

DOI: 10.11766/trxb201510210429

黑河中游植被生长季土壤呼吸和净生态系统碳交换量的季节变化*

孙敏敏¹ 王旭峰² 马明国³ 袁文平⁴ 李香兰^{1†}

(1 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

(2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

(3 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

(4 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要 基于涡度相关法和静态箱一气相色谱法的净生态系统碳交换量 (net ecosystem exchange, NEE) 与土壤呼吸 (soil respiration, R_s) 速率观测数据, 探讨了黑河中游不同土地利用方式下净生态系统碳交换量和土壤呼吸的季节变化, 以及土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献率。结果表明, 净生态系统碳交换量和土壤呼吸速率在时间尺度上呈现多峰变化趋势, 7月底至8月初达到峰值; 在空间尺度上受植被覆盖度的影响, 植被稀疏的荒漠、戈壁和沙漠呈现较为一致的变化趋势, 土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献率达20%~68%; 而植被密集的玉米地、果园和湿地则呈现较高的季节变异性, 土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献率为10%~21%。土壤呼吸的微小变动可能引起净生态系统碳交换量明显变化。

关键词 土壤呼吸; 净生态系统碳交换量; 土地利用方式; 植被覆盖度; 涡度相关法; 静态箱法
中图分类号 Q142.3; X171.1 **文献标识码** A

陆地生态系统在全球碳循环中起着至关重要的作用, 一方面陆地上植被通过光合作用从大气中吸收 CO_2 , 使之进入陆地生态系统; 另一方面通过土壤呼吸作用使土壤中的碳素以 CO_2 的形式释放到大气中^[1]。土壤呼吸是土壤碳排放的主要过程, 是影响土壤碳库和大气碳库动态变化的重要因素, 年通量 (以C计) 达到 $98 \pm 12 \text{ Pg}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$), 且以每年0.1 Pg的速度在增加, 轻微的土壤呼吸变动将会导致空气中 CO_2 浓度的明显改变^[2-3]。土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的最重要环节及土壤碳库的主要输出途径和大气 CO_2 的重要来源, 已经成为全球碳循环研究中备受关注的核心问题^[4-7]。

静态箱法和涡度相关法是测定陆地生态系统 CO_2 排放通量最为普遍的方法^[8], 其中静态箱法原理简单、仪器价格便宜、操作容易、移动便利、灵敏度高且适宜进行小尺度测量, 是农田和草地等生态系统净生态系统碳交换量测量的主要方法; 但是由于箱法效应的存在而削弱了观测气体的空间变化性, 箱体本身会扰动土壤环境而改变 CO_2 浓度梯度、气压梯度、湍流震动和气流, 从而影响测定的通量值。涡度相关法对观测环境不会造成扰动, 能够得到长期连续的通量数据, 可以用来测定较大尺度的下垫面通量; 但是涡度相关技术在观测时仍然受限於一些环境条件: 上风向没有足够的下垫面,

* 国家自然科学基金项目 (41205104, 91125004) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41205104 and 91125004)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xlli@bnu.edu.cn

作者简介: 孙敏敏 (1990—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事陆地生态系统碳循环研究。E-mail: sunminmin@mail.bnu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-21; 收到修改稿日期: 2016-04-08; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-05-06

晚间大气比较稳定,湍流较弱,测定仪器下方存在点源等因素都可能造成涡度相关技术测定精确性的降低。静态箱法与涡度相关法相结合,是观测陆地生态系统温室气体排放通量的有利途径,然而,静态箱法与涡度相关法在不同陆地生态系统类型对温室气体的观测尚缺乏综合比较分析。

土壤呼吸是净生态系统碳交换量的重要组分,土壤温度和土壤水分等环境因子是影响二者变化的主要因素^[9-11]。范连连等^[12]对准噶尔盆地南缘草本层片净生态系统碳交换量以及沙丘不同部位的土壤呼吸速率进行了测量,探讨了草本层片净生态系统碳交换量季节动态以及日过程的变化特征,沙丘不同部位土壤呼吸速率的年变化特征以及环境因子对草本层片净生态系统碳交换量以及土壤呼吸速率的影响,研究指出土壤温度和光合有效辐射是影响土壤呼吸和净生态系统碳交换量的主要因子。任志杰等^[13]采用根系排除法测定了华北平原不同农田轮作管理体系作物根区土壤呼吸和非根区土壤呼吸,以根区和非根区土壤呼吸差异除以根区土壤呼吸计算根系呼吸的贡献,结果表明,华北平原农田土壤根区和非根区土壤呼吸具有明显的季节变化规律,非根区土壤呼吸能够解释大部分根区土壤呼吸。不同陆地生态系统类型的土壤呼吸微小变化可能引起净生态系统碳交换量的极大变化,明确土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献率及二者的相关性,对研究陆地生态系统碳通量具有重要意义。

黑河中游地处河西走廊中部,属大陆性中温带干旱气候,降水少,蒸发量大,太阳辐射强烈;特殊的气候环境条件孕育了这里农田、果园、湿地、戈壁、荒漠和沙漠镶嵌分布的独特类型分布。该流域是环境演化的敏感区和生态脆弱区,对该流域不同土地利用方式下净生态系统碳交换量相关问题研究,对维持流域生态平衡、促进流域可持续发展具有极为重要的理论和现实意义。本文以黑河中游六种土地利用方式(玉米地、果园、湿地、沙漠、戈壁和荒漠)为研究对象,利用涡度相关法和静态箱法,对作物生长季不同生态系统类型的土壤呼吸和净生态系统碳交换量进行观测,分析土壤呼吸和净生态系统碳交换量的季节变化趋势及影响因子,探讨土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献率,旨在认识净生态系统碳交换量与土壤呼吸的基本特征,为典型生态系统碳循环研究提供理论依据与数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况

试验地点位于甘肃省河西走廊中部黑河流域生态—水文过程综合遥感观测试验(HiWATER)的专题试验站点内^[14],地处100°18′~100°49′E,38°46′~38°55′N之间,南依祁连山,北邻内蒙古阿拉善右旗。该地区属典型的温带半干旱季风气候区。水热资源丰富,但受季风的影响较为强烈,冬春季寒冷干燥,夏季温暖多雨,蒸发强烈,春旱尤为严重。张掖地区的年均温为3.97~8.04℃,夏季降水量变化范围为67~193mm,冬季降水量是4.69~10mm,表明降水季节分配不均,且冬、夏降水变化幅度大^[15]。降水地域分布不均衡,地区降水差值可达200mm以上。

黑河中游不同土地利用条件下土壤pH为8.34~9.02,容重为1.34~1.64g cm⁻³,土壤全氮和全碳含量分别为0.06~1.24g kg⁻¹和4.8~23.9g kg⁻¹(表1)。主要土地覆被类型为戈壁、沙漠、荒漠、果园、玉米地和湿地等,土壤全氮和全碳含量均为:玉米地>果园>荒漠>戈壁>沙漠,玉米地、果园和荒漠土壤以黏粒为主,而戈壁、沙漠以粉粒为主。湿地类型土壤基本理化性质因设备故障造成数据缺失。

1.2 涡度相关法观测净生态系统碳交换量

本文选取了黑河流域非均匀下垫面地表蒸散发的多尺度观测试验:通量观测矩阵6个涡度相关仪观测站点^[16],包括玉米地、果园、湿地、沙漠、戈壁和荒漠6种下垫面类型。在植被生长季(2012年5月底—9月底)采用涡度相关系统6种生态系统的净生态系统碳交换量进行连续测量。黑河中游观测区域及各站点分布如图1所示,大都选取地势平坦的下垫面。涡度相关系统主要由CAST3型三维超声风速温度计(Camp-bell Sci.公司,美国)和快速响应的LI-7500型开路红外CO₂/H₂O分析仪(Li-Cor公司,美国)组成,可测定冠层上方的三维风速、温度、湿度和CO₂浓度^[15]。不同土地利用类型下的涡度相关仪均与CR5000型数据采集器(Camp-bell Sci.公司,美国)相连,昼夜连续自动采集,原始数据采样频率为10Hz,每30min输出一组平均值^[17]。涡度相关塔的高度为2.85~7m(<http://westdc.westgis.ac.cn/hiwater/>

表1 黑河中游不同土地利用方式下表层土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of the topsoil in the middle reaches of the Heihe River relative to type of land use

土地覆被 Soil cover	经纬度 Longitude, latitude	土壤pH Soil pH	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	全碳 Total carbon (g kg ⁻¹)	土壤质地 Soil texture (wt. %)		
						砂粒Sand	粉粒Silt	黏粒Clay
玉米地 Corn field	100°22'E, 38°51'N	8.34	1.39	1.24	23.9	4.8	28.9	66.3
果园 Orchard	100°22'E, 38°51'N	8.59	1.34	1.00	23.8	4.4	22.0	73.6
湿地 Wetland	100°27'E, 38°59'N	-	-	-	-	-	-	-
荒漠 Wasteland	100°19'E, 38°46'N	8.38	1.51	0.74	20.0	2.1	33.1	64.8
戈壁 Gobi	100°18'E, 38°55'N	8.56	1.49	0.19	13.4	2.9	57.6	39.5
沙漠 Desert	100°29'E, 38°47'N	9.02	1.64	0.06	4.80	0.0	98.0	2.00

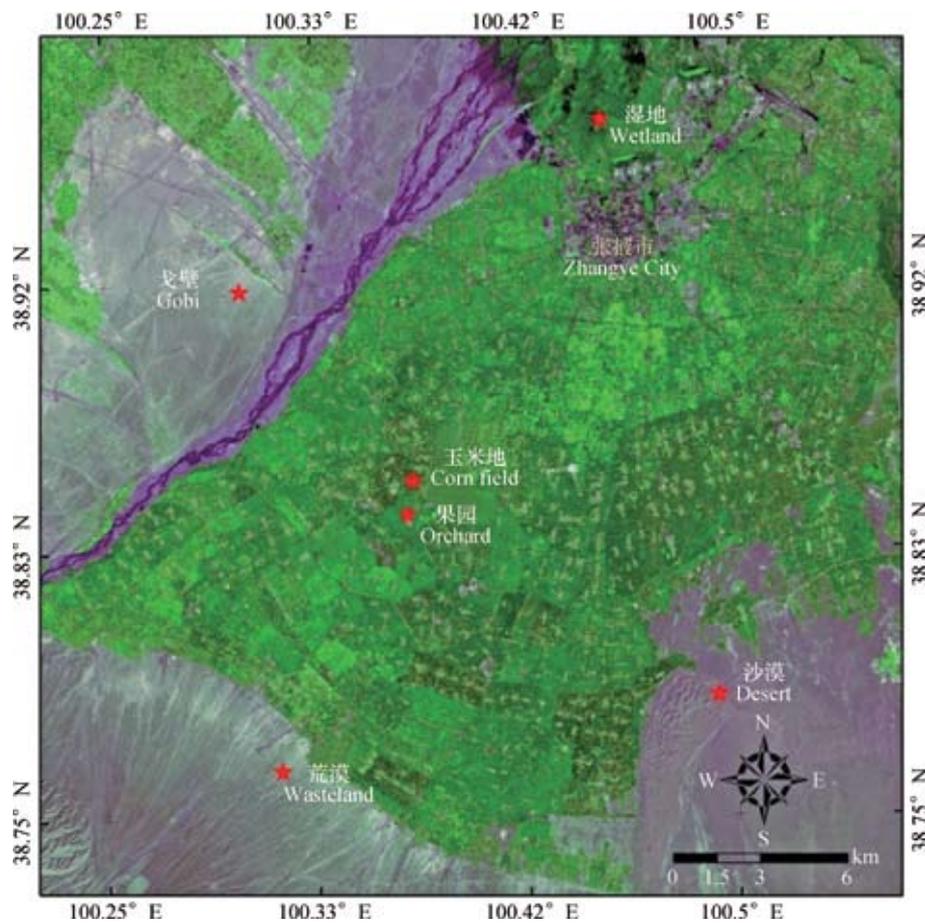


图1 黑河中游静态箱和涡度相关系统观测位置分布图

Fig. 1 Distribution of the static chambers and the eddy covariance observation posts in the middle reaches of the Heihe River

mso/page/2), 其覆盖区域半径为285~1 050 m。在连续观测过程中, 由于人为及环境因素使得观测数据中存在缺失值, 在处理数据的过程中剔除缺失值后进行了日平均值计算。本文涉及的涡度相关数据的选取日期与静态箱采样日期对应。同时, 选取白天净生态系统碳交换量的平均值作为静态箱取样当天的净生态系统碳交换量, 并与作物生长季静态箱法计算出的土壤呼吸建立相关性。

1.3 静态箱—气相色谱法观测土壤呼吸

采用静态箱—气相色谱法对六种土地利用方式下(戈壁、沙漠、荒漠、玉米地、果园及湿地)土壤呼吸进行观测, 观测时间为2012年6月16日至9月22日, 每10 d左右采样一次, 共进行了10次观测。采样前一天, 对样点进行了去植被处理, 为了尽量使箱式法测定的样点面积能达到涡度相关法代表的面积, 并捕捉通量空间变异性方面的信息, 其采样地点设在六种土地利用方式区域内各自涡度相关系统的通量贡献区内(半径为285~1 050 m的区域), 每个涡度相关仪周围采用三角形的形式设置了3个重复对照的样点。采集气样时, 将有机玻璃采气箱(30 cm×30 cm×100 cm)放置在5 cm深的水槽(与顶端下5 cm处盆钵外侧焊为一体)中。采样时间为每天上午9:00~11:30, 所有点位同时进行采样。通过插进密封采样垫的两通针, 用18 ml真空瓶采集箱内气体, 每隔10 min采一次样, 共4次。气体CO₂浓度由气相色谱仪(岛津GC-12A, 日本)测定。土壤呼吸计算公式为:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中, F 为土壤呼吸CO₂排放通量(mg m⁻² h⁻¹); ρ 为标准状态下CO₂密度; V 为密闭箱容纳的体积, A 为密闭箱底座的面积, $\Delta C/\Delta t$ 为单位时间密闭箱内CO₂浓度的变化量(mg L⁻¹ h⁻¹); T 为密闭箱内温度(K)。CO₂排放通量用每次观测3个重复的平均值表示, CO₂季节平均排放量则是将3个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。

1.4 其他观测

每次采用静态箱—气相色谱法采集气体样品时, 同时测定土壤水分与土壤温度。不同土壤深度(0~10 cm和10~20 cm)土壤水分由TDR土壤水分仪(TDR 300, Spectrum Technologies公司, Plainfield, 美国)测定, 0 cm、10 cm和20 cm土壤温度由便携式温度计测定。

1.5 数据分析

采用Microsoft Excel 2010和SigmaPlot12.5进行数据处理和相关性分析, SAS 8.1软件(SAS Institute公司, Cary, NC, 美国)进行 $p < 0.05$ 水平下的t检验分析。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用方式下土壤呼吸和净生态系统碳交换量季节变化

黑河中游不同土地利用方式下土壤呼吸和净生态系统碳交换量均呈现多峰曲线的季节变化模式, 但从数值上看, 二者在不同土地利用方式下存在较大差异(图2)。植被稀疏的戈壁、荒漠和沙漠的土壤呼吸和净生态系统碳交换量均较低, 其中土壤呼吸变化区间分别为-69~97、-1.99~122和-1.65~108 mg m⁻² h⁻¹, 净生态系统碳交换量变化区间分别为-52~154、-29~82和-6.3~212 mg m⁻² h⁻¹; 植被密集的玉米地、湿地和果园的土壤呼吸和净生态系统碳交换量较高, 土壤呼吸变化区间分别为15.1~316、47.7~710和36.9~218 mg m⁻² h⁻¹, 净生态系统碳交换量变化区间分别为14.1~2794、451~1622和864~1647 mg m⁻² h⁻¹。

不同土地利用方式的土壤呼吸与净生态系统碳交换量的变化趋势基本一致, 但数值上通常低于净生态系统碳交换量, 特别是植被覆盖度较高的玉米地、湿地与果园(图2)。作物生长季各土地利用方式下土壤呼吸和净生态系统碳交换量较高值出现在7月底和8月初, 之后缓慢下降; 戈壁、荒漠和沙漠在9月份有一个小幅度上升, 而玉米地、湿地和果园呈明显下降趋势; 玉米地、湿地与果园净生态系统碳交换量的峰值达到1 600 mg m⁻² h⁻¹以上, 而戈壁、荒漠和沙漠的峰值为200 mg m⁻² h⁻¹左右(图2)。

2.2 不同土地利用方式下土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献

黑河中游不同土地利用方式下作物生长季土壤呼吸平均值为24~269 mg m⁻² h⁻¹, 最高值是最低值的近11倍, 其中戈壁、荒漠和沙漠的土壤呼吸通量均低于50 mg m⁻² h⁻¹, 而玉米地、果园和湿地的土壤呼吸均高于100 mg m⁻² h⁻¹(图3)。黑河中游不同土地利用方式下的净生态系统碳交换量范围是47~1552 mg m⁻² h⁻¹, 最高值是最低值的33倍,

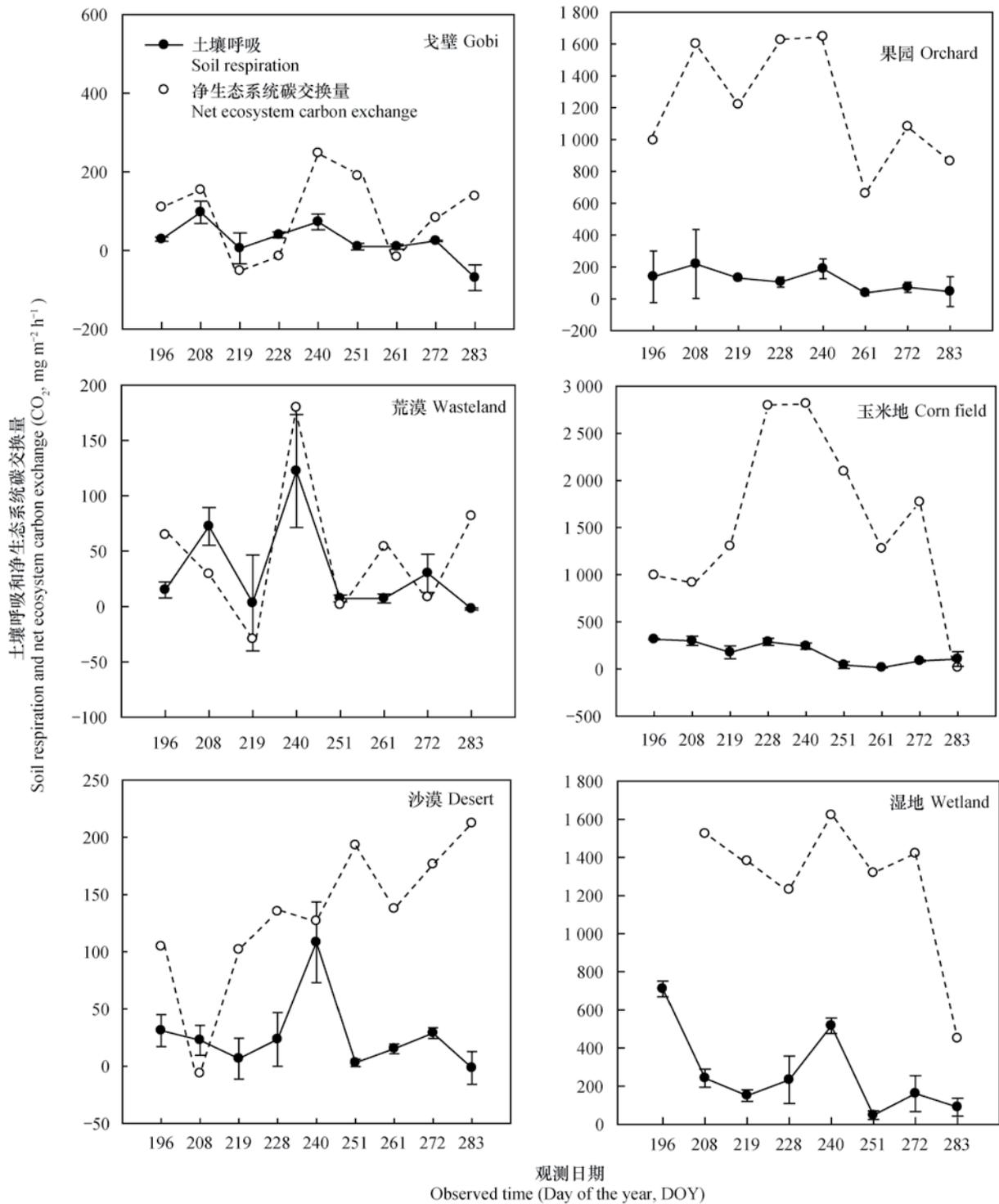


图2 黑河中游不同土地利用方式下土壤呼吸与净生态系统碳交换量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of soil respiration (Rs) and net ecosystem carbon exchange (NEE) in the middle reaches of the Heihe River relative to type of land use

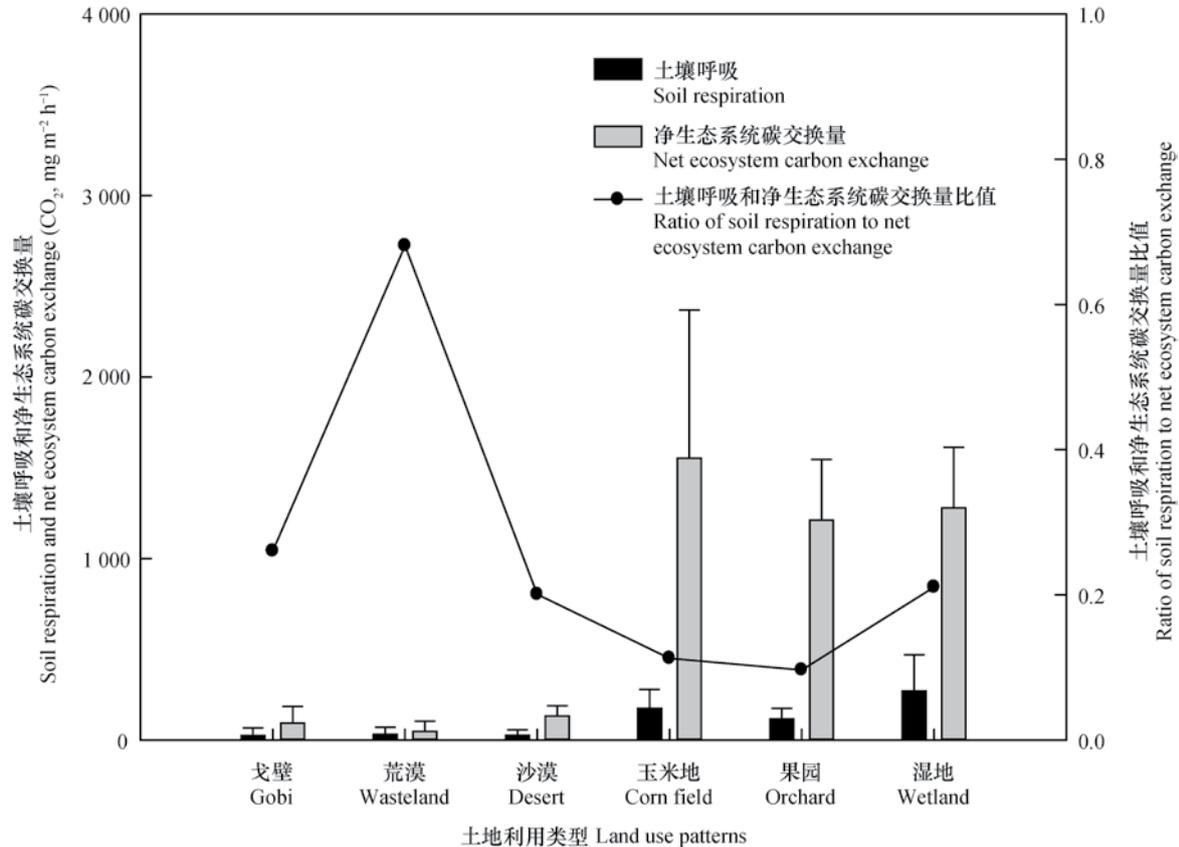


图3 黑河中游不同土地利用方式下土壤呼吸与净生态系统碳交换量的季节平均值及其比值

Fig. 3 Seasonal mean values of soil respiration (R_s) and net ecosystem carbon exchange (NEE) and their ratios in the middle reaches of the Heihe River relative to type of land use

戈壁、荒漠和沙漠的净生态系统碳交换量均低于 $200 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，而玉米地、果园和湿地的土壤呼吸净生态系统碳交换量均高于 $1200 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (图3)。统计结果表明，黑河中游不同土地利用方式下土壤呼吸的极差、平均值、标准差和变异系数分别为 $245 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $107 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $41 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、0.39；不同土地利用方式下净生态系统碳交换量的极差、平均值、标准差和变异系数分别为 $1505 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $719 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $285 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和0.40。

黑河中游不同土地利用方式下作物生长期土壤呼吸与净生态系统碳交换量的相关性达48% (图4)。净生态系统碳交换量是对陆地生态系统呼吸作用和绿色植被光合作用的综合描述，陆地生态系统呼吸包括土壤呼吸和植被呼吸，土壤呼吸变化趋势可能影响净生态系统碳交换量^[18]。植被稀疏的戈壁、荒漠和沙漠中土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献分别为26%、68%和20%；植被茂密的玉米地、果园和湿地中土壤呼吸对净生态系统碳交换

量的贡献分别为11%、10%和21% (图3)。由此看出，植被覆盖度是影响土壤呼吸与净生态系统碳交换量的重要因子。对于植被稀疏的荒漠、戈壁和沙漠，植被光合作用较弱，土壤呼吸是影响净生态系统碳交换量的主要因子；对于植被密集的玉米地、果园和湿地，植被光合作用较强，土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献较小。

2.3 土壤呼吸与净生态系统碳交换量的影响因素与测定不确定性

陆地生态系统土壤呼吸与净生态系统碳交换量主要受土壤温度和土壤水分等土壤属性的影响 (表2)。不同深度土壤温度与土壤呼吸和生态系统碳交换量均呈显著幂函数关系 (81%~96%和62%~98%， $p < 0.05$)，随着土壤深度增加相关性降低。不同深度土壤水分与土壤呼吸和生态系统碳交换量均呈显著指数函数关系 (82%~90%， $p < 0.05$)。土壤属性中土壤有机碳含量 (Soil organic carbon, SOC) 显著影响土壤

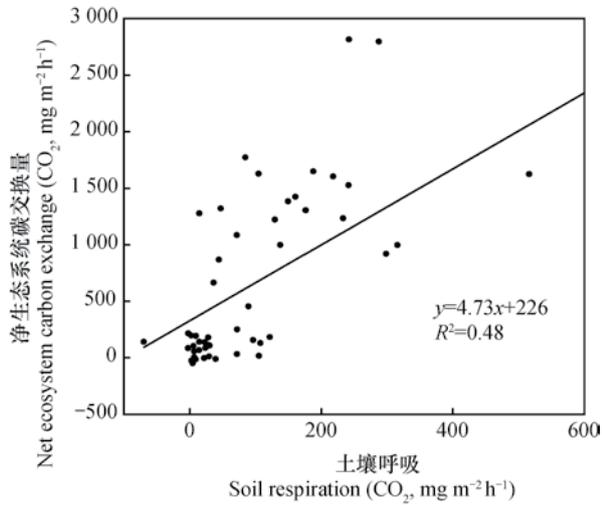


图4 黑河中游不同土地利用方式下土壤呼吸与净生态系统碳交换量的相关性

Fig. 4 Correlation between soil respiration (Rs) and net ecosystem carbon exchange (NEE) in the middle reaches of the Heihe River relative to type of land use

呼吸 ($R^2=0.91$, $p < 0.05$) 和净生态系统碳交换量 ($R^2=0.74$, $p < 0.05$), 土壤容重和C/N对土壤呼吸和生态系统碳交换量有一定的影响, 而土壤pH不是影响黑河中游不同土地利用条件下土壤呼吸和净生态系统碳交换量的主要因子(表2)。

土壤水分和土壤温度是土壤呼吸重要的限制因素, 二者共同影响土壤呼吸作用^[19]。土壤呼吸和净生态系统碳交换量随着土壤水分的升高而升高并且呈显著正相关(表2)。张赛等^[20]研究表明, 土壤水分的增加会提高生态系统的固碳能力、初级生产力及土壤呼吸作用。此外, 土壤CO₂释放和净生态系统碳交换量变化趋势与土壤温度变化趋势具有很强的一致性, 两者呈现负相关的幂函数关系(表2)。薛红喜等^[21]研究内蒙古自治区锡林浩特克氏针茅草地土壤温度对土壤呼吸变化的影响, 结果表明二者呈现正相关关系。造成这一差异的原因很可能是内蒙古自治区是对单一土地利用类型的

表2 不同土地利用方式下土壤呼吸和净生态系统碳交换量与土壤属性的相关性

Table 2 Correlation of soil respiration and net ecosystem carbon exchange with soil properties in the middle reaches of the Heihe River relative to type of land use

相关因子 Correction factor	土层深度Soil depths (cm)	土壤呼吸 Rs (CO ₂ , mg m ⁻² h ⁻¹)		净生态系统碳交换量 NEE (CO ₂ , mg m ⁻² h ⁻¹)	
		拟合方程 Fitted equation	R ²	拟合方程 Fitted equation	R ²
土壤温度 Soil temperature	0	$y = 4 \times 10^7 x^{-4.2}$	0.96	$y = 1 \times 10^{13} x^{-7.58}$	0.98
	10	$y = 9 \times 10^8 x^{-5.5}$	0.86	$y = 2 \times 10^{14} x^{-9.1}$	0.71
	20	$y = 4 \times 10^9 x^{-6.1}$	0.81	$y = 6 \times 10^{14} x^{-9.6}$	0.62
土壤水分 Soil moisture	0 ~ 10	$y = 18.2e^{0.068x}$	0.82	$y = 36.2e^{0.13x}$	0.89
	10 ~ 20	$y = 13.2e^{0.074x}$	0.90	$y = 24.6e^{0.13x}$	0.82
pH	0 ~ 10	$y = -104x + 966$	0.21	$y = -1056x + 96616$	0.16
容重 Bulk density	0 ~ 10	$y = -398x + 658$	0.56	$y = -4948x + 7901$	0.64
有机碳 Organic carbon	0 ~ 10	$y = 19e^{0.16x}$	0.91	$y = 50.8e^{0.26x}$	0.74
碳/氮C/N	0 ~ 10	$y = 159e^{-0.025x}$	0.61	$y = 46773x^{-1.4}$	0.36

分析, 而本研究区域是对不同土地利用类型土壤CO₂释放和净生态系统碳交换量与土壤水分和温度关系的分析, 影响土壤呼吸的环境因子更加复杂, 复杂的环境因子共同影响土壤碳通量。

基于静态箱—气相色谱法测量土壤呼吸和涡度相关法观测净生态系统碳交换量是普遍应用的观测方法^[22], 两种方法均具有较高的可信度, 但在实际应用过程中上两种方法均存在一定的缺陷, 造成观测结果的不确定性。首先, 基于静态箱—气相色谱法测量土壤CO₂通量的不确定性主要来源于对被测表面的自然环境状态产生了一定的干扰, 导致观测期间箱内微气象环境的变化, 如静态箱内的温度、光照强度、湿度、压力和箱内空气混合程度等^[22-23]。涡度相关法是基于微气象学基本原理的测定方法, 将气象学和生态学耦合在一起。在使用涡度相关仪测定净生态系统碳交换量时易受气象和地形条件的限制^[24], 在弱的湍流条件下, 会明显地低估净生态系统碳交换量^[25-26]。白天湍流条件较强, 受到影响较小。涡度相关法要求下垫面要均一、平坦, 但在下垫面的实际选择过程中往往不能保证地势绝对平坦的点位。同时, 涡度相关测定碳通量存在能量不闭合及碳通量低估现象^[27]。这些方法本身的缺陷, 可能导致本研究的结果存在一定误差。其次, 涡度相关法和静态箱—气相色谱法采样点位的匹配问题是影响本研究不确定性的另一因素。涡度相关观测通量贡献区在稳定大气状况下可达200 m甚至更大^[20], 而静态箱法3个重复采样点仅覆盖了3个0.30 m × 0.30 m × 1 m的地表面积, 这与涡度相关法的净生态系统碳通量信息来源有所差异, 因此静态箱法三个重复采样点可能不足以平均化生态系统呼吸的空间变异性。本研究中, 不同土地利用类型条件下涡度相关塔的高度是2.85~7 m, 理想状态下可覆盖半径285~1 050 m的区域, 静态箱放置的位置均位于该贡献区域内且代表涡度相关塔覆盖的下垫面类型, 一定程度上弥补两者在空间上的差异。

3 结论

黑河中游典型陆地生态系统(主要是玉米地、果园、湿地、荒漠、沙漠和戈壁)的土壤呼吸和净生态系统碳交换量呈现较为一致的季节变化规律,

最高值出现在7月底和8月初。黑河中游不同土地利用方式下植被生长期土壤呼吸是影响净生态系统碳交换量的重要因子, 土壤呼吸与净生态系统碳交换量的相关性达48%; 受植被覆盖度影响, 土壤呼吸对净生态系统碳交换量的贡献率为10%~68%, 植被覆盖度越低, 其贡献率越高。土壤温度和土壤水分是影响黑河中游典型陆地生态系统植被生长季土壤呼吸速率和净生态系统碳交换量的重要因子; 不同土地利用方式下, 随着土壤水分的增加二者呈增长趋势, 而随着土壤温度的升高二者呈降低趋势。该研究将为定量分析土壤呼吸与净生态系统碳交换量的季节变化和二者的相关性提供重要数据支撑。

致谢 本文涡度数据由HiWATER专题试验“非均匀下垫面地表蒸散发的多尺度观测试验: 通量观测矩阵”产生, 特别感谢国家自然科学基金“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划: 黑河流域生态-水文过程综合遥感观测试验(项目编号: 91125004)的全体参与人员及项目的资助。

参考文献

- [1] Canadell J G, Mooney H A, Baldocchi D D, et al. Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multitechnique approach for improved understanding. *Ecosystems*, 2000, 3 (2): 115—130
- [2] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2000, 464 (7288): 579—582
- [3] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素. *地理科学*, 2011, 31 (2): 181—196
Zhou H H, Li W H, Yang Y H, et al. Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in arid land (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31 (2): 181—196
- [4] Aich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44 (2): 81—99
- [5] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8 (3): 315—323
- [6] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化. *地理科学*, 2006, 26

- (1): 82—86
- Song C C, Wang Y Y, Wang Y S, et al. Character of the greenhouse gas emission in the freshwater mire under human activities (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26 (1): 82—86
- [7] Winkler J P, Cherry R S, Schlesinger W H. The Q_{10} relationship of microbial respiration in a temperate forest soil. *Biochemistry*, 1996, 28 (8): 1067—1072
- [8] Wang K, Liu C, Zheng X, et al. Comparison between eddy covariance and automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon dioxide in cotton and wheat fields. *Biogeosciences*, 2013, 10 (11): 6865—6877
- [9] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20 (7): 778—785
- Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (7): 778—785
- [10] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20 (1): 119—127
- [11] 李琪, 薛红喜, 王云龙, 等. 土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响初探. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (3): 605—610
- Li Q, Xue H X, Wang Y L, et al. The preliminary study on the impact of soil temperature and moisture on carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem (In Chinese). *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30 (3): 605—610
- [12] 范连连, 谢继萍, 马健, 等. 准噶尔盆地南缘草本层碳通量及土壤呼吸的变化特征. *生态学杂志*, 2013, 32 (10): 2567—2573
- Fan L L, Xie J P, Ma J, et al. Variation characteristics of herb layer carbon flux and soil respiration in southern edge of Junggar Basin, Northwest China (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32 (10): 2567—2573
- [13] 任志杰, 高兵, 黄涛, 等. 不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献. *环境科学学报*, 2014, 34 (9): 2367—2375
- Ren Z J, Gao B, Huang T, et al. The contribution of root respiration to soil respiration under different crop rotations and managements (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34 (9): 2367—2375
- [14] Li X, Cheng G D, Liu S M, et al. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94 (8): 1145—1160
- [15] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and largeaperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24—38
- [16] Xu Z W, Liu S M, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER—MUSOEXE. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118 (23): 13140—13157
- [17] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15 (4): 1291—1306
- [18] 耿绍波, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 基于涡度相关技术测算地表碳通量研究进展. *世界林业研究*, 2010, 23 (3): 24—28
- Geng S B, Lu S W, Rao L Y, et al. Research progress of measurement of land surface carbon budhet based on eddy covariance technology (In Chinese). *World Forestry Research*, 2010, 23 (3): 24—28
- [19] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1975, 7 (6): 373—378
- [20] 张赛, 王龙昌, 张晓雨, 等. 紫色土丘陵区保护性耕作下旱地土壤呼吸及影响因素. *土壤学报*, 2014, 51 (3): 520—530
- Zhang S, Wang L C, Zhang X Y, et al. Respiration of upland soil under conservation tillage in purple hilly regions and its influencing factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 520—530
- [21] 薛红喜, 李琪, 黄瑜, 等. 土壤环境因子对克氏针茅草地生态系统碳通量的影响. *地理科学*, 2014, 34 (11): 1385—1390
- Xue H X, Li Q, Huang Y, et al. The effect of soil environmental factors on the carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34 (11): 1385—1390
- [22] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较. *应用生态学报*, 2008, 19 (2): 290—298
- Zheng Z M, Yu G R, Sun X M, et al. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (2): 290—298

- [23] 林茂. 土壤温室气体通量测定方法的比较和评价. 湖南农业科学, 2012 (9): 44—46
Lin M. Comparison and evaluation of fluxes measurement methods for soil greenhouse gas (In Chinese). Hunan Agricultural Sciences, 2012 (9): 44—46
- [24] 李思恩, 康绍忠, 朱治林, 等. 应用涡度相关技术监测地表蒸发蒸腾量的研究进展. 中国农业科学, 2008, 41 (9): 2720—2726
Li S E, Kang S Z, Zhu Z L, et al. Research progress of measurement of land surface evapotranspiration based on eddy covariance technology (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41 (9): 2720—2726
- [25] Goulden M, William M J, Fan S M, et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2 (3): 169—182
- [26] Janssens I A, Kowalski A S, Ceulemans R. Forest floor CO₂ fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106 (1): 61—69
- [27] 张津林. 沙地杨树人工林生态系统生理生态特性及碳通量研究. 北京: 北京林业大学, 2006
Zhang J L. Leaf-level ecophysiology and ecosystem carbon flux of a poplar plantation on a sandy soil (In Chinese). Beijing: Beijing Forestry University, 2006

Seasonal Variation of Soil Respiration and Net Ecosystem Carbon Exchange During Vegetation Growing Season in the Middle Reaches of the Heihe River

SUN Minmin¹ WANG Xufeng² MA Mingguo³ YUAN Wenping⁴ LI Xianglan^{1†}

(1 College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, China Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(3 School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(4 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract 【Objective】The middle reaches of the Heihe River is located in the inland arid region of Northwest China and under the continental central temperate arid climate, this area is low in precipitation, high in evaporation and strong in solar radiation. Such climatic environment conditions nurse a unique type of mosaic distribution of farmlands, orchards, wetlands, wastelands, deserts and gobis. This region of the middle reaches of the Heihe River is a sensitive and ecologically fragile area in the course of environmental evolution. So the study on issues related to net ecosystem carbon exchange (NEE) and soil respiration (Rs) relative to land use is of some extremely important theoretical and practical significance in maintaining ecological balance and promoting sustainable development of the region. However, little information is available in the literature on seasonal and spatial distribution of Rs and NEE in different terrestrial ecosystems in this region; and on contribution of Rs to NEE. 【Method】In this study, six different patterns of land use (corn field, orchard, wetland, desert, gobi and wasteland) in this region were cited for observation of Rs and NEE during the crop growing season, using the eddy covariance method and the static chamber/gas chromatograph method, and seasonal dynamics of Rs and NEE and their affecting factors were analyzed, so as to figure out contribution of Rs to NEE relative to pattern of land use. 【Result】It was found that both Rs and NEE during the plant growth season displayed a multi-peaked curve regardless of land use patterns, with highest peaks appearing at the end of July and the beginning of August. In terms of numerical value, both Rs and NEE varied sharply between different land use patterns. Relatively low Rs and NEE was found in Gobi, wasteland and desert, varying in the ranges of $-69 \sim 97$, $-1.99 \sim 122$ and $-1.65 \sim 108 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively, and in the range of $-52 \sim 154$, $-29 \sim 82$ and $-6.3 \sim 212 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively. Comparatively, Rs and NEE was relatively high in corn field, wetland and orchard, varying in the range of

15.1 ~ 316, 47.7 ~ 710 and 36.9 ~ 218 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectively, and in the range of 14.1 ~ 2 794, 451 ~ 1 622 and 864 ~ 1 647 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectively, which shows that the denser the vegetation, the higher the R_s and NEE. Contribution of R_s to NEE also varied with the pattern of land use. It varied in the range of 20% ~ 68% in the former three ecosystems and in the range of 10% ~ 21% in the latter, which indicates that the denser the vegetation, the lower the contribution of R_s to NEE. It was found that R_s and NEE in the terrestrial ecosystems were mainly affected by soil properties, like soil temperature and soil moisture. Soil temperatures in different soil depths were in significant functional relationships with R_s (81% ~ 96%, $p < 0.05$) and NEE (62% ~ 98%, $p < 0.05$), and soil moisture contents in different soil depths in significant exponential function relationships with R_s and NEE (82% ~ 90%, $p < 0.05$). Among soil properties, soil organic carbon content (SOC) was the main factor significantly affecting R_s ($R^2 = 0.91$, $p < 0.05$) and NEE ($R^2 = 0.74$, $p < 0.05$), and followed by soil bulk density and C / N, which had certain impacts, while soil pH was not a factor that would affect R_s and NEE much in all the ecosystems in the middle reaches of the Heihe River. Significant correlation between R_s and NEE was found in this study ($R^2=0.48$, $p < 0.05$). **【Conclusion】** Any minor fluctuation of R_s may potential cause profound changes in NEE in all the terrestrial ecosystems.

Key words Soil respiration; Net ecosystem carbon exchange; Land use patterns; Vegetation coverage; Eddy covariance; Static chamber method

(责任编辑：陈荣府)