的生物量、初级生产力的变化，以及与气候的关系。这些测量过程分析将为气候－生态相互作用与人类活动的有序干预方面提供有益的参考。

本项工作在许多方面是很初步的，一些正进行中的研究未能包括在内。更多的方面是提出需要深入研究的方面，特别是在过程与机制研究方面而言要将生物地球物理过程(包括土壤－植被－大气之间水、热、辐射交换、植物土壤所表征的系统物理特征的变化)和生物地球化学循环(微量气体交换的生物、微生物、化学过程及植物生理相关过程)之间的协调变化定量关系，以及对气候-生态相互作用有利于可持续发展的人类活动过程与方案研究。当前的全球变化研究也正在这些方面作重要倡导[35,36]。

致谢：本文是 IMGRASS 计划研究结果的一部分。参加该计划的有中国科学院大气物理研究所、植物研究所、地理科学与资源研究所、兰州高原大气物理研究所、北京大学、内蒙古大学、内蒙古农业大学、北京气象学院等单位几十位科技工作者，包括他们在内的共同研究(部分反映在参考文献中，许多尚未成文)在此不能一一列出。在项目立项过程中，得到了叶笃正院士的热心指导，美国科学家 Drs Liou K N, Chou Mirgda, Smith E, Businger J. 提供许多宝贵意见，荷兰科学家 Drs Kabat Hutjes R W A 也从 BAHC 计划角度提出了宝贵建议。

在项目执行过程中，一直得到以孙鸿烈、丑纪范两位院士为首的专家小组的指导。国家自然科学基金委员会林海、陆则慰研究员提出许多宝贵意见。特此致谢。

参考文献

[1] Ye Duzheng, Lin Hai, et al. China Contribution to Global Change Studies. Beijing: Science Press, 1995. 221pp

[2] 吕达仁，陈佐忠，王庚辰等. 内蒙古半干旱草原气候－生态相互作用问题(一)——IMGRASS 研究计划与初步观测. 地学前缘，2002. 9(2)：295～306
Lu Daen, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, et al. Climate-Ecology Interaction in Inner Mongolia Semi-Arid Grassland (1)-IMGRASS Project and preliminary observation. Earth Science Frontier (in Chinese), 2002, 9(2): 295－306

[3] 陈佐忠. 锡林河流域地形与气候概况. 见：陈佐忠主编. 草原生态系统研究，第 3 集. 北京：科学出版社，1988. 13～22
Chen Zuozhong. Topography and climate of Xilin river basin. In: Chen zuozhong. ed. Research on Grassland Ecosystem, Vol. 3. Beijing: Science Press, 1988. 13－22

[4] 汪久文，蔡蔚祺. 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究. 见：陈佐忠主编. 草原生态系统研究，第 3 集. 北京：科学出版社，1988. 23～83
Wang Jiuwen, Cai Yuchi. Studies on Genesis, Types and Characteristics of the Soils of the Xilin River Basin. In: Chen Zuozhong. ed. Research on Grassland Ecosystem, Vol. 3. Beijing: Science Press, 1988. 23－83

[5] 李博，雍世鹏，李忠厚. 锡林河流域植被及其利用. 草原生态系统研究，第 3 集. 北京：科学出版社，1988. 84～183
Li Bo, Yong Shipeng, Li Zhonghou. The Vegetation of the Xilin river basin and Its Utilization. In: Chen zuozhong. ed. Research on Grassland Ecosystem, Vol. 3. Beijing: Science Press, 1988. 84－183

[6] 吕达仁，陈佐忠，王庚辰等. 内蒙古半干旱草原土壤－植被－大气相互作用——科学问题与实验计划概述. 气候与环境研究，1997，2(3)：199～209
Lu Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen. Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction. Climate and Environmental Res(in Chinese), 1997, 2 (3): 199－209

[7] 吕达仁，陈佐忠，王庚辰等. 内蒙古半干旱草原气候－生态相互作用问题(二)——IMGRASS 计划初步结果. 地学前缘，2002，9(2)：307－320
Lu Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, et al. Climate-ecology interaction in Inner Mongolia semi-arid grassland(2)-preliminary results of IMGRASS project. Earth Science Frontier (in Chinese), 2002, 9(2): 307－320

[8] Ji J. A Climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface. J Biogeography, 1995, 22: 445－451

[9] 殷达中，陈家宜. 内蒙古草原陆面通量和边界层结构数值模拟. 草地学报，1998，6(4)：282～292
Yin Dazhong, Chen Jiayi. Modeling study on the land surface fluxes and the structure of planetary boundary layer (PBL) over Inner Mongolia grassland. Acta Agrestia Sinica (in Chinese), 1998, 6(4): 282－292

[10] 刘锦丽，孙海冰. 区域降水分布定量测量及其在 IMGRASS 综合试验中的应用方案研究. 气候与环境研究，1997，2(3)：286～292

Liu Jinli, Sun Haibing. A design of quantitative regional precipitation measurement for IMGRASS. Climate and Environmental Res(in Chinese), 1997,2 (3) :286－292

[11] 陈有君,关世英,李绍良等. 内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析. 干旱区资源与环境,2000,14(1):80～85
Chen Youjun, Guan Shiying, Li Shaoliang, et al. Analysis of soil moisture of Hunshantake Sandy Land, Inner Mongolia. J Arid Land Resour & Environ (in Chinese),2000, 14(1): 80－85

[12] 成天涛,吕达仁,陈洪滨等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征. 大气科学,2005, 29(1):147～153
Cheng Tiantao, Lu Daren, Chen Hongbin, et al. The size distribution of dust aerosol particles in Onqindaga Sandland. Chinese J Atmos Sci (in Chinese),2005, 29(1):147－153

[13] Cheng Tiantao,Lu Daren,Wang Gengchen, et al. Chemical characteristics of Asian dust aerosol from Hunshandake sandland in northern China. Atmospheric Environment, 2005, 39: 2903－2911

[14] 王革丽,吕达仁,尤莉. 浑善达克沙地沙尘暴天气气候特征分析. 气候与环境研究,2002, 7 (4):433～439
Wang Geli, Lu Daren, You Li. Analyses of climatic characteristics on hunshandake dust storm. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2002, 7(4): 433－439

[15] 成天涛,吕达仁,王革丽.徐永福浑善达克沙地气候因子对沙尘暴频率影响作用的模拟研究. 中国沙漠,2005;25(1): 68－74
Cheng Tiantao, Lu Daren,Wang Geli, et al. Simulation on effect of climate factors on sandstorm frequency in hunshandake sandland (in Chinese). Journal of Desert Research (in Chinese),2005,25(1):68－74

[16] 杜睿,王庚辰,吕达仁等.箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究. 大气科学,2001,25(1):61～70
Du Rui, Wang Gengchen, Lu Daren, et al. A study of chamber method for in-situ measurements of greenhouse gases fluxes from grassland. Chinese J Atmos Sci,2000,24(4): 396－406

[17] 杜睿,陈冠雄,吕达仁等.内蒙古草原生态系统－大气间 N_2O 和 CH_4 排放通量研究的初步结果. 气候与环境研究,1997,2 (3):264～272
Du Rui, Chen Guangxiong, Lu Daren, et al. The primary research on in situ measurements of N_2O and CH_4 fluxes from the Inner Mongolia grassland ecosystem. Climate and Environmental Res(in Chinese), 1997,2 (3) :264－272

[18] 王艳芬,陈佐忠,周涌. 内蒙古典型草原 N_2O 研究刍议. 气候与环境研究,1997,2(3): 280～285
Wang Yanfen, Chen Zuozhong, Zhou Yong. Studies on the N_2O emission from the typical grassland in the Inner Mongolia. Climate and Environmental Res(in Chinese), 1997,2 (3) :280－285

[19] 杜睿,王庚辰,刘广仁等.内蒙古羊草草原温室气体交换通量的日变化特征研究. 草地学报,1998,6(4):258～264
Du Rui, Wang Gengchen, Liu Guangren, et al. The study on diurnal variation in greenhouse gas revenue and expenditure fluxes of Leymus Chinensis grassland of Inner Mongolia. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1998, 6(4):258－264

[20] 杜睿,王庚辰,吕达仁.放牧对草原土壤 N_2O 产生及微生物的影响. 环境科学,2001,22(4):11～15
Du Rui, Wang Gengchen, Lu Daren. Effect of grazing on microbiological processes of N_2O production in grassland soils. Environmental Science (in Chinese), 2001, 22(4):11－15

[21] 王庚辰,杜睿,王艳芬等. 内蒙古草原 N_2O 和 CH_4 草原排放能量及其季节变化特征研究. 草地学报,1998,6(4):306～311
Wang Gengchen, Du Rui, Wang Yanfen, et al. Characteristics of N_2O 和 CH_4 fluxes and their seasonal variations from Inner Mongolia grassland. Acta Agrestia Sinica (in Chinese), 1998, 6(4):306－311

[22] 杜睿,王庚辰,吕达仁等. 内蒙古温带半干旱草原温室 N_2O 和 CH_4 通量变化特征. 自然科学进展,2001,11(6):595～601
Du Rui, Wang Gengchen, Lu Daren, et al. Variation characteristics of N_2O and CH_4 fluxes in semi-arid Leymus Chinense grassland ecosystem of Inner Mongolia. Program in Nature Sci (in Chinese),2001,11(6):595－601

[23] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle, nutrilite cycling in Agriecosys, 1998, 52:225－248

[24] 王庚辰. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究. 科学通报,2004,49(7):692～696
Wang Gengchen. Experiment of soil respiration characteristics in typical temperature grassland in China. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 2004, 49 (7): 692－696

[25] 王炜,刘钟龄,郝敦元等. 内蒙古退化草原植被对禁牧的动态响应. 气候与环境研究,1997,2(3):236～240
Wang Wei, Liu Zhongling,et al. The dynamic respond of degenerative steppe vegetation into grazing prohibited in the Inner Mongolia. Climate and Environmental Res (in Chinese), 1997,2 (3) :236－240

[26] 刘钟龄,王炜,梁存柱等. 内蒙古草原植被在持续牧压下退化演替的模式与诊断. 草地学报,1998,6(4):244～251
Liu Zhongling, Wang Wei, Liang Cunzhu, et al. The regressive succession pattern and its diagnostic of Inner Mongolia steppe in sustained and superstrong grazing. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1998, 6(4):244－251

[27] 李永宏,陈佐忠,汪诗平等. 草原放牧系统持续管理试验研究:试验设计及放牧对草－畜系统影响分析. 草地学报,1999,7(3):173～182
Li Yonghong, Chen Zuoahong, Wang Shiping, et al. Grazing experiment for sustainable management of grassland ecosystem of Inner Mongolia steppe: experimental design and the effects of stocking rates on grassland production and animal liveweight. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1999, 7(3): 173－182

[28] 汪诗平,李永宏,陈佐忠.内蒙古典型草原草畜系统适宜放牧率的研究.Ⅱ.以牧草地上现存量和净初级生产力为管理目标.草地学报,1999,7(3):192～197
Wang Shiping, Li Yonghong, Chen Zuozhong. The optimal stocking rate on grazing system in Inner Mongolia steppe Ⅱ. based on relationship between stocking rate and aboveground net primary productivity. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1999, 7(3):192－197

[29] 王艳芬,汪诗平.不同放牧率对内蒙古典型草原地下生物量的影响.草地学报,1999,7(3):198～203
Wang Yanfen, Wang Shiping. Influence of different stocking rates on belowground biomass in Inner Mongolia steppe. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1999, 7(3):198－203

[30] 牛海山,李香真,陈佐忠. 放牧率对土壤饱和导水率及其空间变异的影响.草地学报,1999,7(3):211～216
Niu Haishan, Li Xiangzhen, Chen Zuozhong. Effects of stocking rate on soil saturated hydraulic conductivity and its spatial variation. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1999, 7(3):211－216

[31] 杜占池,杨宗贵.不同密度的羊划种群结构及其光照分布的研究.草地学报,1999,7(3):236～244
Du Zhanchi, Yang Zonggui. Study on the population structure of leymus chinensis and its distribution of illuminance under its different density conditions. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1999, 7(3):236－244

[32] 崔骁勇,王艳芬,杜占池.内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究.草地学报,1999,7(3):245～250
Cui Xiaoyong, Wang Yanfen, Du Zhanchi. Primary study on soil respiration of main plant communities in typical grasslands in Inner Mongolia. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1999, 7(3):245－250

[33] 韩志刚,吕达仁,刘春田等. 草地反射太阳光偏振特性测量个例分析.草地学报,1998,6(4):237～243
Han Zhigang, Lu Daren, Liu Chuntian, et al. Measurements of polarization of light reflected by grassland: a case study. Acta Agrestia Sinica(in Chinese), 1998, 6(4):237－243

[34] Zhang Renhua, Sun Xiaomin, Su Hongbo, et al. To retrieve regional distribution for CO_2 assimilation of grassland in Inner Mongolia of China. Using two time-phase NOAA-AVHHR and surface data. IEEE, 2000. 1951－1953

[35] Moore Ⅲ B. Sustaining earth's life support system-the challenge for the next decade and beyond. IGBP Newsletter 41, 1－2, May 2000

[36] Hudjes R W A, Kabat P, Running S W, et al. Preface of the biospheric aspects of the hydrological cycle. J Hydrology, 1998, 212－213, 1－21

STUDY ON SOIL-VEGETATION-ATMOSPHERE INTERACTION IN INNER-MONGOLIA SEMI-ARID GRASSLAND

Lu Daren

(*Institute of Atmospheric Physics(LAGEO), CAS, Beijing* 100029)

Chen Zuozhong

(*Institute of Botany, CAS, Beijing* 100093)

Chen Jiayi

(*Dept. of Atmospheric Science, Peking Univ. Beijing* 100871)

Wang Gengchen　Ji Jinjun　Chen Hongbin

(*Institute of Atmospheric Physics(LAGEO), CAS, Beijing* 100029)

Liu Zhongling

(*Institute of Natural Resources, Inner Mongolia Univ. Huhhot, Inner Mongolia* 010021)

Abstract

To understand the processes and mechanisms of soil-vegetation-atmosphere interaction in Inner Mongolia semi-arid grassland, a project named "Inner Mongolia Semi-arid Grassland Soil-Vegetation-Atmosphere Interaction (IMGRASS)", which is supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) as a major project, has been conducted in 1997－2001. Within IMGRASS, a coordinated mesoscale field observation was conducted in growing season of 1998. The experimental sites are located in Xilingol semi-arid grassland. The surface types include Xilingol typical steppe and Sandy Land Hunshandake, a kind of mid-latitude savanna. The topography is Mongolia plateau with mild complex terrain. The coordinated observation is consisted of related parameters as surface and boundary layer meteorological parameters, surface sensible and latent heat flux, N_2O, CH_4, and CO_2 flux of the surface, radiation flux and precipitation at four core stations and other sites with simultaneous vegetation and soil parameters. In addition, remote sensing observation and GHG flux observation were made in certain sites during 1999－2003, including specific observation for dust aerosols in spring 2001. Based on field observation and regional climate data, process analysis and numerical simulations were made for various characteristics of land surface-atmosphere coupling of mid-latitude semi-arid grassland, long-term variation of grassland ecological-climate interaction, impact of human activities to ecology and desertification were and made. Short summary about the project and the preliminary results are presented.

Key words: Land surface-atmosphere interaction, IMGRASS, Semi-arid grassland, Green house gases, Desertification, Inner Mongolia.