

王金龙, 李艳红, 李发东. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤呼吸动态变化规律及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1):167-175.

WANG Jin-long, LI Yan-hong, LI Fa-dong. Dynamics of soil respiration and its influential factors on artificial and natural reed wetlands in Boston Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(1):167-175.

博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤呼吸 动态变化规律及其影响因素

王金龙^{1,2}, 李艳红^{1,2*}, 李发东^{1,2,3,4}

(1.新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 3.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为研究干旱区淡水湖泊湿地土壤呼吸作用的动态变化及其影响因素,以博斯腾湖人工和天然芦苇(*Phragmites australis*)湿地为样地,于2014年11月—2015年9月,利用LI-840A土壤碳通量自动测定仪对土壤呼吸的日变化和季节动态进行了监测。结果表明:人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率的日变化表现为明显的单峰曲线,且呈现出一定的波动性;两种芦苇湿地土壤呼吸速率均具有明显的季节变化特征,生长旺盛期(7—8月)的土壤呼吸作用最强,越冬期(11月)土壤呼吸作用最弱;博斯腾湖芦苇湿地土壤呼吸速率为正值,且人工芦苇湿地土壤呼吸速率高于天然芦苇湿地;5 cm 深土壤温度、近地表温度和空气相对湿度是土壤呼吸速率的主要影响因素;人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率均与土壤 pH 和盐分呈负相关,而与土壤有机碳呈正相关。

关键词:淡水湖泊湿地;土壤呼吸;动态变化;博斯腾湖

中图分类号:X51 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)01-0167-09 doi:10.11654/jaes.2016-0744

Dynamics of soil respiration and its influential factors on artificial and natural reed wetlands in Boston Lake

WANG Jin-long^{1,2}, LI Yan-hong^{1,2*}, LI Fa-dong^{1,2,3,4}

(1.Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi 830054, China; 2.Collegel of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil respiration from the surrounding wetland of a lake plays an important role in assessing soil carbon cycle and soil microbial metabolism in inland water ecosystem. In order to understand the dynamics of soil respiration in wetlands of artificial and natural reed (*Phragmites australis*), field observations were conducted from November 2014 to September 2015 by using LI-840A automated soil CO₂ flux system in Bosten Lake located in arid areas of Western China. During monitoring periods, environmental variables (such as soil moisture, soil temperature, air moisture, air temperature) were also observed to determine the effects of abiotic factors on soil respiration in these two wetland ecosystems. Results showed that soil respiration existed obvious diurnal and seasonal patterns. The diurnal curve of the soil respiration was unimodal, with the peak appeared at 15:00. The seasonal change of soil respiration showed that the maximum values were occurred in July and August and the minimum values were in November, respectively. However, soil respiration rate for the artificial reed was

收稿日期:2016-05-31

作者简介:王金龙(1992—),男,回,新疆乌苏人,硕士研究生,研究方向为干旱区资源开发与规划。E-mail:1425627484@qq.com

*通信作者:李艳红 E-mail:lyh0704@126.com

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室专项基金项目(XJDX0909-2014-05);新疆师范大学地理学博士点支撑学科项目(XJNU-DL-201613);天山学者计划项目

Project supported: The Special Fund of Regional Key Laboratory of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China(XJDX0909-2014-05); The Doctoral Program of Geography for Xinjiang Normal University, China (XJNU-DL-201613); Tianshan Scholars High-level Talents Scheme

greater than that for the natural reed ($P < 0.05$). The soil respiration rate was mainly affected by the factors of ground ambient air temperature, ground air humidity and soil temperature at 5 cm depth. Soil organic carbon was positively correlated with soil respiration rate in both the artificial and natural reed, however, negatively with soil pH and soil salt.

Keywords: freshwater lake wetland; soil respiration; dynamic change; Boston Lake

芦苇湿地是世界上分布较广、占地面积较大的主要湿地类型,在温室气体 CO_2 的汇集和排放中起到重要作用^[1]。芦苇湿地对于减少大气中温室气体浓度、减缓全球变暖具有积极意义,是重要的碳汇^[2]。国内外关于芦苇湿地碳排放的研究较多。Brix 等^[3]研究显示芦苇生态系统能够抑制大气 CO_2 的升高,芦苇湿地同化的碳仅有 15% 再释放到大气中。Kim 等^[4]估测芦苇生态系统每年碳的释放量达 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。于洪贤等^[5]认为在芦苇生长季节,中午前后碳通量的日动态变化为最高,夜间变化线形平直较低,碳通量日动态变化呈单峰单谷型变化。目前,国内芦苇湿地碳排放研究对象主要集中在三江平原湿地、闽江河口湿地、辽宁盘锦芦苇湿地及黄河三角洲河口湿地等天然芦苇湿地^[6-7]。由于芦苇具有重要的经济、生态价值而被各国广泛种植,已成为重要的人工湿地。博斯腾湖作为我国内陆最大的淡水湖,因湖水受到污染,造成湖滨湿地面积锐减,芦苇资源量下降^[8]。为加强对博斯腾湖及其周边的生态保护和治理,当地使用排水沟末端的扬排泵站抽取农田排水灌溉人工芦苇,利用生物净水促进博斯腾湖湖水水质淡化^[9]。由于人工芦苇湿地净化污水中的高浓度氮、磷的影响,其土壤呼吸规律与天然芦苇湿地必然有所不同。有研究表明,在人工芦苇湿地污水处理系统中,碳释放量高于碳输入量,其中碳释放量的 1/4~1/3 来源于植物本身^[10]。因此,人工芦苇湿地所释放的碳已经不容忽视。本文以干旱区最大淡水湖泊博斯腾湖芦苇湿地为研究区,分别选取人工、天然芦苇湿地为监测对象,通过分析土壤呼吸与 5 cm 深土壤温度和含水量及相应的空气湿湿度的日变化与季节变化,揭示干旱区淡水湖泊湿地人工、天然芦苇湿地土壤呼吸变化规律,探究干旱区淡水湖泊湿地土壤呼吸的影响因素,从而为干旱区湖泊芦苇湿地碳循环提供基础数据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

博斯腾湖位于新疆巴音郭楞蒙古自治州($41^{\circ}56' \sim 42^{\circ}14' \text{N}$, $86^{\circ}40' \sim 87^{\circ}26' \text{E}$),水域面积 1646 km^2 ,是我

国西部干旱区极为罕见的大型淡水湖泊湿地生态系统。环湖芦苇湿地面积达 400 km^2 ,是全国重要的芦苇湿地。湖水水位由 1958 年的 $1\,048.00 \text{ m}$ 下降到 2012 年的 $1\,045.68 \text{ m}$,水面面积缩小近 100 km^2 ^[11]。湖水矿化度由 20 世纪 50 年代不足 $0.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $1.3 \sim 1.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,正由淡水湖逐渐转化为微咸水湖^[12]。湖滨湿地生境退化,生物多样性受损。研究区设置在大湖西岸距东大干排入湖口约 840 m 处的扬水泵站附近的人工、天然芦苇湿地。天然芦苇湿地主要生长依靠湖水或地下水维持生命的天然芦苇,长势较差;人工芦苇湿地主要利用农田低污染水进行引灌,芦苇长势较好,污水缓慢地在湿地的土壤表层流过,在流动过程中通过物理、化学、物理-化学及生物作用与土壤、植物反应而得到净化。样地描述详见表 1。

表 1 样地位置描述
Table 1 Description of measurement sites

参数	人工芦苇湿地	天然芦苇湿地
土壤	pH	8.01 ± 0.65
	盐分/%	0.28 ± 0.03
	有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	16.7 ± 2.81
	土壤质地	粉砂、黏土
水质	总氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.43 ± 0.02
	总磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.02 ± 0.01
	电导率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	28.23 ± 3.61
植物	生物量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	$1\,148.75 \pm 29.37$
	平均高度/m	3.52 ± 0.28

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准误。

Note: Data in the table show the average $\pm$ S. E.

1.2 研究方法 with 数据采集

本研究设置 2 个监测点(图 1),在人工、天然芦苇湿地各设 3 块 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的样地,在各样地随机选取 1 个观测点,提前 1 d 将直径 22 cm 、高 19.5 cm 的圆柱形 PVC 土壤环嵌入土壤中使其露出地表 5 cm ,并清除环中植被及凋落物,以避免土壤扰动及地上植被呼吸对测量的影响^[13]。季节变化测定为 2015 年 5—6 月(萌芽期)、7—8 月(生长旺盛期)、9—10 月(枯黄期)、2014 年 11 月(越冬期)。利用 LI-840A 土壤碳通

量测定系统,每月选取晴朗无雨的一天对土壤呼吸速率进行全天 24 h 测定,观测时间为 9:00 到次日 8:00,日观测频度为每 2 h 一次,每次测定时间为 3 min,每个观测点重复测量 3 次^[14],取土壤呼吸速率日变化的平均值作为该月土壤呼吸速率变化值。在测定土壤呼吸速率的同时,使用空气温湿度传感器测定近地表的空气温湿度,土壤温度传感器和烘干法测定 5 cm 深土壤温度和含水量;在每个样地内再随机设置 1 个 1 m×1 m 的样方,齐地表割取样方内芦苇,带回实验室采用烘干法(105 ℃ 2 h 后,85 ℃ 至恒重)测定生物量。样地内土壤按不同层次(0~5、5~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)进行采集,并于实验室内自然风干,磨碎,过筛保存。用(水土比 5:1 的土壤浸出液)烘干残渣法测定其全盐量;使用 HANNA 公司 pH 电极(pH 211 Microprocessor pH Meter)进行 pH 值测定;使用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳^[15]。

利用 Pearson 相关分析探讨土壤呼吸速率与水热因子和土壤理化性之间可能具有的相关关系,所有数据的统计分析在 SPSS 19.0 软件中完成,采用 SigmaPlot 10.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率日动态变化特征

如图 2 所示,人工、天然芦苇湿地萌芽期、生长旺盛期、枯黄期和越冬期土壤呼吸速率均呈现不对称的单峰型变化形式,不同时期土壤呼吸速率日动态具有一定的波动性。人工芦苇湿地土壤呼吸速率在 15:00 达到最大值 $5.44 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,呈现缓慢下降趋

势,在次日 03:00 出现最小值($-0.58 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),观测期内土壤呼吸速率均值为 $2.01 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,除萌芽期、越冬期的夜间土壤呼吸速率出现负值外,其余观测期间均为正值;天然芦苇湿地土壤呼吸速率在 15:00 达到最大值 $5.97 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后骤然下降,直至次日 03:00 达最小值($-0.42 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),均值为 $1.43 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,除越冬期的夜间土壤呼吸速率出现负值外,其余观测期间均为正值。不同观测期土壤呼吸速率存在差异,其中枯黄期人工、天然芦苇湿地的差值最大,为 $1.12 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 土壤呼吸速率季节变化特征

人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率的季节变化均呈较明显的单峰曲线(图 3)。整个观测期中,人工芦苇湿地土壤呼吸速率均值为 $2.19 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,变化范围为 $0.72\sim 3.59 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;天然芦苇湿地土壤呼吸速率的均值为 $1.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,波动范围 $0.55\sim 3.05 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从芦苇萌芽期开始,随着温度的升高,土壤呼吸速率增加,土壤温度和近地表温度在 7—8 月达到最高值,土壤呼吸速率在生长旺盛期相应出现峰值;进入枯黄期后,随着土壤温度和近地表温度的降低,两种芦苇湿地的土壤呼吸作用均逐渐下降,由于受到低温的限制,在越冬期达到土壤呼吸速率的最低值。

2.3 土壤呼吸速率与环境因子的关系

由图 4 可知,人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率与各观测期的土壤温度之间均达到极显著相关($P<0.01$),土壤温度分别解释了萌芽期人工、天然芦苇湿地土壤呼吸变异的 89.8% 和 65.9%,生长旺盛期分别

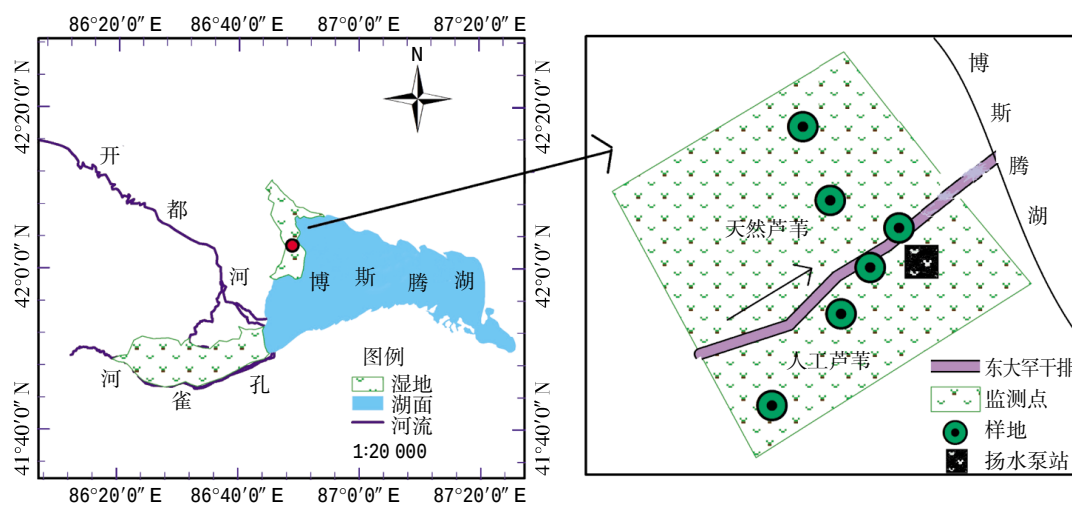


图 1 研究区位置及采样点分布图

Figure 1 Position in the study area and the sampling point distribution

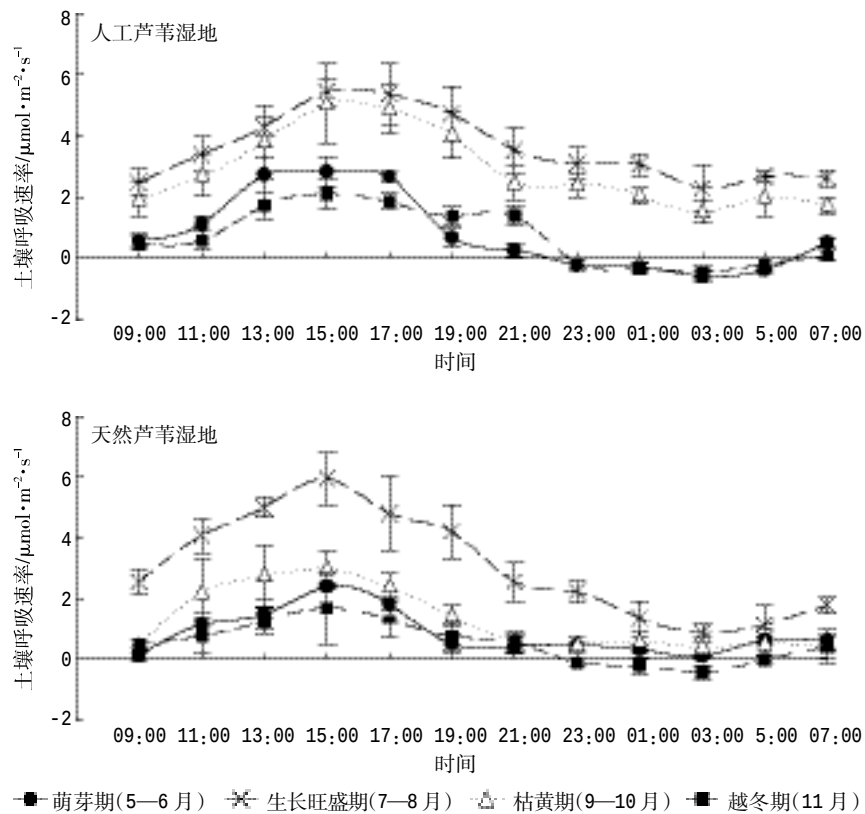


图2 人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率日动态变化

Figure 2 Diurnal variation of soil respiration of artificial and natural reed (*Phragmites australis*)

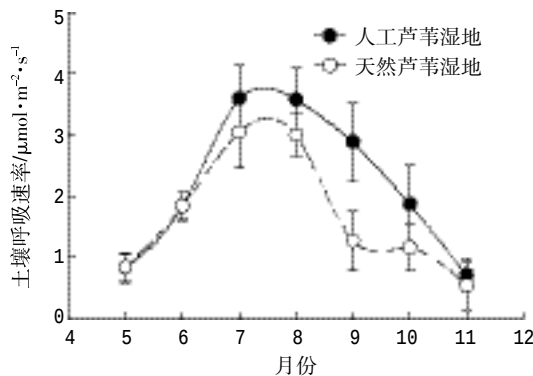


图3 人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率的季节变化

Figure 3 Artificial and natural reed (*Phragmites australis*) of seasonal change of soil respiration rate

为 90.5% 和 92.8%，枯黄期分别为 83.1% 和 60.2%，越冬期分别为 86.4% 和 76.4%。土壤呼吸对温度变化的敏感性通常用 Q_{10} 值来描述，该值越高表明土壤呼吸速率对温度的依赖性越大，由二者共同拟合的方程计算可得土壤呼吸 Q_{10} 值变化范围分别为 1.86~2.65、1.69~2.77，变异系数分别为 19.3%、23.5%。

通过对人工、天然芦苇湿地日土壤呼吸速率与土壤含水量、近地表温度和空气相对湿度进行相关分析

(表 2)，表明土壤呼吸速率与土壤含水量相关关系不显著 ($P>0.05$)，与近地表温度均呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与空气相对湿度呈极显著负相关 ($P<0.01$)。综上所述，影响两种芦苇湿地土壤呼吸速率日动态的主要因子为土壤温度、近地表温度和空气相对湿度。在日变化上，环境因子的变化对土壤呼吸速率的影响也因季节变化表现出差异。

本文对人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量、近地表温度和空气相对湿度进行逐步回归分析，分别得出不同观测期的土壤呼吸速率与环境因子的回归模型。由表 3 可知，人工芦苇湿地土壤呼吸速率在萌芽期、生长旺盛期、枯黄期和越冬期分别是由近地表温度、土壤温度、空气相对湿度和土壤温度因子影响的，分别能解释土壤呼吸速率变异的 95%、89.5%、94% 和 84.9%；天然芦苇湿地土壤呼吸速率在萌芽期、生长旺盛期是由近地表温度、空气相对湿度影响的，在枯黄期是由近地表温度、土壤温度和空气相对湿度共同作用的，在越冬期是由近地表温度和土壤温度共同影响的，分别能解释土壤呼吸速率变异的 75.8%、93.3%、97.7% 和 88.7%。因此，影响两种芦苇湿地土壤呼吸速率季节变化的环境因子为

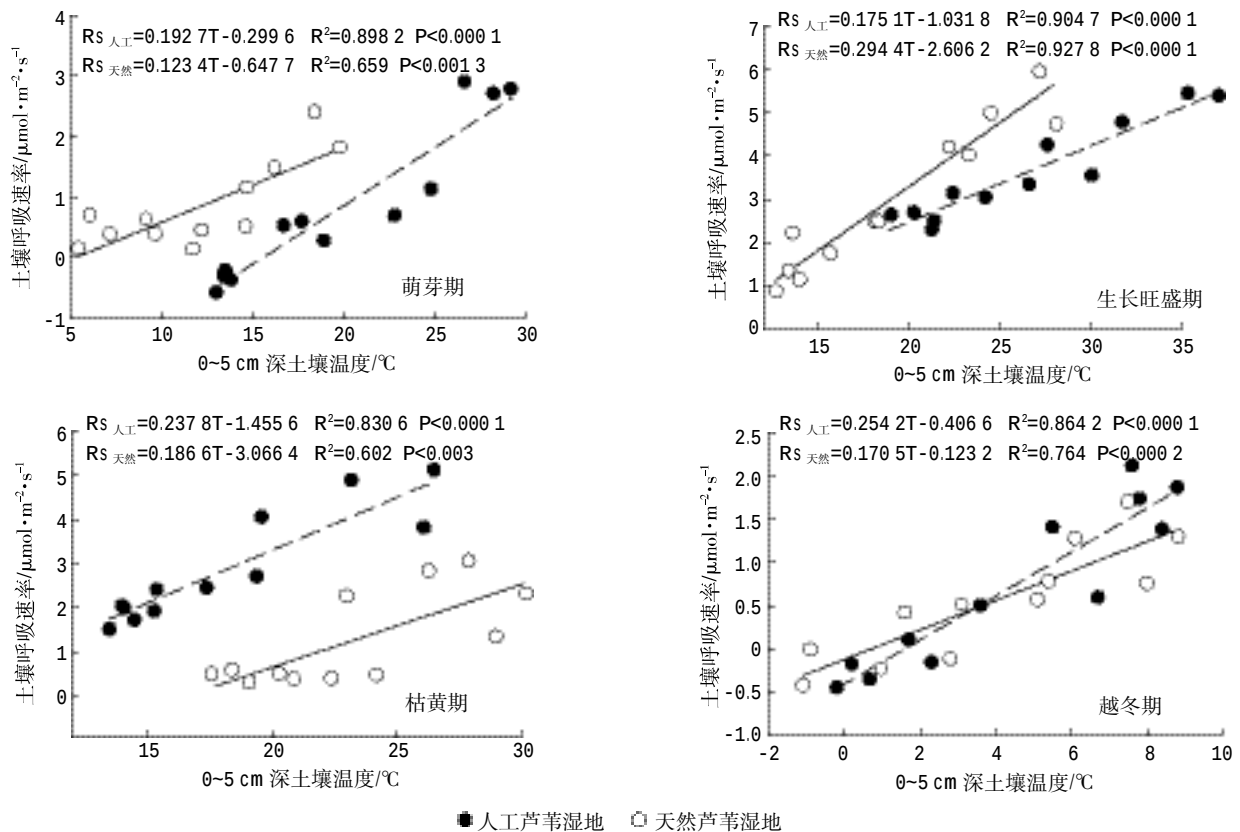


图4 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Figure 4 Relationship of soil respiration rate and soil temperature

表2 环境因子与土壤呼吸速率的相关性

Table 2 Relationship between soil respiration rate and environmental factors

观测期	样地	土壤含水量	近地表温度	空气相对湿度
萌芽期	人工芦苇湿地	0.568	0.977**	-0.924**
	天然芦苇湿地	0.511	0.883**	-0.771**
生长旺盛期	人工芦苇湿地	-0.035	0.893**	-0.868**
	天然芦苇湿地	-0.679	0.931**	-0.969**
枯黄期	人工芦苇湿地	-0.117	0.960**	-0.972**
	天然芦苇湿地	0.201	0.950**	-0.959**
越冬期	人工芦苇湿地	0.426	0.858**	0.812**
	天然芦苇湿地	0.080	0.828**	0.808**

注:**在 $P < 0.01$ 水平上显著相关(双侧);*在 $P < 0.05$ 水平上显著相关(双侧)。

Notes:**Correlation is significant at the 0.01 level(two-tailed).*Correlation is significant at the 0.05 level(two-tailed).

温度和空气相对湿度,但土壤呼吸速率对环境因子变化的响应因季节变化而存在差异。

2.4 土壤呼吸速率与土壤理化性质的关系

对两种芦苇湿地土壤呼吸速率与土壤盐分、pH、有机碳进行相关分析,结果表明:人工、天然芦苇湿地

土壤 pH、盐分及有机碳与土壤呼吸速率间的相关系数较大,但对芦苇湿地 CO_2 的释放影响均不显著(表4)。人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率与土壤 pH 和盐分呈负相关,与土壤有机碳呈正相关。但人工芦苇湿地土壤盐分与有机碳对土壤呼吸速率的影响大于天然芦苇湿地,土壤 pH 对人工芦苇湿地土壤呼吸速率的影响小于天然芦苇湿地。

3 讨论

3.1 土壤呼吸速率动态变化特征

本研究表明,博斯腾湖人工、天然芦苇湿地萌芽期、生长旺盛期、枯黄期和越冬期土壤呼吸速率日变化表现为单峰型曲线形式,与盘锦芦苇湿地^[16]呈“双峰”曲线研究结果不一致,可能是由于不同观测时期的土壤温度与含水量存在差异,导致土壤呼吸日动态发生改变。两种芦苇湿地土壤呼吸速率日变化在不同时期差异不明显,但具有一定的波动性,表明下垫面植被的光合与呼吸作用对地表 CO_2 浓度影响较大。土壤呼吸速率峰值出现在 15:00 左右,最低值出现在 3:00 左右,可能与芦苇总初级生产力有关^[17],即植物

表3 土壤呼吸速率与环境因子逐步回归分析

Table 3 Stepwise regression analysis between soil respiration rate and environmental factors

样地	观测期	回归模型	R ²	F	P
人工芦苇湿地	萌芽期	$Y=0.107T_{\text{air}}-1.799$	0.95	209.491	<0.001
	生长旺盛期	$Y=0.107T_s-1.033$	0.90	95.203	<0.001
	枯黄期	$Y=-0.052RH_{\text{air}}+6.253$	0.94	171.931	<0.001
	越冬期	$Y=0.254T_s-0.407$	0.85	62.789	<0.001
天然芦苇湿地	萌芽期	$Y=0.06T_{\text{air}}-0.568$	0.76	35.463	<0.001
	生长旺盛期	$Y=-0.065RH_{\text{air}}+7.744$	0.93	155.138	<0.001
	枯黄期	$Y=0.068T_{\text{air}}-0.085T_s-0.039RH_{\text{air}}+4.146$	0.98	156.324	<0.001
	越冬期	$Y=-0.094T_{\text{air}}+0.107T_s+0.077$	0.89	44.108	<0.001

注: T_{air} 近地表温度; T_s 土壤温度; RH_{air} 空气相对湿度。

Notes: T_{air} represents air temperature, T_s represents soil temperature at 5 cm, RH_{air} represents air relative humidity.

表4 土壤呼吸速率与土壤理化性质的相关性

Table 4 Relationship between soil respiration rate and soil physical and chemical properties

样地	pH	盐分	有机碳
人工芦苇湿地	-0.815	-0.891	0.877
天然芦苇湿地	-0.871	-0.648	0.746

光合作用强烈时,地下的呼吸作用也旺盛。萌芽期、越冬期夜间出现负值,则可能是由于夜间温度低,导致土壤微生物和根系呼吸基本停止,土壤空气中没有 CO_2 累积,致使土壤空气与大气基本处于平衡,大气中的 CO_2 被土壤所固定^[18]。博斯腾湖人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率季节变化表现为生长旺盛期>枯黄期>萌芽期>越冬期,呈现单峰型曲线。萌芽期两种芦苇湿地土壤呼吸速率随着温度的升高而加快,但二者增长幅度并不一致,可能是由于人工芦苇湿地土壤中有机碳含量较高,植物生长发育更好,土壤呼吸速率增长的幅度更大;到生长旺盛期,植物的光合作用强烈,光合产物向地下根系和土壤输入有机碳,进而影响根系微生物底物的有效性和根系的伸长生长^[19],释放出更多的 CO_2 ^[20],但人工芦苇湿地生物量较大(表1),光合产物相对天然芦苇湿地较多,导致其土壤呼吸速率峰值更高;进入枯黄期,植物枯死量增加,根系呼吸活动减弱,土壤微生物活性降低,然而由于天然芦苇湿地植被较稀疏,造成其周围温度变化幅度大,随着温度的降低,其土壤呼吸速率下降更加明显;越冬期以后,土壤微生物活性和根系活动基本停止,两种芦苇湿地土壤呼吸速率均达到最低。

与其他相关研究相比,本文两种芦苇湿地土壤呼吸速率均值与其他湿地存在较大差异,人工芦苇湿地

土壤呼吸速率($2.19 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)低于大兴安岭寒温带岛状林沼泽湿地($2.33 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[21]和若尔盖高原沼泽化草甸($2.69 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[22],略高于三江平原恢复湿地($2.18 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[23]。天然芦苇湿地土壤呼吸速率($1.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)低于鄱阳湖苔草湿地($1.81 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[24],高于青藏高原高寒湿地($1.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[25]和干旱区艾比湖湿地($1.11 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[26],与黄河三角洲芦苇湿地($1.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[27]相当。这是由各研究区域不同气候和植被状况引起的,也与测定周期和测量仪器的精度差异有关。

3.2 环境因子对土壤呼吸速率的影响

太阳辐射的昼夜变化引起气温的昼夜变化,相应引起土壤温度、根系和土壤生物(尤其微生物)活动强度的变化,进而引起土壤呼吸速率的昼夜变化^[28]。本研究表明,近地表温度、土壤温度和空气相对湿度是控制人工、天然芦苇湿地土壤呼吸季节变化的关键因子。在一定范围内温度的升高能够刺激土壤 CO_2 的排放速率^[29]。作为微生物分解基质的有机质和微生物活动也主要集中在地表,近地表温度变化会直接影响到微生物的活性,因而对土壤呼吸作用产生影响。不同观测期土壤呼吸与温度的相关性存在差异,是由于温度对植物根际呼吸和土壤微生物呼吸的影响程度不同^[30]。人工、天然芦苇湿地 Q_{10} 值(均值)分别为 2.26、2.23,表明人工芦苇较天然芦苇盖度增加后,土壤呼吸速率及其季节变化幅度增加,对温度的敏感性也相应增加。土壤含水量对土壤呼吸的影响在干旱、半干旱生态系统尤其显著^[31]。有研究表明,只有在水分胁迫的条件下,土壤呼吸与土壤水分的相关关系才会显著^[32],并且较低的土壤湿度会随温度的增加而抑制土壤呼吸速率^[33]。博斯腾湖芦苇湿地相对于其他生态系

统来说,不会由于土壤含水量过高或过低而影响土壤呼吸作用。本研究分析土壤呼吸速率和土壤含水量之间无显著关系,可能是由于土壤含水量并未限制土壤中植物根系和微生物的生长,也可能是由于芦苇湿地干湿交替,好氧与厌氧条件叠加分析掩盖了相互关系,导致土壤含水量不是影响土壤呼吸速率的主要因素。由于近地表空气中的水分会随着近地表气温的变化而变化,即气温越高空气相对湿度就越低,但空气相对湿度与土壤呼吸速率具有较高的相关性,因此对土壤呼吸速率有一定的影响。

3.3 水质及土壤理化性质对土壤呼吸速率的影响

人工湿地土壤的滤过作用使水中的污染物得到沉淀、截留,进而影响其土壤理化性质。低浓度农田污水排入人工湿地后,人工芦苇吸收污水中的营养元素进行生长,长势必然优于天然芦苇;同时,人工湿地土壤的微生物将芦苇植物体作为重要的可利用碳源,将碳进一步转化为气体形式,从而引起湿地的碳排放量增加。在水热条件相对稳定的情况下,土壤有机质是土壤异氧呼吸的物质基础,是决定土壤呼吸的重要因子^[34],而土壤 pH 主要是通过影响有机质的合成和分解以及根系的生长发育等影响土壤 CO₂ 排放^[35]。人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率与土壤有机碳呈正相关关系,与前人研究结果一致^[36]。由于人工芦苇生物量大,凋落物质量较高,容易分解淋溶转化成可溶性有机碳,为微生物的异养呼吸提供大量有效的碳源^[37],充足的碳源有利于土壤微生物活性及微生物量的增加,从而增加了微生物呼吸对土壤呼吸的贡献^[38]。与土壤盐分和 pH 呈负相关关系,是由于土壤盐分和 pH 的升高会影响土壤中微生物活性,使得土壤中的微生物数量显著下降^[39],导致土壤呼吸速率减弱。

4 结论

(1)博斯腾湖人工、天然芦苇湿地萌芽期、生长旺盛期、枯黄期和越冬期土壤呼吸速率日变化呈现为不对称单峰曲线形式,与温度变化趋于一致,峰值均出现在 15:00 左右,谷值均出现在 3:00 左右;人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率具有明显的季节变化,峰值出现在生长旺盛期,在越冬期达到最低值。

(2)博斯腾湖人工芦苇湿地土壤呼吸速率高于天然芦苇湿地。

(3)影响人工、天然芦苇湿地土壤呼吸作用的主导因子是温度和空气相对湿度;整个观测期内的土壤呼吸 Q₁₀ 值变化范围分别为 1.86~2.65、1.69~2.77,变

异系数分别为 19.3%、23.5%;

(4)人工、天然芦苇湿地土壤呼吸速率均与土壤 pH 和盐分呈负相关,与土壤有机碳呈正相关。

参考文献:

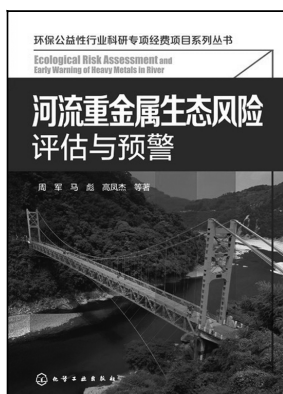
- [1] Sim C H, Yusoff M K, Shutes B, et al. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya City, Malaysia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(2): 307-317.
- [2] 张兵,王洋. 芦苇湿地的碳汇功能研究[J]. *现代农业科技*, 2011(16): 287-288.
ZHANG Bing, WANG Yang. Research on the carbon sink function of Phragmites wetland[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(16): 287-288.
- [3] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69(2/3/4): 313-324.
- [4] Kim J, Verma S B, Billesbach D P. Seasonal variation in methane emission from a temperate Phragmites-dominated marsh: Effect of growth stage and plant-mediated transport[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(4): 433-440.
- [5] 于洪贤,李友华. 生物碳汇类型的特性研究[J]. *经济研究导刊*, 2010(5): 244-245.
YU Hong-xian, LI You-hua. Research on the character of the biological carbon sink type[J]. *Economic Research Guide*, 2010(5): 244-245.
- [6] 李玉,康晓明,郝彦宾,等. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4400-4411.
LI Yu, KANG Xiao-ming, HAO Yan-bin, et al. Carbon, water and heat fluxes of a reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4400-4411.
- [7] Picek T, Cizkova H, Dusek J. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-plants as important sources of carbon[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(2): 98-106.
- [8] 兰文辉,阿比提,安海燕. 新疆博斯腾湖流域水环境保护与治理[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 148-153.
LAN Wen-hui, Abiti, AN Hai-yan. Conservation and control of aquatic environment of Bosten Lake Watershed, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Science*, 2003, 15(2): 148-153.
- [9] 刘会源,宋锦霞. 论博斯腾湖水域及湿地保护[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 150-151.
LIU Hui-yuan, SONG Jin-xia. Discussion on protection of Bositeng Lake water area and wetland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(1): 150-151.
- [10] 全川,鄂焱,廖稷,等. 闽江河口潮汐沼泽湿地 CO₂ 排放通量特征[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2830-2840.
TONG Chuan, E Yan, LIAO Ji, et al. Carbon dioxide emission from tidal marshes in the Min River Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2830-2840.
- [11] 伊丽努尔·阿力甫江,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等. 1958—2012 年博斯腾湖水位变化驱动力[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 240-247.

- Ilnur ·Ghalip, Hamid ·Yimit, Mamattursun ·Eziz, et al. The driving forces of the Bosten Lake water level variations in 1958—2012[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1):240-247.
- [12] 裴新国, 闫晓燕, 周国良. 博斯腾湖的盐污染及其控制[J]. *干旱区地理*, 1991(1):59-63.
- PEI Xin-guo, YAN Xiao-yan, ZHOU Guo-liang. Salt pollution of Bosten Lake and its control[J]. *Arid Land Geography*, 1991(1):59-63.
- [13] 赵明亮, 李艳红, 李发东. 艾比湖湿地典型植物群落入冬期土壤呼吸日变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(12):2432-2438.
- ZHAO Ming-liang, LI Yan-hong, LI Fa-dong. Diurnal variation of soil respiration in a typical plant community in the Ebinur Lake wetland during beginning winter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2432-2438.
- [14] 谭炯锐, 查同刚, 张志强, 等. 土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5):2308-2315.
- TAN Jiong-rui, ZHA Tong-gang, ZHANG Zhi-qiang, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in a poplar plantation in Daxing District, Beijing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):2308-2315.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical method of soil agrochemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 谢艳兵, 贾庆宇, 周莉, 等. 盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸作用动态及其影响因子分析[J]. *气象与环境学报*, 2006, 22(4):53-58.
- XIE Yan-bing, JIA Qing-yu, ZHOU Li, et al. Soil respiration and its controlling factors at *Phragmites communis* wetland in Panjin[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(4):53-58.
- [17] Schleser G H. The response of CO₂ evolution from soils to global temperature changes[J]. *Z Naturf*, 1982, 37(3):287-391.
- [18] 张金霞, 曹广民, 周觉卫, 等. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. *生态学报*, 2003, 23(4):627-634.
- ZHANG Jin-xia, CAO Guang-min, ZHOU Dang-wei, et al. The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4):627-634.
- [19] 聂明华, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口潮滩土壤呼吸季节变化及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4):824-831.
- NIE Ming-hua, LIU Min, HOU Li-jun, et al. Seasonal variation of soil respiration and its influence factors in tidal flat of Yangtze Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(4):824-831.
- [20] 刘尚华, 吕世海, 冯朝阳, 等. 京西百花山区六种植物群落凋落物及土壤呼吸特性研究[J]. *中国草地学报*, 2008, 30(1):78-86.
- LIU Shang-hua, LÜ Shi-hai, FENG Chao-yang, et al. Study on soil and litter respiration characteristics of six communities in Baihua mountainous Area in West Beijing[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(1):78-86.
- [21] 刘霞, 胡海清, 李为海, 等. 寒温带岛状林沼泽土壤呼吸速率和季节变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(24):7356-7364.
- LIU Xia, HU Hai-qing, LI Wei-hai, et al. Soil respiration rate and its seasonal variation of island forested swamp in cool temperate zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24):7356-7364.
- [22] 王德宣, 宋长春, 王跃思, 等. 若尔盖高原泥炭沼泽湿地 CO₂ 呼吸通量特征[J]. *生态环境*, 2005, 14(6):880-883.
- WANG De-xuan, SONG Chang-chun, WANG Yue-si, et al. Carbon dioxide flux from peat mire in Ruergai plateau[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6):880-883.
- [23] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原湿地土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放的初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5):846-851.
- HAO Qing-ju, WANG Yue-si, SONG Chang-chun, et al. Primary study on CO₂ and CH₄ emissions from wetland soils in the Sanjiang Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):846-851.
- [24] 胡启武, 幸瑞新, 朱丽丽, 等. 鄱阳湖苔草湿地非淹水期 CO₂ 释放特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6):1431-1436.
- HU Qi-wu, XING Rui-xin, ZHU Li-li, et al. Characteristics of CO₂ emission from *Carex*-dominated wetland in Poyang Lake in non-flooded period[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6):1431-1436.
- [25] 汪浩, 于凌飞, 陈立同, 等. 青藏高原海拔高寒湿地土壤呼吸对水位降低和氮添加的响应[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(6):619-625.
- WANG Hao, YU Ling-fei, CHEN Li-tong, et al. Responses of soil respiration to reduced water table and nitrogen addition in an alpine wetland on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(6):619-625.
- [26] 秦璐, 吕光辉, 张雪妮, 等. 干旱区艾比湖湿地土壤呼吸的空间异质性[J]. *干旱区地理*, 2014(4):704-712.
- QIN Lu, LÜ Guang-hui, ZHANG Xue-ni, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration at Ebinur Lake Wetland nature reserve in arid area[J]. *Arid Land Geography*, 2014(4):704-712.
- [27] 朱敏, 张振华, 于君宝, 等. 氮沉降对黄河三角洲芦苇湿地土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(6):517-529.
- ZHU Min, ZHANG Zhen-hua, YU Jun-bao, et al. Effect of nitrogen deposition on soil respiration in *Phragmites australis* wetland in the Yellow River Delta, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(6):517-529.
- [28] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局[J]. *环境科学*, 2003, 24(6):23-32.
- WU Jian-guo, ZHANG Xiao-quan, XU De-ying. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(6):23-32.
- [29] 卢妍, 宋长春, 王毅勇, 等. 三江平原毛苔草沼泽 CO₂ 排放通量日变化研究[J]. *湿地科学*, 2008, 6(1):69-74.
- LU Yan, SONG Chang-chun, WANG Yi-yong, et al. Diurnal variation of CO₂ emission flux from *Carex lasiocarp* marsh in the Sanjiang Plain[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(1):69-74.
- [30] Schedlbauer J L, Oberbauer S F, Starr G, et al. Seasonal differences in the CO₂ exchange of a short-hydroperiod Florida Everglades marsh[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7/8):994-1006.
- [31] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1):383-390.
- [32] Wang Y S, Hu Y Q. An investigation on the relationship between emis-

- sion / uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(1):119-127.
- [33] Raich J W, Potter C S. Global pattern of carbon dioxide emission from soil[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1):23-36.
- [34] Fang C, Moncrieff J B. A model for soil CO₂ production and transport1: Model development[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95(4):225-236.
- [35] 时秀焕, 张晓平, 梁爱珍, 等. 土壤 CO₂ 排放主要影响因素的研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3):761-768.
SHI Xiu-huan, ZHANG Xiao-ping, LIANG Ai-zhen, et al. Advance in the main factors controlling soil carbon dioxide flux[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3):761-768.
- [36] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(3):199-209.
- [37] Huang Z Q, Wan X H, He Z M, et al. Soil microbial biomass, community composition and soil nitrogen cycling in relation to tree species in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62:68-75.
- [38] 陶 晓, 崔 珺, 徐 俊, 等. 城市绿地土壤呼吸特点及影响因素[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1):54-59.
TAO Xiao, CUI Jun, XU Jun, et al. Characteristics of soil respiration and its controlling factors in urban green-lands in Hefei, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1):54-59.
- [39] 张 巍, 冯玉杰. 松嫩平原不同盐渍土条件下蓝藻群落的生态分布[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(5):718-722.
ZHANG Wei, FENG Yu-jie. Distribution of soil microorganism and their relations with soil factors of saline-alkaline grasslands in Songnen Plain[J]. *Grassland and Turf*, 2008, 27(5):718-722.



新书推荐



河流重金属生态风险评估与预警

周军、马彪、高凤杰 等著

本书分析了河流水体、鱼体和表层沉积物重金属含量状况,应用多种模型方法实现了河流重金属生态风险评估,并构建了河流三相介质空间重金属综合生态风险评估模型,并将评价结果应用于松花江重金属优控污染物的筛选;集成 SQL Server 2008、Visual Studio ET 2010 及 Arc Engine 10 开发了 C/S 模式下河流重金属污染预警信息系统,整合一维水质模型和二维水质模型,结合河流水文特征,设置红、橙、黄、蓝四级预警,实现了重金属突发事件污染扩散的可视化模拟与空间展布;从七大方面提出了河流重金属污染防治对策,并给出了 2020 年、2030 年河流重金属污染防治阶段性目标建议。

※书号:9787122273420

※定 价:68.0

※开本:16

※出版日期:2017 年 1 月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。