

降水量变化对内蒙古温带典型草原生态系统 碳交换的影响

朱建军¹ 张 彬^{1,2} 严 月^{1,3} 潘庆民¹

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 3. 江西师范大学生命科学学院, 江西 南昌 330022)

摘 要: 在全球变化的背景下, 内蒙古草原生态系统的降水量可能增加或者减少。迄今, 降水量的改变对该区域草地生态系统碳交换的影响我们知之甚少。为此, 本研究通过完全控水防雨棚, 开展了降水梯度实验, 探究该生态系统碳交换(ecosystem carbon exchange) 随降水量变化的响应轨迹。结果表明: 随着生长季降水量从 100mm 增加到 500mm, 净生态系统碳交换(net ecosystem exchange, NEE)、生态系统呼吸(ecosystem respiration, ER) 和生态系统总生产力(gross ecosystem productivity, GEP) 均显著提高, 这些过程均表现为明显的非线性响应。NEE、ER 和 GEP 的饱和点对应的降水量分别为 350mm、200mm 和 275mm。从响应率的变化斜率看, 降水量减少(<275mm 的处理) 的效应显著强于降水量增加(>275mm 的处理) 的效应。变异来源分析说明, 随着降水量的改变, 群落生物量是草原生态系统碳交换的首要影响因素, 可以解释 NEE、ER 和 GEP 变异的 30.89%、41.90% 和 40.60%, 而土壤含水量和土壤温度只能解释 NEE、ER 和 GEP 变异的 11.51%、7.78% 和 9.28%。上述结果为我们理解和预测未来降水变化对内蒙古温带典型草原生态系统碳交换的影响提供了依据。

关键词: 全球变化; 碳通量; 降水格局; 非线性响应

中图分类号: Q948.1; S812

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2016)05-0516-09

Effects of changing precipitation regime on carbon exchange in a typical steppe ecosystem in Inner Mongolia

ZHU Jian-jun¹ ZHANG Bin^{1,2} YAN Yue^{1,3} PAN Qing-min¹

(1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, P. R. C.; 2. School of Ecological and Environmental Science, Inner Mongolian Agricultural University, Huhhot 010018, P. R. C.; 3. School of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, P. R. C.)

Abstract: Under the global change context, the amount of precipitation in Inner Mongolian grassland ecosystem is predicted to increase or decrease. However, the potential impacts of these changes on ecosystem carbon exchanges remain poorly understood. To address this issue, a precipitation manipulation experiment was conducted by using fully-controlled rainout shelters in Inner Mongolian grassland ecosystem. The results showed that, with the increase of precipitation amount from 100mm to 500mm, net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (ER) and gross ecosystem productivity (GEP) all increased significantly, but followed a nonlinear trajectory. The saturation points for NEE, ER and GEP were observed at the precipitation levels of 350mm, 200mm and 275mm, respectively. Based on the slopes of response rate of NEE, ER and GEP to decreased and increased precipitation amount, precipitation reduction had stronger impacts on three parameters related to precipitation increase. Variation partitioning analysis indicated that community biomass production was the primary factor influencing ecosystem carbon exchanges. Community biomass alone can explain 30.89%, 41.90% and 40.60% of variation in NEE, ER and GEP, respectively. Soil

收稿日期: 2016-08-05

作者简介: 朱建军(1989-), 男, 汉族, 山东泰安人, 硕士研究生, E-mail: zhujianjun@ibcas.ac.cn

通信作者: 潘庆民(1967-), 男, 汉族, 山东济南人, 副研究员, 研究方向: 草地生态学, E-mail: pqm@ibcas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(30970496)

moisture and soil temperature jointly can only explain 11.51%, 7.28% and 9.28% of variation in NEE, ER and GEP, respectively. These results have implications for better understanding and predicting the impacts of precipitation changes on ecosystem carbon exchanges in typical steppe ecosystems in Inner Mongolia.

Key words: global change; ecosystem carbon fluxes; precipitation regime; nonlinear response

中国草地面积约60亿亩,占国土面积的41.7%,占世界草地面积的10%,其碳储量约占世界草地碳储量的9%~16%^[1]。内蒙古草原位于干旱、半干旱地区,是欧亚大陆草原的典型代表^[2],在中国和世界范围内都有重要的地位。

近半个世纪以来,随着人类活动的加剧,大气中温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)的浓度不断升高,导致全球变暖和全球大气环流发生改变。这些变化进一步改变了不同区域的降水格局,包括降水总量的变化、降水频率的改变、降水强度的变化等。研究预测,中高纬度地区年降水量将增加,与此同时,降水事件之间的间隔将延长,极端降水事件和极端干旱事件均呈现增加趋势^[3-4]。这些变化可能对内蒙古草原固碳能力产生影响,但是关于降水量变化对内蒙古草原碳循环的研究还十分匮乏。

碳循环是一个生态系统物质循环和能量流动的核心过程,包括净生态系统碳交换(net ecosystem exchange, NEE),总生态系统生产力(gross ecosystem productivity, GEP)和生态系统呼吸(ecosystem respiration, ER)三部分^[5-7]。NEE是评价生态系统碳收支的重要指标,其强弱由GEP和ER相对大小决定^[5,8]。研究发现,未来降水变化会对草地生态系统碳循环过程产生重要影响^[9-12]。降水量减少时,GEP与ER均表现为降低,由于GEP的降低幅度大于ER的降低幅度,降水量减少对生态系统碳交换的影响表现为净碳排放^[13-15]。相反,GEP的降低程度小于ER的降低程度,降水减少对生态系统碳交换没有影响或者表现为碳吸收^[16]。还有研究发现,在干旱半干旱生态系统,水分对GEP的促进作用大于对ER的促进作用,降水增加对生态系统碳交换的影响为净碳吸收^[8,17]。但是,随着水分的不断增加,降水量对生态系统碳交换不同组分的影响会发生改变,例如:在相对湿润的草地生态系统,降水量增加通常没有促进GEP和ER增加,有时GEP的增加小于ER的增加,降水量增加对生态系统碳交换没有影响或者为碳排放^[18-19]。这些研究表明,降水量的增加或者减少对生态系统碳交换的影响

结论不一。

降水量改变可以通过影响土壤含水量、土壤温度等环境因子对生态系统碳交换产生影响^[20]。研究表明,降水量的增加能够提高土壤含水量^[17],降低土壤温度^[21]。其中,土壤含水量的变化直接影响植物对水资源的获取^[22],当植物受干旱胁迫时,将分配更多的光合产物到植物根系以获取足够的水分^[23]。此外,土壤含水量能改变土壤透气性、土壤微生物的活性等,进而间接影响生态系统呼吸^[24-26]。土壤温度通过影响植物根系呼吸和微生物活动对生态系统碳交换产生影响^[27]。土壤温度升高,能够促进土壤中有机质的分解和微生物活动,增加土壤温室气体的排放^[28]。因此,解析降水改变下生物因子(如:群落生物量)、非生物因子(如:土壤含水量、土壤温度)对碳交换组分的相对作用大小,对于我们理解降水改变对生态系统碳交换的影响机制有重要意义。

我们利用完全控水防雨棚,设计了100mm-500mm的梯度实验,就降水量改变对内蒙古草原碳交换的影响进行了研究。旨在回答以下三个问题:1)随着生长季降水量的梯度变化,生态系统的群落生物量、土壤含水量、土壤温度如何变化?2)随着生长季降水总量的梯度变化,生态系统碳交换组分(NEE、GEP和ER)如何变化?3)在生态系统碳交换发生变化过程中,生物因素(群落生物量)和非生物因素(土壤含水量和土壤温度)的相对作用如何?

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验地位于内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的长期围封样地(43°38'N, 116°42'E, 1250-1260 m),该区域属于温带典型草原。年平均降水296.8mm(1982-2012年),其中92.8%的降雨集中于生长季(5-10月份),此期间的平均降水量为275.6mm。全年平均气温0.3℃(1982-2012年),最低月平均气温为12月的-21.6℃,最高月平均温度为7月的19.0℃。土壤

类型为栗钙土. 群落类型为羊草为主要建群种的典型草原群落. 主要优势物种为羊草 (*Leymus chinensis*)、大针茅 (*Stipa grandis*)、羽茅 (*Achnatherum sibiricum*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*) 和糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*).

1.2 实验设计

实验采用随机区组设计, 共设置 6 个区组. 根据内蒙古草原站 1982-2012 年的降水资料: 31 年的平均降雨量 295mm, 最大降雨量是 2012 年的 468.2mm, 最小降雨量是 2005 年 135mm. 生长季(5-10 月份) 平均降水量 275.6mm, 占全年的 93%. 本实验共设置 9 个降水处理, 分别为 100mm、150mm、200mm、275mm(长期平均对照)、300mm、350mm、400mm、450mm、500mm. 本实验降雨梯度包含了该区域最低和最高的降水量, 每个降雨处理 6 次重复, 总共有 54 个小区, 每个小区的面积是 4m × 4m. 考虑到该区域生长季前期(5-6 月份)、中期(7-8 月份) 和后期(9-10 月份) 的降水量、降水次数和降水间隔存在差异, 按内蒙古草原站 1982-2012 年在生长季前、中、后期的降水次数和降水间隔的平均值, 本实验设计生长季前期(5-6 月份) 降水 8 次, 间隔为 8 天; 生长季中期(7-8 月份) 降水 10 次, 间隔为 6 天; 后期(9-10 月份) 降水 5 次, 间隔 13 天. 生长季降水量在前、中、后期的分配与内蒙古草原站气象记录相一致, 分别为降水量的 30%、50% 和 20%.

我们使用 Diviner 2000 便携式土壤水分廓线仪测量土壤(0-10cm) 体积含水量; 使用 iButton DS1922L 土壤温度记录器测定 10cm 处土壤温度, 记录频率为每半小时一次. 每年 8 月中旬(最大生物量期) 测定地上生物量. 测定时, 在每个小区内, 随机选取一个 0.5m × 1m 的样方, 对于每个样方, 按物种分别齐地剪下地上部分, 装入纸袋. 回到实验室后, 将样品放入 65℃ 的烘箱内, 烘至恒重后称取干重. 以各物种地上生物量之和为当年群落生物量.

生态系统碳交换测定采用静态同化箱法^[5-7,8], 使用美国 Li-cor 公司生产的 Li-840(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 测定同化箱内 CO₂ 浓度. 同化箱为透明有机玻璃箱(0.5m × 0.5m × 0.5m), 箱内装有 2 个小风扇, 目的是将箱内空气混合均匀. 箱内装有一个温度计, 用来记录测定过程中箱内空气的温度. 生长季测定前, 每个样区安放与同化箱配套的 PVC 材质的底座(0.5m × 0.5m), 该底座底部入土 5cm, 上沿与

地面齐平, 通过水槽密封, 确保放上同化箱形成密闭的气室. 碳通量组分测定从 5 月份开始到 10 月份结束, 每个月测定 3 次. 全年测定 15 次. 每次测定选择晴天上午 8:00-11:00 期间进行测定. 测量分两个过程: NEE 的测定和 ER 的测定. NEE 测定前, 抬起同化箱使箱内空气与周围大气一致; 测量时, 将同化箱放置于 PVC 底座上, 开始测定箱内气体浓度变化, 同时记录初始箱内温度. 计时 1min 后停止测定, 并同步记录箱内温度及土壤温度; NEE 测量结束后, 将同化箱抬起, 使箱内气体与周围大气混匀, 以便以后 ER 的测定. ER 测定前, 将不透明的布罩罩住同化箱形成暗环境, 之后的操作过程与 NEE 测定一致. 为了保证数据的准确, 选择测定中间 40 秒的数据变化来计算 NEE 或 ER, 公式如下^[29]:

$$F_c = \frac{VP_{av}(1000 - W_{av})}{RS(T_{av} + 273)} \times \frac{dc}{dt}$$

F_c 代表碳通量(μmol m⁻² s⁻¹), 表示单位时间单位面积 CO₂ 释放量; V 代表同化箱体积(m³), P_{av} 代表平均气压(kPa), W_{av} 代表水的平均摩尔百分比(mmol mol⁻¹), R 代表理想气压值(8.314 J mol⁻¹ K⁻¹), S 底座面积(m²), T_{av} 箱内平均空气温度(℃), dc/dt 代表 CO₂ 浓度随时间变化线性关系的斜率. 根据 NEE 和 ER 的测定值, 按如下公式计算 GEP.

$$GEP = |NEE| + |ER|$$

1.3 数据统计

每个处理的群落生物量以 6 个重复的平均值表示. 本文中每个小区的 NEE、ER、GEP 的值为 15 次测定的平均值. 土壤温度是整个生长季的日平均值, 土壤含水量为整个生长季平均值. 通过方差分析确定处理的效应是否显著, 然后用 Duncan 多重比较检验降水处理之间差异是否显著. 土壤含水量的变异用变异系数(CV%) 表示. 群落生物量、土壤含水量和土壤温度的变化量为各处理下的碳交换参数的值减去长期平均对照处理(275mm) 下相应的碳交换参数的值; NEE、GEP 和 ER 的响应率由各处理下的平均值除以长期平均对照处理(275mm) 的平均值. 采用回归分析检验群落生物量、土壤含水量和土壤温度变化量与降水量之间的关系, 检验 NEE、ER 和 GEP 响应率与降水量之间的关系. 采用 R 语言 relaimpo 软件包分析群落生物量、土壤含水量、土壤温度对 NEE、ER、GEP 的相对作用大小. 方差分析与 Duncan 多重比较使用统计软件 SAS v. 8.0(SAS Institute, Cary, NC, USA), 相

对作用大小的计算使用统计软件 R 2.5.0 (R Development Core Team 2007) ,采用 Sigma Plot 12.0(Systat Software Inc. ,Chicago ,USA) 绘图.

2 结果

2.1 土壤含水量、土壤温度和群落生物量对生长季降水量变化的响应

由表 1 可以看出 ,随降水量梯度的增加 ,土壤含水量显著增加 ,但土壤含水量的变异减小. 各降水量处理之间 ,土壤温度没有显著差异. 群落生物量随着降水量梯度的增加显著增加 ,但降水量超过 400mm 的三个梯度处理之间群落生物量无显著差异.

表 1 降水量改变对内蒙古草原生态系统土壤含水量、土壤温度和群落生物量的影响

Table 1 Effects of changing precipitation regime on soil moisture ,soil temperature and community biomass production inInner Mongolia grassland

降水量(mm)	土壤含水量(V/V%)	土壤含水量变异(%)	土壤温度(°C)	群落生物量(g m ⁻²)
100	12.66 ±0.62 f	46	15.61 ±0.16	83.52 ±13.94 e
150	12.04 ±0.56 f	44	15.62 ±0.17	120.7 ±11.76 e
200	13.68 ±0.58 ef	40	15.46 ±0.29	168.73 ±20.99 d
275	15.64 ±0.67d	40	15.39 ±0.25	200.89 ±15.96abcd
300	14.81 ±0.61 de	39	15.28 ±0.11	180.35 ±9.36 cd
350	16.36 ±0.60 cd	35	15.61 ±0.20	185.01 ±10.14 bcd
400	17.71 ±0.58 bc	31	15.49 ±0.12	219.38 ±8.19 abc
450	18.49 ±0.53 b	27	15.51 ±0.19	233.79 ±13.51a
500	20.76 ±0.59 a	27	15.29 ±0.21	225.21 ±12.57ab

注: 数值表示为平均值 ± 标准误 ,不同字母表示处理之间差异显著 $P < 0.05$.
Note: The value was MEAN ± SE ,different letters indicate significant differences between treatments at $P < 0.05$.

由图 1 可以看出 ,随着生长季降水量的增加 ,土壤含水量的变化量表现为线性增加 ,土壤温度的变化量表现为线性降低 ,而群落生物量的变化量表现为非线性增加.

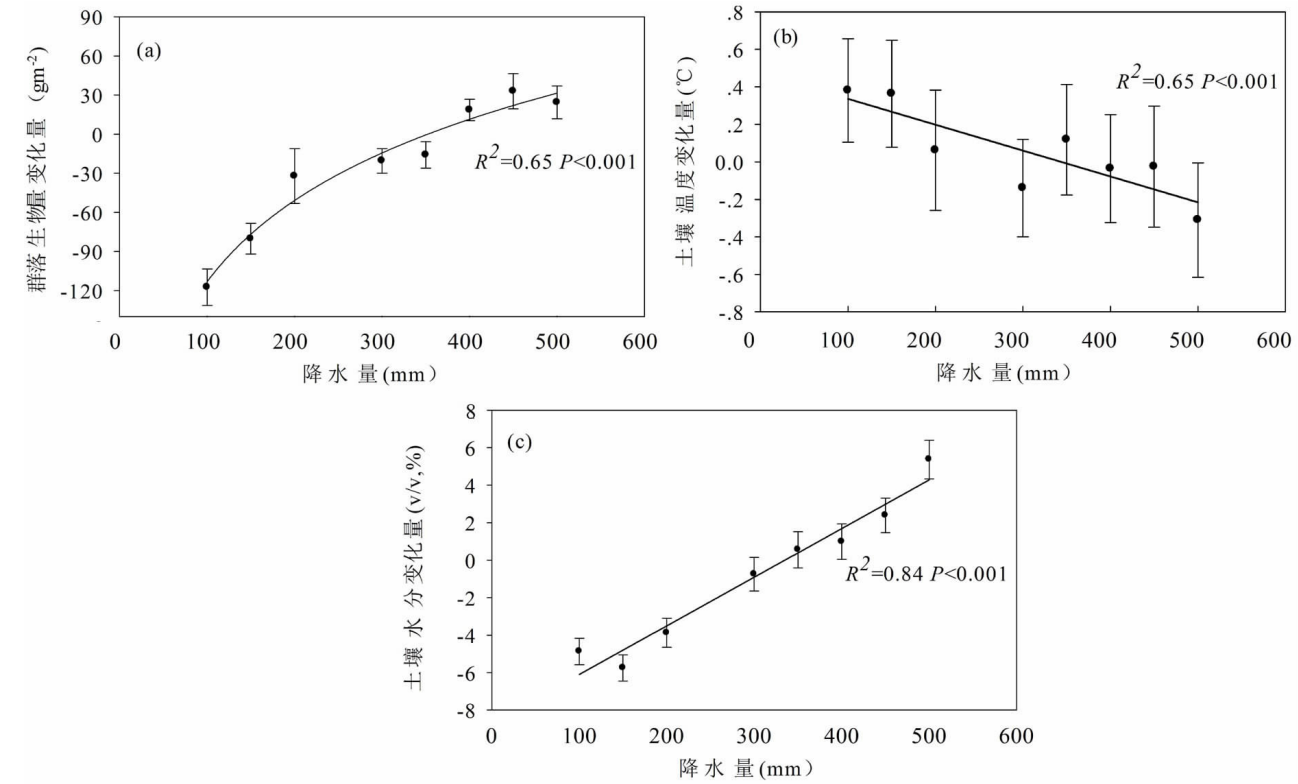


图 1 不同处理下群落生物量 (a) 、土壤温度 (b) 和土壤水分 (c) 的变化量与降水量的关系

Fig. 1 Relationships of alterations in biomass production (a) ,soil moisture (b) and soil temperature (c) to precipitation amount

2.2 生态系统碳交换对生长季降水量变化的响应

由图 2 可以看出,随着生长季降水梯度增加,净生态系统碳交换(NEE)、生态系统呼吸(ER)和生态系统总生产力(GEP)的响应均表现为逐渐增加的饱和

和响应曲线.其中,NEE 的饱和点出现在降水量 350mm 左右,ER 的饱和点出现在降水量 200mm 左右,GEP 的饱和点出现在降水量 275mm 左右.

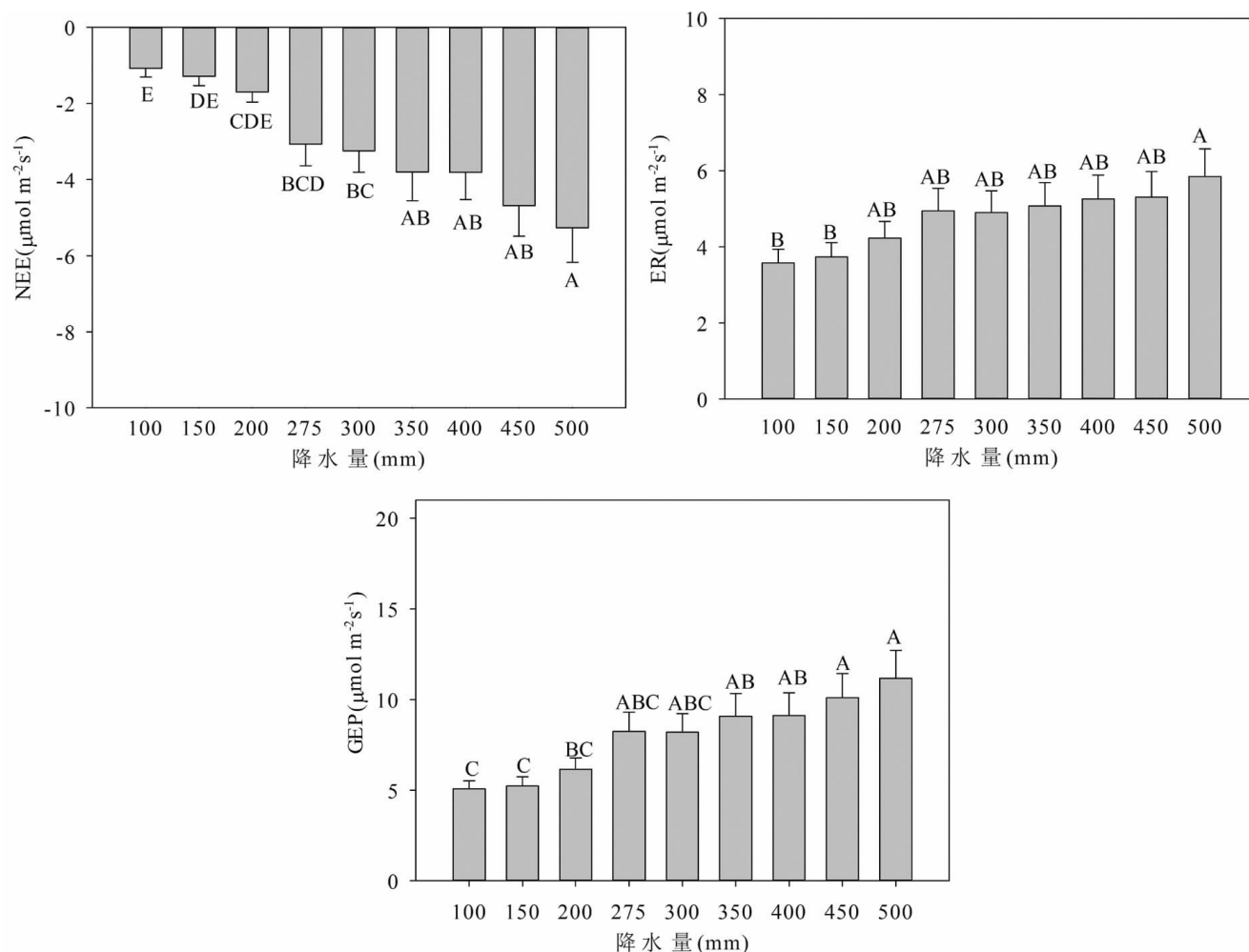


图 2 不同降水量处理下净生态系统碳交换(NEE)、生态系统呼吸(ER)和总生态系统生产力(GEP)
(不同字母表示处理之间差异显著 $P < 0.05$)

Fig. 2 Net ecosystem exchange(NEE) ecosystem respiration(ER) and gross ecosystem productivity(GEP) under different precipitation amount treatment (different letters indicate significant differences between treatments at $P < 0.05$)

从 NEE、ER、GEP 三者随降水梯度变化的响应率看(图 3),减水和增水处理下 NEE、ER 和 GEP 响应率的斜率存在显著差异,减水处理下响应率的斜率显著高于增水处理下响应率的斜率.

2.3 生物因素(群落生物量)和非生物因素(土壤含水量、土壤温度)对生态系统碳交换的影响

由图 4 可以看出,群落生物量、土壤含水量和土壤温度可以解释 NEE 变异的 42.39%,其中群落生物量可以解释 NEE 变异的 30.89%,而土壤水分含量与

土壤温度合起来只能解释 NEE 变异的 11.51%.群落生物量、土壤含水量和土壤温度可以解释 ER 变异的 49.68%,其中群落生物量可以解释 ER 变异的 41.90%,土壤水分含量和土壤温度可以解释 ER 变异的 7.78%.群落生物量、土壤含水量和土壤温度可以共同解释 GEP 变异的 49.88%,其中群落生物量解释了 GEP 变异的 40.60%,土壤含水量和土壤温度可以解释 GEP 变异的 9.28%.

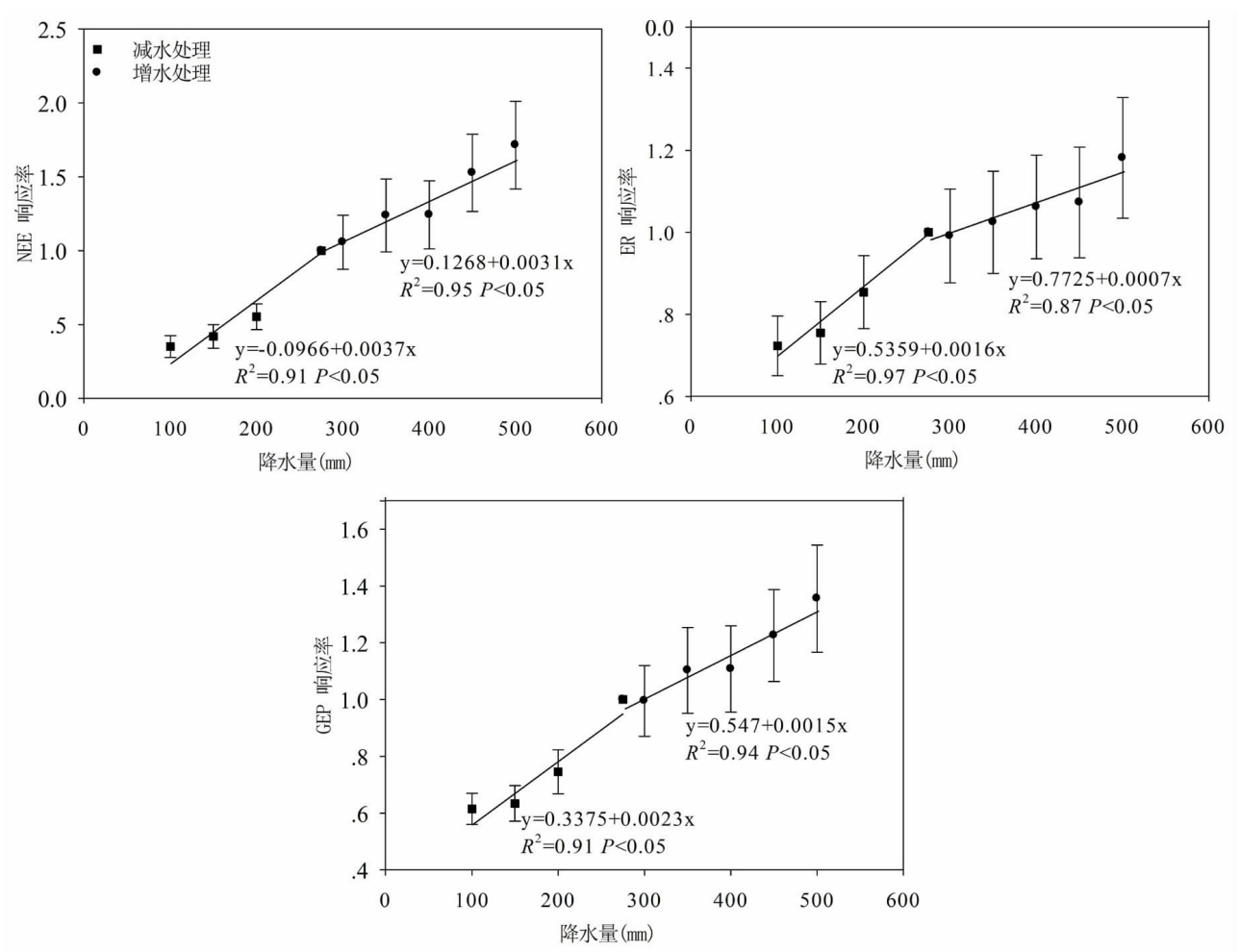


图 3 净生态系统碳交换、生态系统呼吸和总生态系统生产力对增加降水量和减少降水量的响应率

Fig. 3 Response ratio of net ecosystem exchange (NEE) ecosystem respiration (ER) and gross ecosystem productivity (GEP) to decreased and increased precipitation amount treatment

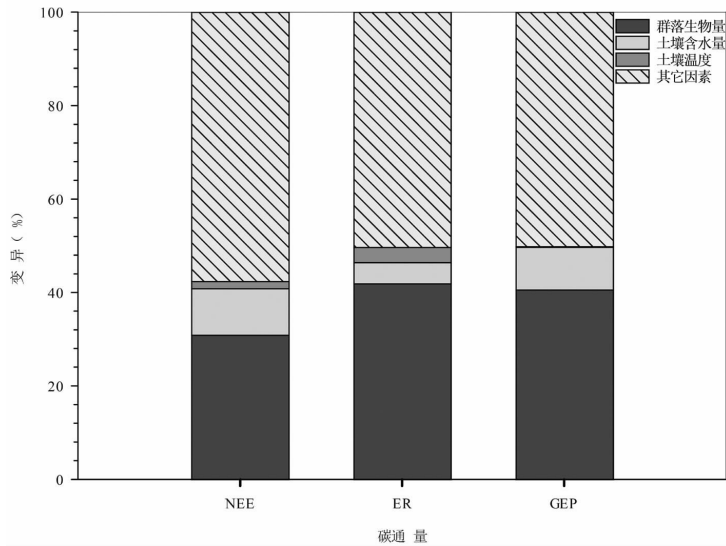


图 4 群落生物量、土壤含水量、土壤温度在净生态系统碳交换、生态系统呼吸和总生态系统生产力变化中的相对重要性

Fig. 4 Relative importance of community biomass production soil moisture and soil temperature in the changes of net ecosystem exchange (NEE) ecosystem respiration (ER) and gross ecosystem productivity (GEP).

3 讨论与结论

3.1 生长季降水量改变对碳交换的影响

本研究表明,降水量对内蒙古草原生态系统的碳交换具有显著的影响。前人研究发现,增加降水能够促进生态系统碳固定^[8,17]。本研究发现这种促进作用是一个非线性的过程,NEE、GEP 和 ER 均表现为逐渐增加的饱和响应曲线。值得一提的是,NEE、GEP 和 ER 达到饱和点对应的降水量并不一致,ER 在降水量 200mm 达到饱和,GEP 在降水量 275mm 达到饱和,而 NEE 在降水量 350mm 达到饱和。说明降水量改变对生态系统碳交换各组分的影响不一。NEE 更多地反映了植被的变化,在 350mm 降水量以下随着降水量的增加 NEE 持续增加,说明在该半干旱草原系统中植物生产对降水量的增加比较敏感;ER 不仅包括植物的呼吸过程而且土壤呼吸等微生物过程也参与其中,所以在降水量 200mm 以下就达到饱和可能是受到土壤微生物过程的影响。从三个指标的综合效应来看,在 200mm-350mm 的降水梯度下该系统的碳交换各组分达到饱和点,说明随着降水量的增加,水分可能不再是该生态系统生产力的主要限制因素,土壤养分,如氮素可能成为该系统的主要限制因素^[30]。因此,按气候变化模型所预测的,如果将来该区域降水量增加,该生态系统碳固持的限制因子可能会发生转换。

为了明晰该生态系统随降水量变化的响应规律,本研究比较了降水量减少(小于 275mm 的三个处理)和增加(大于 275mm 的 5 个处理)时 NEE、ER 和 GEP 的响应率的变化,根据其响应曲线斜率的变化,研究发现内蒙古草原碳交换对降水量减少的响应比降水量增加更为敏感,这与全球尺度上生态系统 NEE、ER 和 GEP 对减水敏感性小于增水的敏感性结果相反^[15]。导致这种差异的原因可能如下:实验区所在的内蒙古草原是干旱、半干旱生态系统,水分是最主要的限制因子,进一步干旱会显著影响该系统的碳固持能力。随着降水梯度的增大,水分不再是最主要的限制因素,该系统的碳交换能力随降水量增加表现出饱和和效应,因而对水分的敏感性显著降低。

3.2 生长季降水量改变对土壤含水量和土壤温度的影响

土壤水分是连接降水与生态系统的桥梁,降水经过截获、渗透、径流等过程最终存留在土壤中。本研究发现在内蒙古草原,随着降水量增加,土壤含水量呈现线性增加趋势(表 1,图 1),这与已有的研究结果一致^[31]。但是,本研究还发现,随着降雨量增加,土壤含水量逐渐增加的同时,土壤含水量的变异逐渐降低。这是因为,该区域属于干旱半干旱地区,受到光照、温度等因素的影响,该地区发生强烈的蒸发蒸腾作用,土壤含水量维持在较低的水平^[32-33]。研究发现,该区域较小和中等的降水事件发生后,土壤水分会迅速蒸发,使得土壤含水量波动较大^[31]。随着季节降水量的增加,土壤含水量提高,对光照和温度的缓冲能力增强,因此,大的降水事件发生后,更多的水会保持在土壤中,或者下渗^[31]。土壤表层水分蒸后,能够得到降水和土壤深层水分的补充,土壤水分的波动幅度因此而变窄^[32]。这些结果还说明,未来该区域如果降水增加,土壤水分的变异将减小,植被的生产力会更加稳定。

本研究发现,尽管土壤温度改变量随降水梯度的增加而线性降低(图 1),降水梯度增加没有引起土壤温度的变化(表 1),这可能是由于水具有较大的比热容,能够增强土壤对温度变化的缓冲能力,使土壤温度维持在较稳定状态。这说明,如果未来生长季的降水量增加,将降低该生态系统的土壤温度的变化。

3.3 群落生物量、土壤含水量和土壤温度在生态系统碳交换变化中的相对重要性

降水量的改变可通过影响群落生物量、土壤含水量和土壤温度来影响生态系统碳交换^[34],但是这些因子在生态系统碳交换变化中的相对作用鲜见报道。变异来源分析表明,生物因素(群落生物量)的变化是导致生态系统碳交换发生变化的主要驱动因子,群落生物量可以解释 NEE、GEP 和 ER 变异的 30.89%,40.60% 和 41.90%。前人研究也表明,不同草地类型之间,NEE 与地上生物量呈正相关关系^[35]。因此,随着降水量的增加,生态系统碳交换的变化主要是生物因素作用的结果。本研究还表明,随着降水量的改变,土壤含水量和土壤温度的变化也会影响 NEE、GEP 和 ER 等生态系统碳交换组分,但是,它们的相对作用较

小,二者合起来只能解释 NEE、GEP 和 ER 变异的 11.51%、9.28% 和 7.78%。

结语:本研究通过完全控水防雨棚实验,发现随着生长季降水量从 100mm 提高到 500mm,草原生态系统的碳交换显著提高,但是,这一过程表现为明显的非线性渐饱和过程。从响应率的变化斜率看,降水量减少(<275mm 的处理)的效应显著强于降水量增加(>275mm 的处理)的效应。变异来源分析说明,群落生物量的改变是草原生态系统碳循环的首要影响因素。这些结果为我们理解和预测未来降水变化对内蒙古草原生态系统碳交换的影响提供了依据,也为草原生态系统的水分管理提供了参考。

参考文献

- [1] NI J. Carbon storage in grasslands of China [J]. *Journal of Arid Environments* 2002, 50(2): 205-218.
- [2] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] KARL T R, TRENBERTH K E. Modern Global Climate Change [J]. *Science* 2003, 302(5651): 1719-1723.
- [4] WESTRA S, FOWLER H J, EVANS J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short duration extreme rainfall [J]. *Reviews of Geophysics* 2014, 52(3): 522-555.
- [5] CHEN SP, LIN GH, HUANG JH, et al. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2450 - 2461.
- [6] SELAYA N G, OOMEN R J, NETTEN J J C, et al. Biomass allocation and leaf life span in relation to light interception by tropical forest plants during the first years of secondary succession [J]. *Journal of Ecology*, 2008, 96(6): 1211 - 1221.
- [7] XIA JY, NIU SL, WAN SQ. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe [J]. *Global Change Biology*, 2008, 15(6): 1544-1556.
- [8] NIU SL, WU MY, HAN Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe [J]. *New Phytologist* 2008, 177(1): 209 - 219.
- [9] FANG JY, PIAO SL, TANG ZY, et al. Interannual variability in net primary production and precipitation [J]. *Science*, 2001, 293(5536): 1723-1723.
- [10] KNAPP A K, BEIER C, BRISKE D D, et al. Consequences of More Extreme Precipitation Regimes for Terrestrial Ecosystems [J]. *Bioscience* 2008, 58(2008): 811-821.
- [11] KNAPP A K, FAY P A, BLAIR J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland [J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2202-2205.
- [12] WELTZIN J F, LOIK M E, SCHWINNING S, et al. Assessing the Response of Terrestrial Ecosystems to Potential Changes in Precipitation [J]. *Bioscience* 2003, 53(10): 941-952.
- [13] BALLANTYNE A P, ALDEN C B, MILLER J B, et al. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years [J]. *Nature* 2012, 488(7409): 70-72.
- [14] XU ZZ, ZHOU GS. Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass [J]. *Journal of Experimental Botany* 2008, 59(12): 3317-3325.
- [15] WU ZT, DIJKSTRA P, KOCH G W, et al. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation [J]. *Global Change Biology* 2011, 17(2): 927 - 942.
- [16] GRIFFIS T J, BLACK T A, GAUMONT GUAY D, et al. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2004, 125(34): 207-223.
- [17] YAN LM, CHEN SP, HUANG JH, et al. Increasing water and nitrogen availability enhanced net ecosystem CO₂ assimilation of a temperate semiarid steppe [J]. *Plant and Soil* 2011, 349(12): 227-240.
- [18] RISCH A C, FRANK D A. Effects of increased soil water availability on grassland ecosystem carbon dioxide fluxes [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 91-103.
- [19] VERMA S B, DOBERMANN A, CASSMAN K G, et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2005, 14(8): 1854-1876.
- [20] BERNACCHI C J, VANLOOKE A. Terrestrial ecosystems in a changing environment: a dominant role for water [J]. *Helia* 2015, 32(51): 11-18.
- [21] LIU LL, WANG X, LAJEUNESSE M J, et al. A cross biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes [J]. *Global Change Biology* 2015, 22(4): 1394-1405.
- [22] VICCA S, GILGEN A K, SERRANO M C, et al. Urgent need for a common metric to make precipitation manipulation experiments comparable [J]. *New Phytologist* 2012, 195(3): 518 - 522.
- [23] CHAPIN FS, MATSON P A, MOONEY H A, et al. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. Berlin: Springer 2011: 369-397.
- [24] SOWERBY A, EMMETT B A, TIETEMA A, et al. Contrasting effects of repeated summer drought on soil carbon efflux in hydric and mesic heathland soils [J]. *Global Change Biology* 2008, 14(10): 2388-2404.

- [25] SUSEELA V , CONANT R T , WALLENSTEIN M D , et al. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment [J]. *Global Change Biology* 2012 , 18(1) : 336-348.
- [26] WANG Y , HAO Y , CUI X Y , et al. Responses of soil respiration and its components to drought stress [J]. *Journal of Soils and Sediments* , 2014 , 14(1) : 99-109.
- [27] 穆少杰 , 周可新 , 陈奕兆 , 等 . 草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展 [J]. *草地学报* 2014 22(3) : 439-447.
- [28] 徐淑新 , 张丽华 , 郭笃发 . 草地生态系统碳通量研究进展 [J]. *环境科学与管理* 2010 35(7) : 146-149.
- [29] JASONI RL , SMITH SD , ARNONE JA . Net ecosystem C_2 exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO_2 [J]. *Global Change Biology* 2005 , 11(5) : 749 - 756.
- [30] BAI YF , WU JG , HAN XQ , et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau [J]. *Ecology* 2008 89(8) : 2140-2153.
- [31] 陈敏玲 , 张兵伟 , 任婷婷 , 等 . 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应 [J]. *植物生态学报* 2016 40(7) : 658-668.
- [32] BAI YF , JIANGUO WU , CLARK C M , et al. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands [J]. *Global Change Biology* 2010 16(2) : 889-889.
- [33] EUGENE B J , WENG ES , LUO YQ. Ecohydrological responses to multifactor global change in a tallgrass prairie: A modeling analysis [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2010 115(4) : 701-719.
- [34] 林德碌 . 中国温带草原生态系统结构与功能对降水量变化的响应 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 2011.
- [35] 黄祥忠 , 郝彦宾 , 王艳芬 , 等 . 极端干旱条件下锡林河流域羊草草原净生态系统碳交换特征 [J]. *植物生态学报* 2006 30(6) : 894-900.

(责任编辑: 李建忠 , 付强 , 张阳 , 罗敏; 英文编辑: 周序林 , 郑玉才)