

东亚森林、草地碳利用效率及碳通量 空间变化的影响因素分析

安相¹, 陈云明^{2,3}, 唐亚坤^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:森林和草地是陆地生态系统的重要组成部分,研究整合基于涡度相关法观测碳通量的已发表文献,共选取东亚地区 40 个拥有 1 年以上数据的通量站(森林 26 个,草地 14 个),分析碳利用效率(CUE)以及净生态系统生产力(NEP)、总生态系统生产力(GEP)、生态系统呼吸(RE)的空间变异特征及其影响因素。东亚地区的森林和草地为碳汇,且森林的碳汇显著高于草地($p < 0.001$),其 NEP 分别为 $328.64 \pm 256.46 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $63.43 \pm 42.99 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。森林和草地的 CUE 分别为 0.21, 0.20, 影响森林 CUE 变化的因素主要是林龄,呈线性负相关关系($p < 0.001$)。影响草地 CUE 的因素主要是年均降水量(MAP),呈线性负相关关系($p < 0.05$)。森林和草地的 GEP, RE 均是随纬度的升高而线性降低, NEP 与纬度呈现二次函数关系,随纬度升高而先升高后降低。森林和草地的 GEP, RE 都与 MAP 呈线性正相关关系,且 NEP 与 MAP 呈先升高后降低的二次函数关系,其中森林和草地的饱和降水量大约为 1 300 mm 和 390 mm。森林的 GEP, RE 与年均温(MAT)呈现线性正相关关系。森林和草地的 GEP, RE 与增强型植被指数(EVI)呈线性正相关关系。

关键词:森林; 草地; 碳利用效率; 碳通量; 涡度相关法

中图分类号: S718.5; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0079-09

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.012

Factors Affecting the Spatial Variation of Carbon Use Efficiency and Carbon Fluxes in East Asian Forest and Grassland

AN Xiang¹, CHEN Yunming^{2,3}, TANG Yakun^{2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water
Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water
Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Forest and grassland play an essential role in the terrestrial ecosystem. The objective of this study is to analyze the spatial variation characteristics and influence factors of carbon use efficiency (CUE), gross ecosystem production (GEP), ecosystem respiration (ER), and net ecosystem production (NEP) based on more than one year data which were obtained from 40 sites (26 forest sites, 14 grassland sites) in the East Asian region from published literatures. Forest and grassland in the East Asian region both exhibit carbon sinks, while forest showed significantly higher value than grassland ($p < 0.001$). The average NEP in forest and grassland in the East Asian are $328.64 \pm 256.46 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ and $63.43 \pm 42.99 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively. The average CUE in forest and grassland are 0.21 and 0.20 in this region, CUE of forest is negatively correlated with the forest age and mean annual precipitation (MAP), respectively. The results show that GEP and ER in forest grassland linearly decrease with an increase in latitude. In addition, relationship between NEP and latitude can be described by quadratic function. There is a clear linear relationship between GEP, ER with MAP in both forest and grassland. The results also show that MAP and NEP first increase

收稿日期: 2016-09-29

修回日期: 2016-10-24

资助项目: 西北农林科技大学博士科研启动费(Z109021508); 中央高校基本科研业务费(Z109021606); 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-3)

第一作者: 安相(1990—), 男(锡伯族), 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 从事陆地生态系统碳汇相关研究。E-mail: xiangan10@163.com

通信作者: 陈云明(1967—), 男, 陕西渭南人, 博士, 研究员, 主要从事植被与水土保持的相关研究。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

and then decrease with a quadratic function relationship, NEP is the maximum when amounts precipitation are 1 300 mm and 390 mm for forest and grassland, respectively. GEP and ER in forest show a positive relationship with mean annual temperature. Moreover, GEP and RE in both forest and grassland showed a positive linear correlation with vegetation index.

Keywords: forest; grassland; CUE; carbon dioxide flux; eddy covariance

大气中有 1/3 的碳都被陆地生态系统固定^[1],因此,准确评价区域乃至全球的碳收支变化对于“碳失踪”问题的研究具有重要意义^[2]。森林和草地大约占到全球陆地生态系统的 51%(其中森林约占 31%,草地约占 20%),是陆地生态系统的重要组成部分^[3-4],有研究认为森林生态系统是主要的碳汇,而草地生态系统在不同的时空条件下呈碳源/汇转化的现象^[5]。东亚地区是陆地生态系统重要的组成部分,因此,探明该区域森林和草地碳收支状况、碳利用效率特征及其影响因素,有助于了解气候变化背景下全球碳循环变化趋势并为植被碳汇的管理提供依据。

生态系统碳利用效率(CUE)是净初级生产力(NPP)与总初级生产力(GPP)的比值,是表征生态系统固碳能力及效率的重要参数^[6-7]。Delucia 等综合了 1975—2005 年多个通过生物计量法和模型估计法获得森林 CUE 的研究^[8],认为不同类型森林的 CUE 在 0.20~0.83 之间波动,且发现 CUE 与林龄具有线性相关关系。Piao 等利用生物计量法和涡度相关法获得的全球碳变化数据集^[9],认为 CUE 可以达到 0.5 左右,并且认为森林 CUE 与温度间呈二次函数曲线关系。Zhang 等利用 MODIS 对全球尺度陆地生态系统 CUE 的研究表明,其与温度和降水具有很好的相关性^[10]。目前很多研究多是利用遥感法观测进行研究,但不同的研究对 CUE 的估算存在很大差异^[11],因此,需要使用直接观测的数据分析 CUE 的现状及其影响因素,才能为模型的修正以及未来 CUE 的准确模拟提供支持。另外,CUE 的空间变异特征及影响因素还不明确,且对草地生态系统碳利用效率的研究则更是鲜有报道。

GEP, RE, NEP 是计算 CUE 的重要组成部分^[7],近年来,随着涡度相关技术的进步,已经成为直接观测通量的标准方法^[12],不少研究者在不同时空尺度下使用该观测法对森林、草地等生态系统的碳通量特征进行了相关研究。有研究认为 GEP, NEP, RE 具有一定的纬向分布差异^[13-14]。Chen 等对影响北半球陆地生态系统碳通量变化的气象因素、生物因素以及土壤特性进行了研究,认为 GEP, RE 与年均温(MAT)呈线性关系,与年均降水量(MAP)呈指数关系^[15]。Law 等研究了影响欧洲和美洲不同生态系

统碳通量时空变化的因子,认为 GEP 与 MAT 间具有线性正相关关系,RE 与 MAT 间具有指数相关关系^[13]。Soussana 等对欧洲 9 个草地生态系统碳通量进行了研究,认为影响草地间碳通量变异的因子主要是温度^[16]。Hirata 等阐释了东亚地区森林生态系统碳通量空间变异性的影响因素,认为 GEP 与 MAT 呈线性相关,RE 与 MAT 呈指数相关关系^[14]。碳通量的空间变化及其影响因素在不同的区域或植被类型间存在差异,而东亚地区森林和草地作为全球植被的重要部分,分析其碳通量的变异特征及其影响因素有助于对该地区以及全球碳汇的准确模拟以及管理。

本研究整合基于涡度相关法观测碳通量的文献,共选取东亚地区 40 个拥有 1 a 以上数据的通量站,其中森林站 26 个、草地站 14 个,以期进行以下研究:(1)初步探明森林和草地生态系统 CUE 的空间变化及其影响因素。(2)分析 NEP, GEP, RE 空间变化的影响因素。

1 材料与方法

1.1 通量数据收集

本研究采用的通量数据均是基于涡度相关法观测所得,数据来源于 2003—2016 年发表的文献。剔除异常降雨或异常高温(远高或低于多年平均降水及温度)的观测年份,最终筛选出 40 个观测时长大于或等于 1 a 的森林和草地的通量站。研究采用 2000—2014 年的 105 个有效站点年通量数据(表 1),包括五个国家,中国(27 个)、日本(8 个)、蒙古(2 个)、韩国(1 个)、马来西亚(2 个),其中森林站 26 个,草地站 14 个。

本研究所选取的通量站纬度范围 2.97°—51.78°N,经度范围 87.93°—142.10°E,气候带分布包括亚寒带、温带、亚热带以及热带。森林站包括落叶阔叶林(DBF)6 个、落叶针叶林(DNF)5 个、常绿阔叶林(EBF)6 个、常绿针叶林(ENF)3 个、针阔混交林(MF)6 个,70%的森林为天然林,其中日本的 Fujiyoshida 站及 Sapporo 站为次生林。草地站包括高寒草甸 4 个、草甸草原 2 个、典型草原 7 个、荒漠草原 1 个。

1.2 气象、植被数据收集

本研究所需的气象数据主要为空气温度和降水

量(表 1),数据来源于与通量数据相同的文献,通过计算观测年的空气温度和降水量的平均值作为年均温(MAT)及年均降水量(MAP)。有 5 个站点(尖峰岭、西双版纳、黄土高原、阿柔、Sapporo)的空气温度及降水量数据在文献中没有详细列出,对于缺失的数据,本研究使用亚洲通量网(AsiaFlux, <http://asiaflux.net/>)和中国通量网(ChinaFLUX, <http://www.chinaflux.org/>)公布的多年平均空气温度及平均降水量作为研究数据。

本研究使用的生物数据为林龄和 EVI(表 1),获

得林龄数据 22 个,70%的数据来源于已发表的文献,30%来源于亚洲通量网(AsiaFlux, <http://asiaflux.net/>)公布的站点概况。EVI 是对归一化植被指数(NDVI)的修正,可以更好地反映植被生长状况。在本研究中,我们通过美国俄克拉荷马州地球观测与模拟研究中心(EOMF, <http://www.eomf.ou.edu/>)公布的 MODIS 数据集(MOD13 Q1)所提供的 16 d, 250 m 分辨率的数据,获得每个研究站点观测年的 EVI 数据,其中日本 Akou 站 2001—2003 年的 EVI 数据缺失,在研究中将其剔除。

表 1 各站点基本信息

序号	观测年份	站点	纬度 N/(°)	经度 E/(°)	类型	MAP/mm	MAT/°C	EVI	林龄/a	参考文献
1	2003—2005	PSO	2.97	102.30	EBF	1733.33	26.33	0.5455	350	[14]
2	2001—2002	Lambir	4.33	113.83	EBF	2740.00	27.00	0.5768	350	[17]
3	2006—2009	尖峰岭	18.61	108.84	EBF	2348.75	19.80	0.5560	250	[18]
4	2010,2012—2013	海南儋州	19.55	109.48	EBF	1724.00	23.60	0.4852	10	[19]
5	2003—2008	西双版纳	21.95	101.20	EBF	1416.75	19.25	0.5570	350	[20]
6	2003—2004	鼎湖山	23.17	112.53	MF	1293.50	24.45	0.3878	60	[21]
7	2003—2012	千烟洲	26.73	115.05	ENF	1418.00	18.35	0.3623	20	[22]
8	2008—2009	会同	26.83	109.75	ENF	1271.10	16.55	0.3287	13	[23]
9	2013—2014	天目山	30.35	119.44	MF	1401.70	10.60	0.3346	—	[24]
10	2010—2011	浙江安吉	30.48	119.67	EBF	1518.80	13.90	0.3211	—	[25]
11	2008	西藏那曲	31.37	91.90	Grassland	650.50	-1.30	0.1214	—	[26]
12	2008	江苏下蜀	32.12	119.20	DBF	1001.20	15.20	0.3630	—	[27]
13	2010	河南西平	33.35	113.91	DBF	852.00	14.80	0.4009	8	[28]
14	2006—2007	三江源	34.35	100.55	Grassland	477.50	-1.10	0.1993	—	[29]
15	2001—2003	Akou	34.73	134.37	MF	962.00	15.43	—	16	[17]
16	2001—2004	KEW	34.97	135.98	ENF	1596.00	15.20	0.3478	45	[14]
17	2007—2008	小浪底	35.02	112.47	MF	407.00	15.24	0.2689	30	[30]
18	2000—2004	Fujiyoshida	35.45	138.77	再生 DNF	2054.60	9.60	0.3538	90	[14]
19	2007—2008	黄土高原	35.95	104.13	Grassland	381.80	6.70	0.1392	—	[31]
20	2001—2003	TERC	36.1	140.10	Grassland	1157.70	13.90	0.2408	—	[17]
21	2000—2004	Takayama	36.13	137.45	DBF	2033.00	6.60	0.3977	50	[14]
22	2010—2011	青海海晏	36.95	100.85	Grassland	354.20	1.00	0.2860	—	[32]
23	2002—2005	海北	37.62	101.30	Grassland	517.50	-1.26	0.2722	—	[17]
24	2006—2008	GDK	37.76	127.15	DBF	1487.00	11.50	0.3323	200	[33]
25	2009	青海阿柔	38.05	100.27	Grassland	400.00	0.70	0.2044	—	[34]
26	2009	疏勒	38.42	98.32	Grassland	388.20	-4.00	0.0747	—	[35]
27	2006—2009	北京大兴	39.53	116.25	DBF	560.00	12.80	0.2353	10	[36]
28	2006	库不其	40.38	108.55	Grassland	154.75	11.57	0.1142	—	[37]
29	2005—2006	多伦—草地	42.05	116.28	Grassland	413.70	2.60	0.1875	—	[38]
30	2003—2004	长白山	42.40	128.50	MF	622.90	3.60	0.3118	200	[39]
31	2001—2003	Tomakomai	42.73	141.52	DNF	1042.30	6.30	0.3912	45	[14]
32	2000	Sapporo	42.98	141.38	再生 DBF	1100.00	6.60	0.4050	100	[40]
33	2004—2006	阜康	44.28	87.93	Grassland	146.60	6.60	0.1694	—	[41]
34	2007—2010	长岭	44.58	123.5	Grassland	281.50	7.10	0.2133	—	[42]
35	2007—2008	通榆	44.59	122.52	Grassland	404.00	5.10	0.2274	—	[31]
36	2002	Teshio	45.05	142.10	MF	937.00	5.40	0.3446	200	[14]
37	2004—2006,2008	老山	45.33	127.67	DNF	639.00	2.80	0.3212	35	[43]
38	2003—2004	KBU	47.21	108.74	Grassland	260.00	1.20	0.1527	—	[14]
39	2003—2005	SKT	48.35	108.65	DNF	257.70	-1.60	0.1897	70	[44]
40	2007—2008	呼中	51.78	123.02	DNF	626.00	-4.40	0.2011	—	[45]

1.3 数据可靠性及计算方法

1.3.1 数据可靠性 由于不同研究者对通量数据处理方法的差异,观测时间的差异以及观测仪器的差异导致的研究结果不同,因此进行研究前需确定数据的可靠性。当前,国际上通用的通量观测系统主要是开路式涡度观测系统(OPEC)和闭路式涡度观测系统(CPEC),在本研究中 85% 的数据通过 OPEC 系统测得,我国的通量站中只有老山通量站使用的是 CPEC 系统,而日本的通量站则习惯两种系统同时使用,本研究中其他国家的数据都是使用 OPEC 测得。Bal-docchi 等的研究认为开、闭路系统所测结果差异性不大,误差不高于 5%^[12]。本研究中采用的数据计算时长除我国的三江源站和海北站是 15 min 外,其他都是 30 min,采样频率除日本的 Akou(8 Hz)、Fujiyoshida(5 Hz)、Takayama(5 Hz)外,其余都是 10 Hz,而且各研究观测年也相对集中(图 1)。

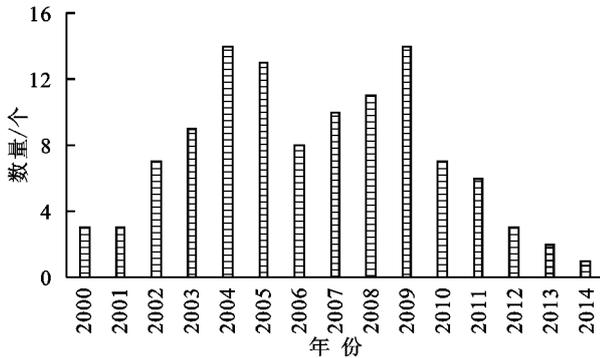


图 1 东亚森林、草地通量数据观测时间分布

1.3.2 通量数据计算 本研究采用的数据中有 80% 的研究采用了夜间数据拆分法^[46],通过两次或三次坐标轴旋转使平均垂直风速以及侧风速为零^[47],之后利用 WPL 公式消除压力、温度、湿度等水热条件发生变化对通量观测带来的影响^[48]。森林生态系统还需要进行储存项计算,用以消除冠层储存 CO₂ 的影响,草地生态系统不需要此计算(图 2)。通过以上过程得到初步的净生态系统生产力(NEP),之后还需要剔除异常数据值,本研究参考文献的摩擦风速 u^* 值在 0.1 m/s 到 0.4 m/s,符合 Reichstein 等公布的适宜范围 0.1~0.4 m/s^[46]。参考文献所使用的数据插补法主要有平均日变化法、非线性回归法以及查表法等,Falge 等的研究认为不同的插补法对结果影响不大,因此也可以认为通过以上方法计算所得的 NEP 具有可靠性^[49]。然后,再通过夜间 NEP 建立的函数方程^[46]估算出生态系统呼吸(RE),进而计算生态系统初级生产力(GEP)。

1.3.3 碳利用效率计算 一般认为生态系统碳利用效率(CUE)是表征生态系统固碳能力的重要参数,

其计算公式如下^[6-7]:

$$CUE = \frac{GPP - R_a}{GPP} = \frac{NPP}{GPP}$$

式中: NPP 为净初级生产力; GPP 为总初级生产力; R_a 为植被自养呼吸。

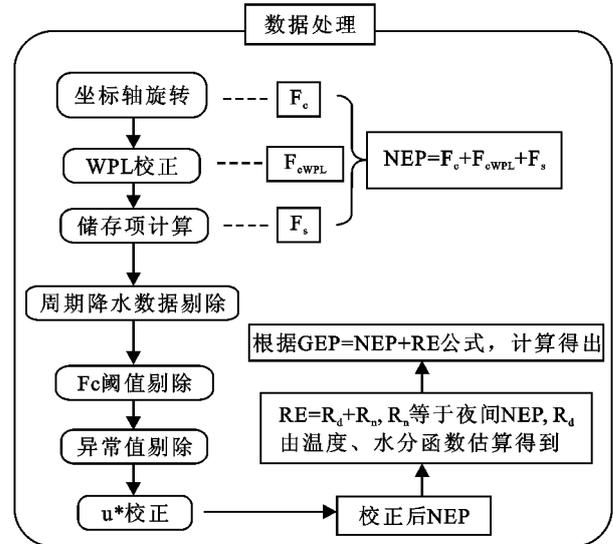


图 2 数据处理流程

1.3.4 统计分析 本研究利用 SPSS 17.0 对数据进行分析,其中单因素方差分析用于检验碳通量各组间的差异性, Pearson 相关分析用于检验气象、植被因素与 CUE、碳通量各组间的相关性。

2 结果与分析

2.1 东亚森林、草地生态系统的碳通量

东亚地区森林以及草地生态系统均呈现碳汇格局,其中森林生态系统呈现出较强的碳吸收能力, NEP, GEP, RE 分别为 $328.64 \pm 256.46 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1659.22 \pm 685.21 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1330.58 \pm 664.62 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。草地的碳吸收能力较弱,其 NEP, GEP, RE 分别为 $63.43 \pm 42.99 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $519.98 \pm 568.66 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $456.55 \pm 574.54 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。森林的 NEP, GEP, RE 显著高于草地 ($p < 0.001$) (图 3), GEP, RE 是草地的 3 倍, NEP 则可达到 5 倍。森林和草地的 NEP 具有较大差异的主要原因是森林的光合作用强度要远高于草地^[50],而呼吸比草地更稳定,且草地更易受到外界扰动从而加剧碳的排放,而 GEP, RE 差异大的原因主要是植被类型的差异,森林的冠层导度更大,叶绿体含量更高,因此其吸收及释放碳的能力也更强^[51-52]。

2.2 碳利用效率(CUE)及其空间格局

研究发现森林和草地的 CUE 无显著性差异 ($p = 0.82$), CUE 的平均值分别为 0.21, 0.20。其中森

林 CUE 最高的站点为浙江天目山柳杉、银杏混交林观测站,达到 0.44,最低的为马来西亚的 Lambir 热带雨林观测站,只有 0.002 9。草地 CUE 最高的站点为黄土高原草地站,达到 0.59,最低的为日本的 TERC 草地站,仅有 0.007 3。陈智认为北半球陆地生态系统呼吸光合比为 0.87,与本研究中发现森林、草地固定的碳有 80% 被呼吸消耗的结果相似^[37]。Kato^[14]、Hirata^[17] 等的研究据发现森林和草地的 CUE 变化范围为 0.20~0.30。不同的研究方法对于 CUE 的估计存在差异,DeLucia 等认为不同的森林类型 CUE 的范围可以达到 0.20~0.80^[8],Zhang 等利用 MODIS 影像对 CUE 的研究认为草地的 CUE 高于森林^[10],但是,在本研究中并未发现两种生态系统 CUE 的差异,这主要是因为不同的森林类型、草地种类的 CUE 之间也存在差异,仅以大类划分,简单平均导致差异不显著。

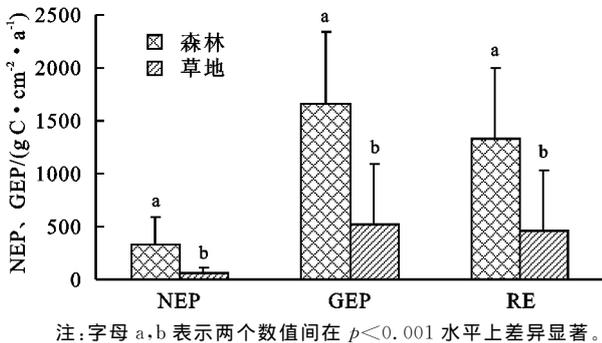


图 3 森林和草地间 NEP, GEP, RE 的差异

本研究发现东亚地区的森林、草地 CUE 纬向分布特点不显著(图 4),这也与 Zhang 等的研究结果相似^[10],虽然没有显著分布特点,但可以发现较高的 CUE 主要分布在中纬度地区。

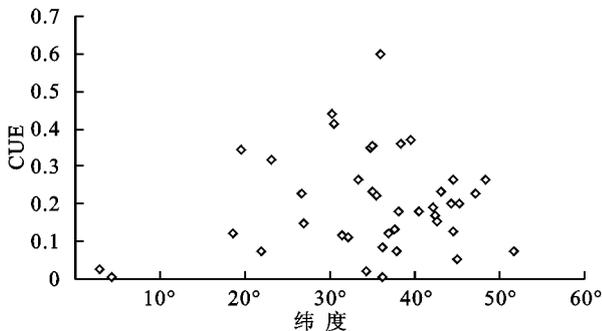


图 4 CUE 与纬度的关系

2.3 碳利用效率(CUE)变化的影响因素

本研究发现森林 CUE 与林龄具有极显著的线性负相关关系(图 5)。一般认为林龄高的森林对环境变化的响应不敏感,随着林龄的增加,森林对光、水、养分的利用效率降低,光合能力下降,但是呼吸增强,从而导致 CUE 下降^[7,9]。本研究未发现森林 CUE 与 MAT 和

MAP 之间的相关关系。草地 CUE 与 MAP 间存在显著的线性负相关关系(图 6),这与 Zhang 等对全球生态系统的研究一致^[10],森林 CUE 与 MAP 无相关关系,可能是因为大部分森林站点分布的地区降水充沛,对 CUE 的调控作用较弱。而草地站大部分分布在北部降水较少的地区,对降水的响应相对敏感^[8]。本研究中的东亚地区 NEP 随 MAP 增加先升高后降低, GEP 随 MAP 增加而升高,因而其比值会呈现出随 MAP 增加而下降的趋势。

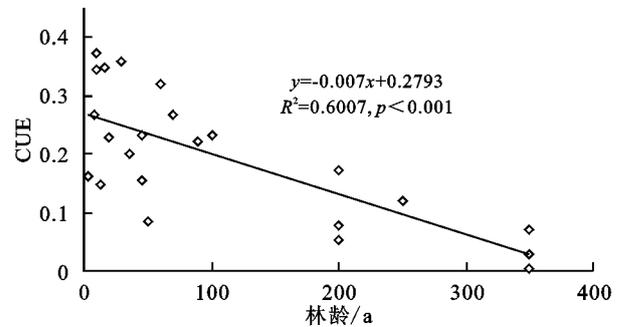


图 5 森林生态系统 CUE 与林龄的关系

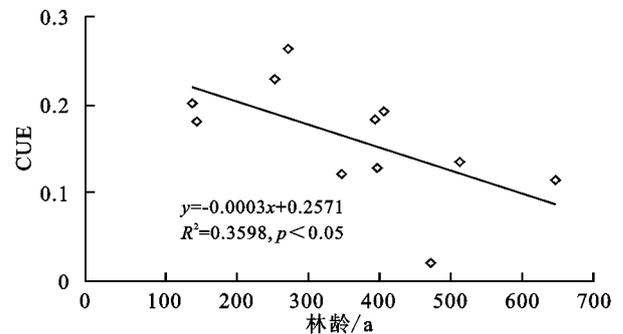


图 6 草地生态系统 CUE 与 MAP 的关系

2.4 NEP, GEP, RE 的空间变化特征

虽然东亚地区森林和草地的 CUE 纬向变化特征不显著,但 NEP, GEP, RE 均呈现显著的纬向分布特征(图 7),森林站点纬度范围为 2.97°—51.78°N, NEP 先随纬度升高而增加,当纬度接近 30°N 时开始随纬度升高而降低。草地站点主要集中在 30°—50°N, NEP 先随纬度升高而增加,当纬度达到 40°N 左右时开始随纬度升高而降低。而 GEP, RE 均随纬度的升高而线性降低。

NEP 的空间变化受到多种因素的影响,低纬度时 GEP 较高,但是 RE 也高,随着纬度的升高 RE 减弱, GEP 也在降低,在中纬度 NEP 达到最大值,因此 NEP 受到 GEP 和 RE 的制约在纬向上呈现二次函数关系。陈智对北半球陆地生态系统的研究表明 GEP, RE 与纬度呈负相关关系,但是认为 NEP 不存在纬向变异特征^[37],而王兴昌等对全球森林的研究则认为 GEP 与纬度具有线性负相关关系, NEP, RE

均与纬度呈二次函数关系^[53]。陆地生态系统的纬向变异特征在不同的研究中有很大差异,这是由植被类

型差异、环境差异、研究站点选取差异以及观测年份差异等影响造成的。

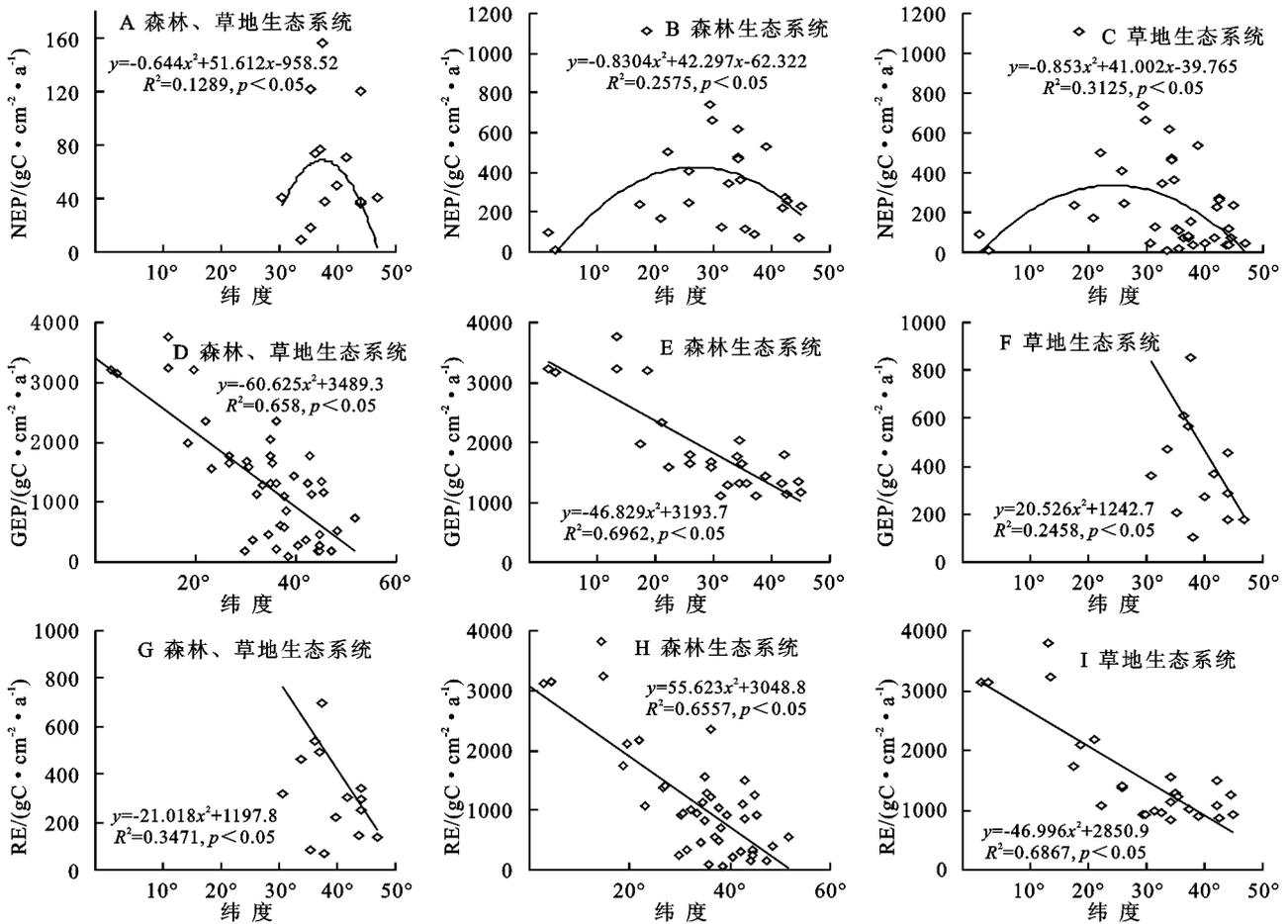


图 7 森林、草地生态系统 NEP, GEP, RE 的纬向分布特点

2.5 NEP, GEP, RE 变化的影响因素

2.5.1 降水

森林和草地的 NEP, GEP, RE 具有纬向分布特征,而不同的纬度往往具有不同的植被、气象特征,因此 NEP, GEP, RE 也受到生物或环境因素的影响^[5]。本研究中,森林和草地的 GEP, RE 与 MAP 呈现正相关关系(图 8),随 MAP 增加而线性增加,这与 Kato^[17]、王兴昌^[53]等的研究相一致。NEP 与 MAP 呈二次函数关系,随着 MAP 增加,NEP 先升高后降低,与王兴昌等的研究结果相似^[53],其中森林和草地的饱和降水量约为 1 300 mm 和 390 mm, GEP, RE 均随 MAP 的增加而增加,但是 RE-MAP 的斜率大于 GEP-MAP,即 RE 随 MAP 增加而升高的速率更高,因此当降水量达到一定值时 NEP 达到饱和。目前对 MAP 与 NEP 关系的研究存在很大差异, Hirata 等认为森林的 NEP 与 MAP 无相关关系^[14], Luyssaert 等也认为 NEP 不受环境因素的影响^[54],而 Chen 等的研究则认为 NEP 受到 MAP, MAT 的共同调控^[50],因此 MAP 对 NEP 的调控机制还有待于进一步深入研究。

2.5.2 空气温度

与降水量相似,空气温度也被认为是影响碳通量变化的重要因子之一^[17]。本研究发现森林的 GEP, RE 与 MAT 呈正相关关系(图 9),随温度升高而增加,这与 Kato^[14]、Hirata^[17]等及王兴昌^[53]等的研究结果相似。NEP 与 MAT 有呈二次函数关系的趋势,但是相关性并不显著, Hirata^[14]等和王兴昌^[53]等认为 NEP 与 MAT 具有二次函数关系。另外,本研究还发现草地的碳通量各组分与 MAT 间无显著相关性,可能是由于本研究中的草地站点偏少,且主要集中在低温地区,温度差异不明显。

2.5.3 增强型植被指数(EVI)

EVI 可以较好地反映植被的生长状况,而植被的生长状况对于生态系统的固碳能力有重要的影响^[13]。本研究发现,森林和草地的 GEP, RE 与 EVI 呈线性正相关关系(图 10),这与 Chen 等^[15]的研究相一致。从研究中可以看出植被生长状况对植被的光合作用、呼吸作用有重要的影响,植被生长状况越良好,生态系统的 GEP, RE 越高。研究未发现 NEP 与 EVI 的相关关系。

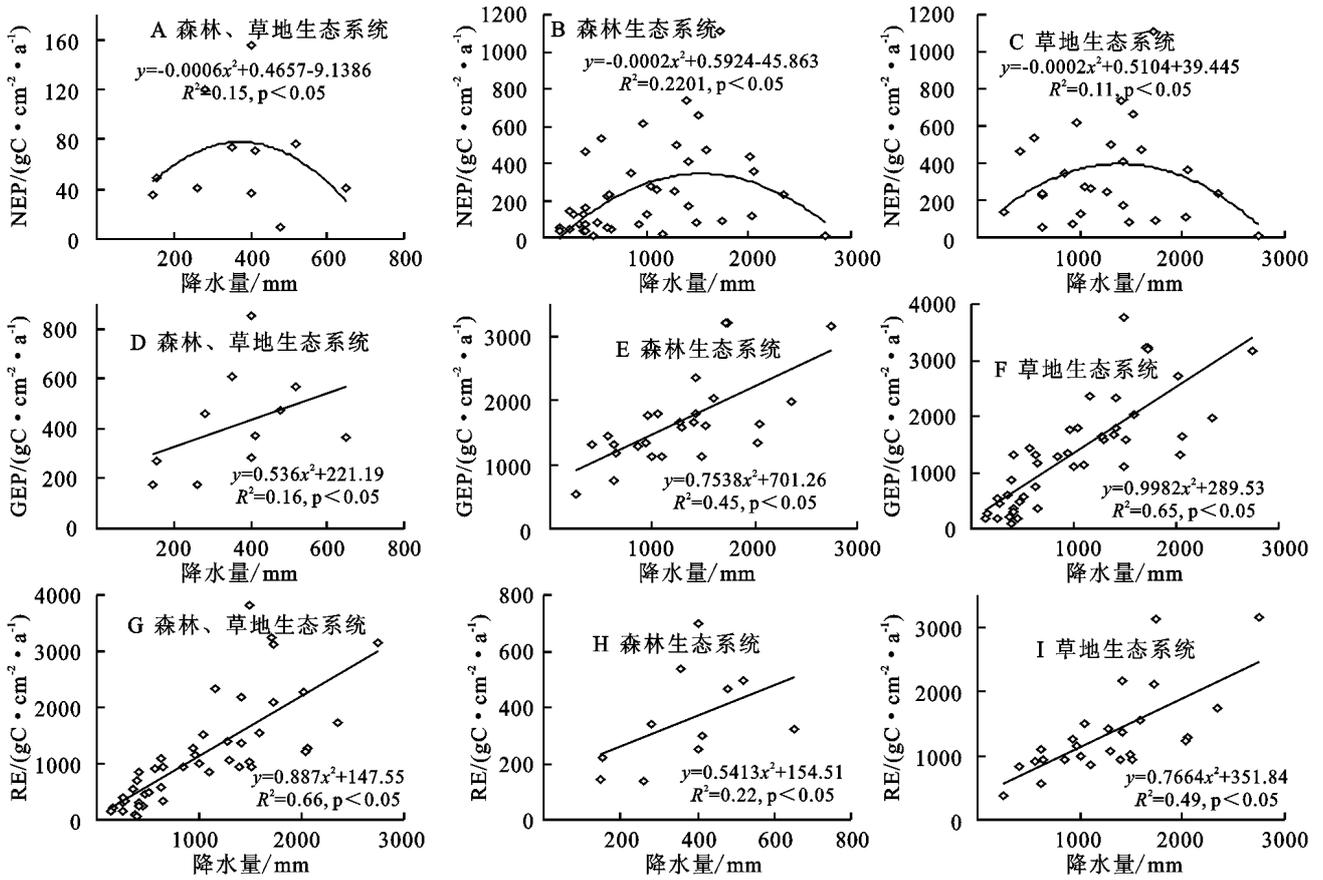


图 8 森林、草地生态系统的 NEP, GEP, RE 与 MAP 的关系

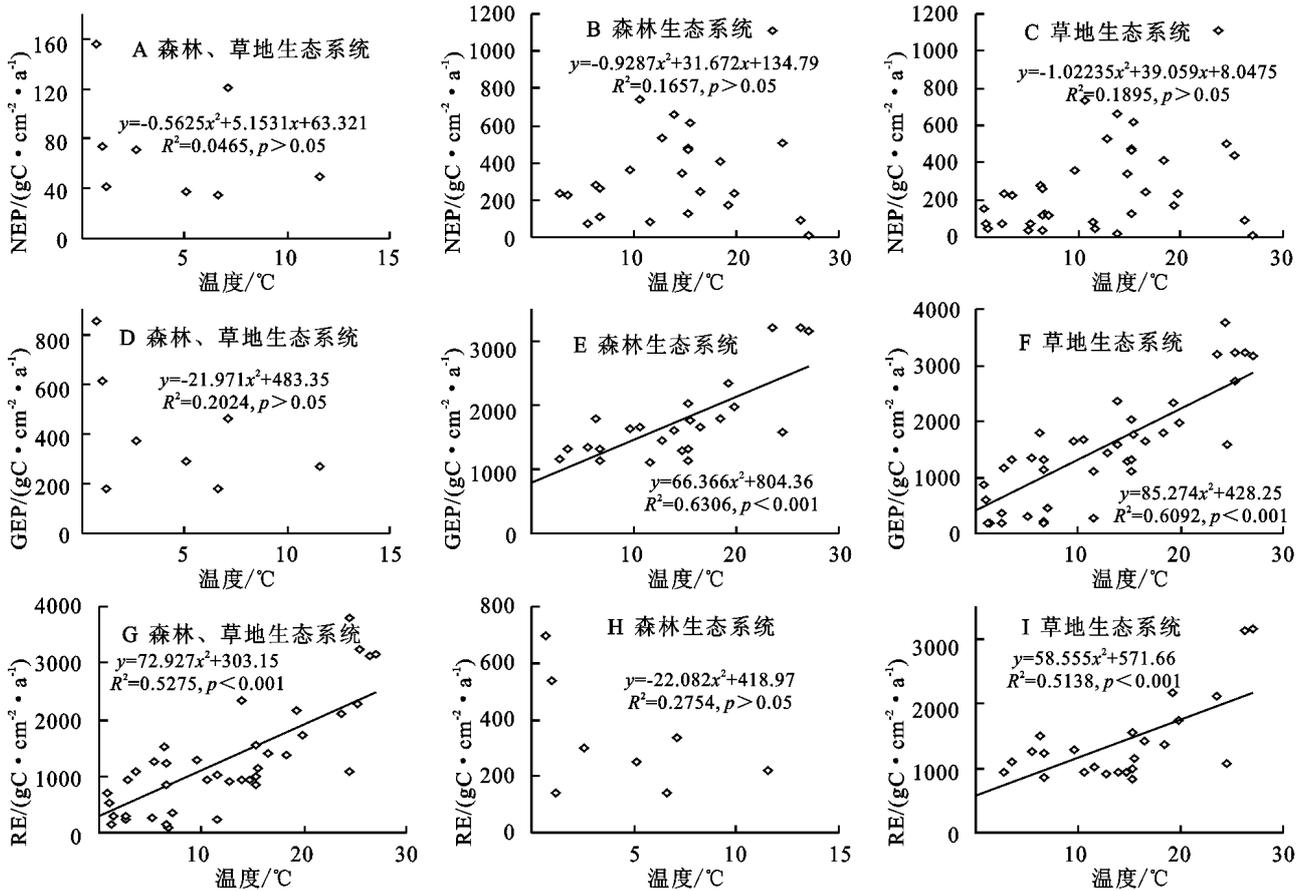


图 9 森林、草地生态系统的 NEP, GEP, RE 与 MAT 的关系

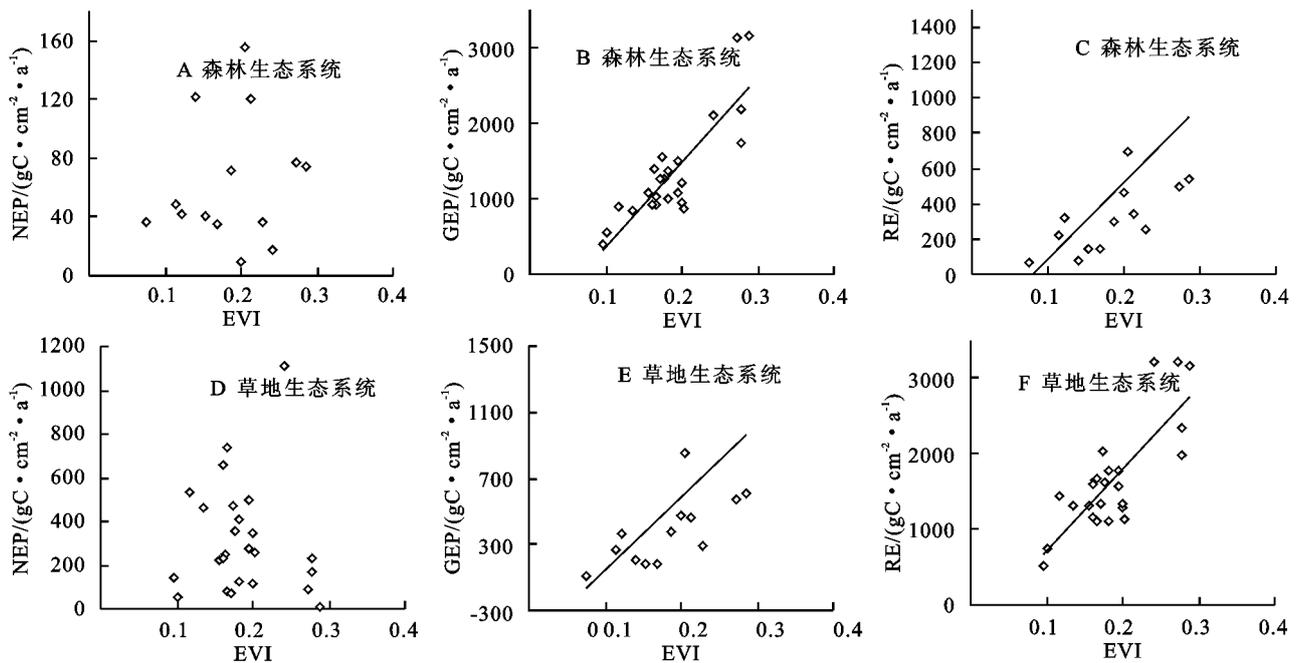


图 10 森林、草地生态系统的 NEP, GEP, RE 与 EVI 的关系

3 结论

本研究整合基于涡度相关法观测碳通量的已发表文献,共选取东亚地区 40 个拥有 1 a 以上数据的通量站,包括森林站 26 个,草地站 14 个。初步探明了森林和草地生态系统 CUE 的空间变化及其影响因素,并分析了其 NEP, GEP, RE 空间变化的影响因素。研究发现森林的 NEP, GEP, RE 分别为 $328.64 \pm 256.46 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1659.22 \pm 685.21 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1330.58 \pm 664.62 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 草地的 NEP, GEP, RE 分别为 $63.43 \pm 42.99 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $519.98 \pm 568.66 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $456.55 \pm 574.54 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 森林的碳通量各组分显著高于草地。森林和草地的 CUE 分别为 0.21, 0.20, 两者差异不显著, 纬向分布特征不显著。本研究发现林龄是影响森林 CUE 变化的主要因素, 呈线性负相关关系。MAP 是影响草地 CUE 的主要因素, 同样呈线性负相关关系。

森林和草地的 GEP, RE 均随纬度的升高而降低, 但 GEP 随纬度的变化速率大于 RE。森林和草地的 GEP, RE 与 MAP 呈线性正相关关系, NEP 与 MAP 呈先升高后降低的二次函数关系, 其中森林和草地的饱和降水量大约为 1300 mm 和 390 mm。森林的 GEP, RE 与 MAT 呈现线性正相关关系, NEP 与 MAT 有二次函数关系趋势, 但是相关性不显著。草地的 GEP, RE, NEP 与 MAT 无显著的相关关系。森林和草地的 GEP, RE 与 EVI 呈线性正相关关系, NEP 与 EVI 无显著相关关系。

参考文献:

- [1] Keeling C D, Bacastow R B, Carter A F, et al. A three dimensional model of atmospheric CO_2 transport based on observed winds: observation data and preliminary analysis: Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas [J]. American Geophysical Union, 1989, 55: 165-236.
- [2] 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的研究进展及其发展思路 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(SI): 1-21.
- [3] Ralph M. Global forest resources assessment (FAO). (2010). www.fao.org/forestry/en.
- [4] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 229-233.
- [5] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. Spatial pattern and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China [J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 798-810.
- [6] Ryan M G, Lavigne M B, Gower S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1997, 102: 28871-28883.
- [7] Chambers J Q, Tribuzy E S, Toledo L C, et al. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency [J]. Ecological Applications, 2004, 14(sp4): 72-88.
- [8] DeLucia E, Drake J E, Thomas R B, et al. Forest carbon use efficiency: Is respiration a constant fraction of gross primary production [J]. Global Change Biology, 2007, 13(6): 1157-1167.

- [9] Piao S, Luysaert S, Ciais P, et al. Forest annual carbon cost: A global-scale analysis of autotrophic respiration[J]. *Ecology*, 2010,91(3):652-661.
- [10] Zhang Y, Xu M, Chen H, et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2009,18(3):280-290.
- [11] 朱万泽. 森林碳利用效率研究进展[J]. *植物生态学报*, 2013,37(11):1043-1058.
- [12] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, et al. Fluxnet: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001,82(11):2415-2434.
- [13] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1):97-120.
- [14] Hirata R, Saigusa N, Yamamoto S, et al. Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008,148(5):761-775.
- [15] Chen Z, Yu G, Ge J, et al. Roles of climate, vegetation and soil in regulating the spatial variations in ecosystem carbon dioxide fluxes in the Northern Hemisphere[J]. *PloS ONE*, 2015, 10(4):1-14.
- [16] Soussana J F, Allard V, Pilegaard K, et al. Full accounting of the greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) budget of nine European grassland sites[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007,121(1):121-134.
- [17] Kato T, Tang Y. Spatial variability and major controlling factors of CO₂ sink strength in Asian terrestrial ecosystems: Evidence from eddy covariance data[J]. *Global Change Biology*, 2008,14(10):2333-2348.
- [18] 陈德祥. 尖峰岭热带山地雨林碳交换的动态特征和影响因素研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2010.
- [19] 吴志祥,谢贵水,杨川,等. 海南儋州地区橡胶林碳通量特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2015,30(1):51-59.
- [20] Zhang Y P, Tan Z H, Song Q H, et al. Respiration controls the unexpected seasonal pattern of carbon flux in an Asian tropical rain forest[J]. *Atmospheric Environment*, 2010,44(32):3886-3893.
- [21] 王春林,于贵瑞,周国逸,等. 鼎湖山常绿阔叶混交林 CO₂ 通量估算[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2006,36(S):119-129.
- [22] 唐亚坤. 中亚热带人工针叶林 2003-2012 年碳水通量年际变异的控制机制研究[D]. 北京:中国科学院大学,2014.
- [23] 张利平. 会同杉木人工林生态系统与大气间 CO₂ 通量特征的研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2010.
- [24] 牛晓栋,江洪,张金梦,等. 浙江天目山老龄森林生态系统 CO₂ 通量特征[J]. *应用生态学报*, 2016,27(1):1-8.
- [25] 杨爽. 浙江安吉毛竹林生态系统 CO₂ 通量观测研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2012.
- [26] 朱志鹏,马耀明,胡泽勇,等. 青藏高原那曲高寒草甸生态系统 CO₂ 净交换及其影响因子[J]. *高原气象*, 2015, 34(5):1217-1223.
- [27] 蒋琰. 北亚热带次生栎林碳收支的研究[D]. 南京:南京林业大学,2010.
- [28] 耿绍波. 河南西平杨树人工林生态系统碳通量及其环境相应研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [29] 吴力博,古松,赵亮,等. 三江源地区人工草地的生态系统 CO₂ 净交换、总初级生产力及其影响因子[J]. *植物生态学报*, 2010,34(7):770-780.
- [30] Huang H, Zhang JS, Meng P, Fu YL, Zheng N, et al. Seasonal Variation and Meteorological Control of CO₂ Flux in a Hilly Plantation in the Mountain Areas of North China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011,25(2):238-248.
- [31] Du Q, Liu H Z, Feng J W, et al. Carbon dioxide exchange processes over the grassland ecosystems in semiarid areas of China[J]. *Science China-Earth Science*, 2012,42(5):711-722.
- [32] 张法伟,李英年,曹广民,等. 青海湖北岸高寒草甸草原生态系统 CO₂ 通量特征及其驱动因子[J]. *植物生态学报*, 2012,36(3):187-198.
- [33] Kwon H, Kim J, Hong J, et al. Influence of the Asian monsoon on net ecosystem carbon exchange in two major ecosystems in Korea[J]. *Biogeosciences*, 2010,7(5):1493-1504.
- [34] 王海波,马明国,王旭峰,等. 青藏高原东缘高寒草甸生态系统碳通量变化特征及其影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2014,28(6):50-56.
- [35] 王杰,叶柏生,张世强,等. 祁连山疏勒河上游高寒草甸 CO₂ 通量变化特征[J]. *冰川冻土*, 2011,33(3):646-653.
- [36] 方显瑞. 杨树人工林生态系统碳交换及其环境响应[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [37] 陈智. 北半球陆地生态系统碳交换通量的空间格局及其调控机制研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [38] 张文丽. 内蒙古农牧交错区典型草地和农田生态系统碳通量的研究[D]. 北京:中国科学院植物研究所,2007.
- [39] 张军辉,于贵瑞,韩士杰,等. 长白山阔叶红松林 CO₂ 通量季节和年际变化特征及控制机制[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*. 2006,36(S):60-69.
- [40] Nakai Y, Kitamura K, Suzuki S, et al. Year-long carbon dioxide exchange above a broadleaf deciduous forest in Sapporo, Northern Japan[J]. *Tellus B*, 2003,55(2):305-312.
- [41] 刘冉,李彦,王勤学,等. 盐生荒漠生态系统二氧化碳通量的年内、年际变异特征[J]. *中国沙漠*, 2011,31(1):108-114.

(下转第 92 页)

参考文献:

- [1] 王青杵,王改玲,石生新,庄丽,孙泰森. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(2):71-79.
- [2] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184.
- [3] 吴攀升,秦作栋. 晋西北土地荒漠化现状及其分布规律[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2009,27(1):24-28.
- [4] 杨治平,张强,王永亮,张建杰,冀瑞瑞. 晋西北黄土丘陵区小叶锦鸡儿人工灌丛土壤水分动态研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):352-355.
- [5] 李金峰,杨智勇,薛丽萍. 晋西北缓坡丘陵风沙区生态修复的主要途径和技术措施探讨[J]. 山西水土保持科技,2009(1):8-10.
- [6] 赵德怀,李素清. 晋西北丘陵风沙区人工植被数量分类与排序研究[J]. 山西师范大学学报:自然科学版,2011,25(1):104-109.
- [7] 陈全龙,陈春,张帅. 造林绿化建设新农村:山西省右玉县全面发展林业的调查[J]. 林业经济,2007,11(10):44-46.
- [8] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 王丽艳,韩有志,张成梁,等. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J]. 生态学报,2011,31(21):6429-6441.
- [11] 张伟畅,周清,冯旖,等. 地貌和样点数对耕地土壤有机质插值精度的影响[J]. 土壤通报,2015,46(6):1290-1298.
- [12] 郭军玲,吴士文,金辉,等. 农田土壤微量元素含量的空间变异特征和影响因素[J]. 水土保持学报,2010,24(1):50-52.
- [13] 余存祖,彭琳,刘耀宏. 黄土区土壤微量元素含量分布与微肥效应[J]. 土壤学报,1981,28(3):317-326.
- [14] 周东美,邓昌芬. 重金属污染土壤的电动修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报,2003(4):505-508.
- [15] 戴树桂,董亮,王臻. 表面活性剂在土壤颗粒物上的吸附行为[J]. 中国环境科学,1999,19(5):392-396.
- [16] 何益波,李立清,曾清如. 重金属污染土壤修复技术的进展[J]. 广州环境科学,2006,21(4):26-31.

(上接第87页)

- [42] 董刚. 中国东北松嫩草甸草原碳水通量及水分利用效率研究[D]. 长春:东北师范大学,2011.
- [43] Wang Y L, Zhou G S, Wang Y H. Environmental effects on net ecosystem CO₂ exchange at half-hour and month scales over Stipakrylovii steppe in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148(5):714-722.
- [44] Li S G, Asanuma J, Eugster W, et al. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia [J]. Global Change Biology,2005,11:1941-1955.
- [45] 周艳丽,贾丙瑞,周广胜,等. 中国北方针叶林生长季碳交换及其调控机制[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2449-2456.
- [46] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm[J]. Global Change Biology, 2005,11(9):1424-1439.
- [47] Wilczark J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. Boundary Layer Meteorology, 2001,99:127-150.
- [48] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980,106(447):85-100.
- [49] Falge E, Baldocchi D, Olson R et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001,107(1):43-69.
- [50] Chen Z, Yu G R, Ge J P, et al. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,182/183:266-276.
- [51] Wang B, Li J, Jiang W W, et al. Impacts of the rangeland degradation on CO₂ flux and the underlying mechanisms in the Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. China Environmental Science, 2012,32(10):1764-1771.
- [52] 於方,朱文泉,曹东,等. 青海省因草地生态破坏造成土壤流失的经济损失核算[J]. 中国环境科学,2009,29(1):90-94.
- [53] 王兴昌,王传宽,于贵瑞. 基于全球涡度相关的森林碳交换的时空格局[J]. 中国科学: D 辑,2008,38(9):1092-1102.
- [54] Luyssaert S, Inglis I, Jung M. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database[J]. Global Change Biology, 2007,13(12):2509-2537.