

科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量特征

程 功^{1,3}, 刘廷玺^{1,2}, 王冠丽^{1,2}, 段利民^{1,2}, 马立群¹

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 南京 210000)

摘 要: 为了明确科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统中不同生态系统生育期内温室气体通量变化规律及其影响因素, 采用静态箱—气相色谱法, 于 2017 年 5—10 月对呈梯级分布的半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地、农田(玉米)和草甸湿地 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量进行了原位观测, 并同步测量取样点的土壤温度、土壤含水量、土壤总有机质含量、总磷含量和总氮含量。对温室气体通量及其影响因子之间进行了相关分析, 结果表明: 科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统中温室气体通量均具有明显的季节性变化, 温室气体通量受到土壤含水量和土壤温度的显著影响, 二者共同作用促进了温室气体通量的吸收或排放。在干旱半干旱地区, 土壤含水量显著影响着土壤温室气体通量对土壤温度的敏感性, 土壤温室气体通量随着温度的增加而增大, 同时土壤含水量超过田间持水率时, 土壤温室气体通量又会随着土壤含水量的增大而降低, 从而影响土壤温室气体通量对土壤温度的响应。CO₂ 通量的温度敏感性(Q₁₀)表现为: 农田(4.18) > 草甸湿地(2.87) > 人工林地(2.51) > 半固定沙丘(2.41) > 半流动沙丘(2.36)。CO₂ 排放峰值出现在在水热条件较好的 7 月、8 月, 其中 8 月 22 日附近的排放峰值明显高于 7 月 21 日附近的排放峰值。3 种温室气体通量均值呈现出梯级变化(换算为 CO₂): 半流动沙丘[181.65 mg/(m²·h)] < 半固定沙丘[242.16 mg/(m²·h)] < 人工林地[348.33 mg/(m²·h)] < 农田[405.72 mg/(m²·h)] < 草甸湿地[(487.63 mg/(m²·h)]。试验区土壤总有机质含量、总磷含量也呈现出相同的梯级变化, 生育期 CO₂ 通量与土壤总有机质含量和总磷含量呈极显著正相关($p < 0.01$)。生育期内 N₂O 通量的变异对土壤温度的响应更强烈。

关键词: 科尔沁; 温室气体; 有机质; 土壤温度; 土壤含水量

中图分类号: S152; X16

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0096-09

Characteristics of CO₂, CH₄ and N₂O Fluxes in Horqin Dune-Meadow Cascade Ecosystem

CHENG Gong^{1,3}, LIU Tingxi^{1,2}, WANG Guanli^{1,2}, DUAN Limin^{1,2}, MA Liqun¹

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018,*

China; 2. Inner Mongolia Water Resource Protection and Utilization Key Laboratory, Hohhot 010018, China;

3. Nanjing Water Conservancy Planning, Design Institute Corporation Limited, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to study the variation pattern of greenhouse gas fluxes and the influencing factors in different areas of Horqin sand dune-meadow cascade ecological belt, we used the static chamber-GC technique and conducted in situ observations of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in semi-mobile dunes, semi-fixed dunes, artificial forest land, farmland (maize) and meadows from May to October, 2017, and simultaneously measured soil temperature, soil moisture, total carbon, total phosphorus and total nitrogen. Correlation analysis on greenhouse gas fluxes and the influencing factors showed that the greenhouse gas fluxes in the Horqin sand dune-meadow ecological belt had obvious seasonal changes, which was significantly affected by soil moisture and soil temperature. The combination of the two promoted the absorption or emission of greenhouse gas fluxes.

收稿日期: 2018-10-18

修回日期: 2018-11-02

资助项目: 国家自然科学基金(51620105003, 51139002, 51669017); 教育部科技创新团队滚动发展计划(IRT_17R60); 科技部重点领域创新团队(2015RA4013); 内蒙古自治区草原英才创业创新人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6)

第一作者: 程功(1993—), 男, 黑龙江大庆人, 在读硕士研究生, 研究方向为温室气体通量。E-mail: 18645979803@163.com

通信作者: 刘廷玺(1966—), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文与资源环境研究。E-mail: txliu1966@163.com

In arid and semi-arid regions, the sensibility of soil greenhouse gas fluxes to soil temperature is highly dependent on soil moisture. The soil greenhouse gas fluxes increase with the increase of the temperature. When soil moisture exceeds the field water holding capacity, the soil greenhouse gas fluxes will decrease with the increase of soil moisture, which affects the response of the soil greenhouse gas fluxes to soil temperature. Temperature sensitivity of CO₂ (Q₁₀) decreased in the order: farmland (4.18) > meadow (2.87) > artificial forest land (2.51) > semi-fixed sand dune (2.41) > semi-mobile dune (2.36). The peak of CO₂ emission appeared in July and August when the hydrothermal condition was better, and the peak around August 22 was significantly higher than that around July 21. The average roll of three greenhouse gas fluxes (converted to CO₂) increased in the order: semi-mobile dunes [181.65 mg/(m² · h)] < semi-fixed dunes [242.16 mg/(m² · h)] < artificial forest land [348.33 mg/(m² · h)] < farmland [405.72 mg/(m² · h)] < meadows [487.63 mg/(m² · h)]. Organic matter and total phosphorus of the soil in the test area also showed the same change. The CO₂ flux in the growing season showed significantly positive correlation with organic matter and total phosphorus of the soil ($p < 0.01$). Soil N₂O flux is more responsive to soil temperature in the growing season.

Keywords: Horqin; greenhouse gases flux; organic matter; soil temperature; soil moisture

CO₂, CH₄, N₂O 作为温室效应贡献最大的 3 种温室气体,其排放是造成全球变暖的主要原因^[1],在过去的数年里,这 3 种温室气体分别以每年 0.3%, 0.9%, 0.5% 的速率快速增长^[2]。CH₄, N₂O 的增温潜势分别为 CO₂ 的 25 倍, 298 倍^[3-4]。土壤—大气界面进行着复杂的温室气体交换,温室气体的源和汇对全球气候变化有着重要影响,因此了解温室气体的排放调控机理,并减缓温室气体排放成为了当今生态环境研究的重要议题。

干旱半干旱地区各生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,在维护全球生态系统健康和碳氮循环上起着重要作用^[5-6]。目前对 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量的观测及其相关因子研究主要集中在森林^[7]、农田^[8]、草地^[9-10]和湿地^[11]等孤立的生态系统,对于干旱半干旱地区沙丘生态系统和相邻的多种生态系统整体性研究较少^[12-16]。土壤含水量、土壤温度、不同群落的植物根系呼吸以及不同地貌下土壤总有机质、总磷、总氮含量引起不同生态系统土壤温室气体通量变化规律存在时空差异^[17-18],有研究表明,即便是相邻的两个生态系统之间的温室气体通量变化规律也存在差异^[19-20]。科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统中包含多种呈梯级分布的生态系统,且该地区属于干旱半干旱地区,受到水分胁迫的影响温室气体通量变化较为复杂,对于该地的研究较少,不利于碳氮循环机理的研究^[20]。

本文以科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统中呈梯级分布的半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地、农田(玉米)、和草甸湿地作为研究对象,于 2017 年 5—10 月观测整个生育期温室气体通量、土壤温度、土壤含水量和各个地貌下土壤的总有机质、总氮、总磷含量,

分析生育期内梯级生态系统不同地貌温室气体通量变化特征及其对各影响因子的响应。通过对比研究梯级生态系统中不同地貌土壤和植物的阶梯性变化,对研究多生态系统温室气体通量变化规律提供数据支持,并对科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统温室气体通量的研究提供科学依据和后续研究基础。

1 研究区概况

研究区地理坐标为 122°33'00"—122°41'00"E, 43°18'48"—43°21'24"N,位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇,面积 55 km²,地处科尔沁沙丘东南缘,境内海拔最高 235 m,最低 184 m。区内自北向南沙丘、林地、农田、草甸湿地相间分布,为典型的沙丘—草甸梯级生态系统。该区多年平均降水量 386 mm,主要集中在 6—9 月;多年平均水面蒸发量(Φ20 cm 蒸发皿)1 410 mm,主要集中在 4—9 月;多年平均相对湿度 55.7%;多年平均气温 6.5℃,年极端最低气温—33.9℃,年极端最高气温 36.4℃;年平均风速 3~4 m/s。植物生长主要依赖天然降水,草甸湿地部分湿生植被还依赖地下水。区内沙丘地带性土壤和非地带性土壤广泛发育,交错分布,地带性土壤为栗钙土,非地带性土壤主要为风沙土、盐碱土。风沙土是主要的土壤类型,包括流动风沙土、半固定风沙土以及固定风沙土。

本文选择沙丘—草甸梯级生态系统中自北向南呈梯级分布的半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地、农田和草甸湿地作为研究对象。半流动沙丘和半固定沙丘大部分地面裸露,主要植物分别为差巴嘎蒿 (*Artemisia halodendron*) 和小叶锦鸡 (*Caragana microphylla*),土质干燥、松散,保水持水能力差;人工林地主要生长人工种植杨树,树种为小叶杨与黑杨

杂交(*Populus simonii* × *Populus nigra*), 树龄介于 25~30 a, 平均为 28 a, 树高平均为 11.9 m, 胸径平均为 11.2 cm, 株行距约 2 m × 3 m; 农田种植农作物为玉米(*Zea mays* L.), 5 月播种, 9 月下旬收割; 草甸湿地天然植被主要为芦苇(*Aneurolepidium chinense*)

和羊草(*Phragmites communis*), 土壤含水量充沛且保水持水能力较强, 9 月 1 号草甸湿地开始人工刈割牧草, 历时 2 d。除农田试验区在初次播种时浇灌, 生育期内全部地区只受到自然降水影响。试验区样方内土壤理化性质及其他相关信息见表 1。

表 1 试验区土壤物理化学特征参数及相关信息

试验点	土壤类型	pH 值	干容重/ (g · cm ⁻³)	土壤有机质/ (g · kg ⁻¹)	总氮/ (g · kg ⁻¹)	总磷/ (g · kg ⁻¹)	植被根系量/ (g/800 cm ³)
半流动沙丘	砂土	7.3	1.77	0.820	0.22	0.055	1.27
半固定沙丘	砂土	7.8	1.81	1.996	0.69	0.066	2.35
人工杨树林	砂质壤土	8.0	1.86	3.060	1.49	0.091	10.84
农田(玉米)	砂质壤土	8.2	1.88	3.357	1.52	0.097	4.90
草甸湿地	砂质壤土	8.3	1.38	5.142	1.85	0.121	11.18

注: 土壤取样深度为 0—10 cm; 根系量取样深度为 0—40 cm, 分 8 个层次每层 5 cm; 表中数据均为平均值。

2 研究方法

2.1 样地设置

分别在不同的生态系统中选取 3 块平坦且能够代表该地区生境的 10 m × 10 m 的样方, 并在每个样方内随机选取 3 个重复取样点, 即每块试验区共 9 个重复取样点。在试验开始一周前将静态箱基座插入土壤中, 尽量不破坏原有植物及土壤状态, 采集时植物罩在箱内, 尽可能将人为因素对微量气体交换的扰动降到最低。

2.2 气体样品的采集和测定

采用静态箱—气相色谱法, 静态箱由厚 2.0 mm 的 pvc 非透明板制成, 静态箱规格为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 包括顶箱和基座两部分, 内设小风扇和温度计。基座边缘设有水槽, 将顶箱置于基座上, 上下箱体用水槽中的水密封。实际计算通量时以地箱高度为准。所测定结果为土壤大气系统之间的气体交换量(含植物呼吸)。

于 2017 年 5—10 月(生育期)内每 7 d 左右选取晴好天气的 9:00—11:00 时段, 在所设立的取样点同时(多人同时操作)进行温室气体通量的原位观测。采用 30 min 罩箱时间, 即每个采样箱分别罩箱后的 0, 10, 20, 30 min 抽取气体样品。采样容器为 100 ml 带三通阀的医用注射器, 将注射器与箱体一侧的排气阀相连, 抽取 30~60 ml 气体样品放入气袋, 同时记录取样时间和箱内温度。气样带回实验室后, 一周之内使用安捷伦 7890B 气相色谱仪分析 CO₂, CH₄ 和 N₂O 浓度。

2.3 土壤温度和含水量

气温和降水量等气象要素通过试验点 5 m 左右布设的波文比—土壤环境监测系统全天候 24 h 自动采集, 气温由距地面 2 m 高处的传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)测量, 降水量通过距无冠

层遮挡的地面 0.7 m 高处的自记雨量计(TE525MM, Texas Eleceonics, Dallas, USA)测量, 土壤温湿度通过分层位(10, 20 cm 等)埋在土壤中的探头(Hydra Probe II, Stevens, USA)测量, 探头均在测量区域内以三角分布(即为 3 个重复), 以上数据通过数据采集器(CR1000, Campbell, Logan, USA)每 10 min 在线采集一次, 计算平均值, 自动存储。

2.4 气体通量及温度敏感性指标的计算

温室气体通量根据一定面积一定时间内气体浓度梯度进行计算。气体交换通量(F)计算公式^[21]:

$$F_{\text{计算}} = \Delta m / (A \cdot \Delta t) = (\rho \cdot V \cdot \Delta c) / (A \cdot \Delta t) = \rho \cdot H \cdot (\Delta c / \Delta t) \quad (1)$$

式中: $F_{\text{计算}}$ 为气体交换通量; ρ 为箱内气体密度; Δm , Δc , Δt 分别为时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化; A , V , H 分别为采样箱的底面积、体积和气室高度; $\Delta c / \Delta t$ 为箱内气体浓度变化。计算通量过程中, 通过式中引入箱内温度和气压值, 对气体浓度进行校正^[22]:

$$F_{\text{校正}} = F_{\text{计算}} \cdot [(273 + T_0) \cdot (P_0 + P_A)] / [P_0 \cdot (273 + T_A)] \quad (2)$$

式中: $F_{\text{校正}}$ 为校正后气体交换通量; T_0 为标准状态温度(20℃); P_0 为标准大气压(0.101 33 MPa); P_A 为测量当日当地大气压; T_A 为测量时平均温度, 当 F 为负值时表示吸收; F 为正值时表示排放。

建立 F 和 T_s 的指数型函数:

$$F = ae^{bT_s} \quad (3)$$

式中: F 为气体交换通量; T_s 为土壤平均温度; a , b 为常数; Q_{10} 为温室气体排放的温度敏感性指标, 用温度变化 10℃ 时气体通量的相对变化来表示, 其计算公式为^[23]:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (4)$$

2.5 数据分析

使用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 采用指数和线性方程函数分别拟合各层为土壤

温湿度等相关因子与温室气体通量的关系(设置 $\alpha = 0.05$)。用逐步回归分析法对温室气体通量与相关影响因子进行多元线性回归分析,找出影响3种温室气体的主要因素。绘图采用 Excel 2010 和 Origin 8.0,图中均为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 梯级生态系统大气与土壤水热变化

如图1所示,2017年降雨分布不均,2017年科尔沁地区4—10月自然降雨23次,累计降雨量319.8 mm,降雨主要集中在8月上旬,8月4日、8月10日和8月15日分别集中降雨111.3、35.0、47.4 mm,共212.1 mm,占整个生育期降雨的66.3%。2017年生育期均温19.4℃。

试验区土壤温度变化趋势均与大气温度相近;土壤含水量变化差异显著($p < 0.05$),半流动沙丘和半固定

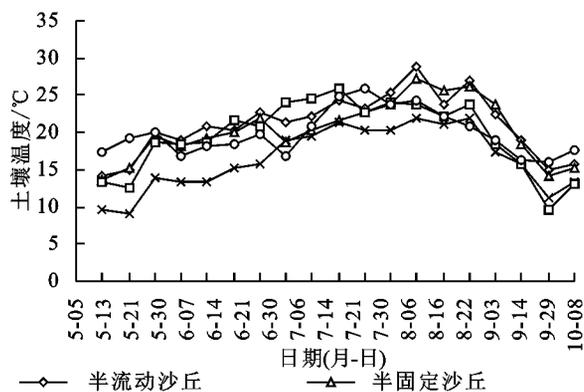


图2 2017年研究区土壤水热变化

3.2 温室气体的季节变化

温室气体通量在生育期均具有明显的季节性变化(图3)。CO₂ 通量变化范围为39.73~1274.24 mg/(m²·h),生育期内表现为排放,其排放最大值出现在8月22日附近,草甸湿地的排放量最大1274.24 mg/(m²·h);最小值出现在生育期初期,为半流动沙丘39.73 mg/(m²·h)。CH₄ 通量变化范围为-133.49~-0.84 μg/(m²·h),生育期内表现为吸收,其吸收的最大值出现在8月22日附近,人工林地吸收值最大-17.51 μg/(m²·h);吸收最小值出现在6月14日附近,为半流动沙丘-0.84 μg/(m²·h)。N₂O 通量变化范围为0.006~24.41 μg/(m²·h),生育期内表现为排放,其排放最大值出现在7月21日附近,草甸湿地的排放值最大24.41 μg/(m²·h);最小值出现在生育期末期,为草甸湿地[0.006 μg/(m²·h)]。

试验区温室气体通量平均值均呈梯级分布,CO₂ 通量表现为:半流动沙丘[180.86 mg/(m²·h)]<半固定沙丘[241.32 mg/(m²·h)]<人工林地[347.14 mg/(m²·h)]<农田[404.54 mg/(m²·h)]<草甸

沙丘土壤含水量整体较低,土壤含水量大部分时间低于4%。土壤含水量平均值表现为湿地草甸(37.5%)>农田(18.5%)>人工林地(8.7%)>半固定沙丘(3.6%)>半流动沙丘(3.1%)(图2)。试验区土壤有机质含量、氮含量、磷含量也均呈梯级分布(表1)。

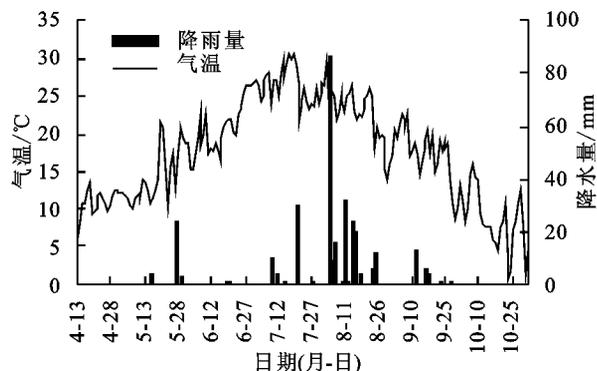
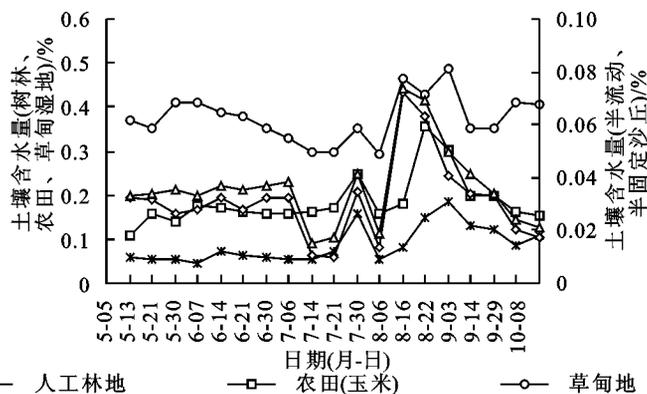


图1 2017年研究区生育期降雨和温度变化



湿地[486.17 mg/(m²·h)],以试验区类型为因子对试验区CO₂ 通量进行单因素方差,分析结果表明不同试验区之间没有显著差异性($p > 0.05$)(图3A);CH₄ 通量表现为:半流动沙丘[-42.36 μg/(m²·h)]>半固定沙丘[-43.41 μg/(m²·h)]>人工林地[-45.19 μg/(m²·h)]>农田[-48.66 μg/(m²·h)]>草甸湿地[-51.39 μg/(m²·h)]。在生育期草甸湿地和其他试验区CH₄ 通量变化规律不同,其他试验区均在8月上中旬连续集中降雨后达到了全年吸收的最大值,但在8月初连续密集降雨开始后草甸湿地的CH₄ 吸收值有所下降(图3B);N₂O 通量表现为:半流动沙丘[6.21 μg·(m²·h)]<半固定沙丘[6.47 μg/(m²·h)]<人工林地[7.79 μg/(m²·h)]<农田[8.02 μg/(m²·h)]<草甸湿地[9.01 μg/(m²·h)]。草甸湿地N₂O 通量变化规律在生育期初期和其他试验区不同,其他试验区在生育初期随着温度的上升N₂O 通量缓慢增大,草甸湿地N₂O 通量随着土壤含水量的降低出现明显的减小趋势(图3C)。

在整个生育期过程中,5块试验区温室气体吸收

和排放均值与之前研究者得到的数据相近^[7-16],但由于各地土壤理化性质和气候环境以及植物生长情况等诸多因素的不同,也导致各研究区温室气体通量之间有所差异^[17-18]。

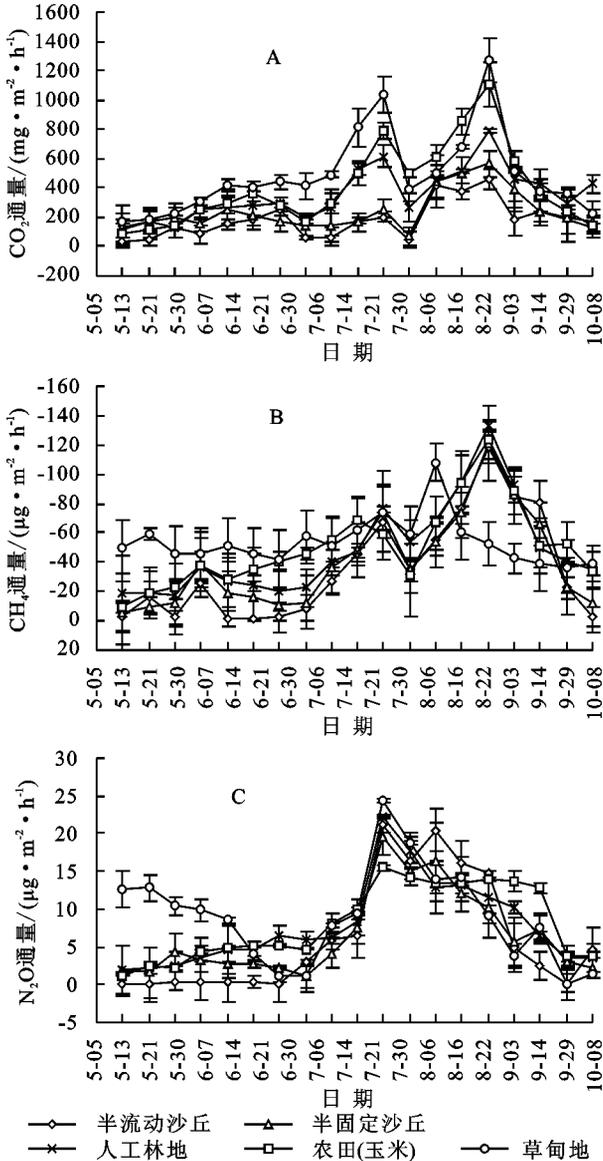


图 3 研究区生育期温室气体通量值的月变化($n=9$)

3.3 梯级生态系统温室气体通量关键因子分析

通过逐步回归分析的方法,对影响土壤温室气体通量的影响因子进行计算,发现 10 cm 处土壤含水量是影响半固定沙丘、人工林地和农田土壤 CO_2 通量的最关键因子,同时土壤温度对半固定沙丘、人工林地和农田也产生一定影响,二者共同作用可以解释 66.8%,87.2%,85.2% 的土壤 CO_2 通量变化。半流动沙丘土壤 CO_2 通量变化的关键因子只有 10 cm 处的土壤含水量,可以解释其变化的 30.7%;影响湿地草甸 CO_2 通量变化的关键因子为 10 cm 处的土壤温度,土壤温度可以解释 34.1% 的土壤 CO_2 通量变化(表 2)。

10 cm 处土壤含水量是影响半流动沙丘、半固定

沙丘和人工林地土壤 CH_4 通量的关键因子,土壤含水量可以解释半固定沙丘土壤 CH_4 通量变化的 48.4%,同时 20 cm 处土壤温度也对半流动沙丘和人工林地的 CH_4 通量产生影响,二者共同作用可以解释土壤 CH_4 通量变化的 50.3%,84.9%。农田和草甸湿地土壤 CH_4 通量的关键因子为 10 cm 处土壤温度,土壤温度可以解释草甸湿地土壤 CH_4 通量变化的 39.2%,土壤温度和土壤含水量共同作用解释了农田土壤 CH_4 通量变化的 85.8%(表 2)。

逐步回归分析结果表明,10 cm 处土壤含水量是半流动沙丘土壤 N_2O 通量的关键因子,和 10 cm 处土壤温度共同作用可以解释半流动沙丘土壤 N_2O 通量变化的 72.5%,10 cm 处土壤温度是影响半固定沙丘、人工林地、农田和草甸湿地土壤 N_2O 通量的关键因子,分别可以解释土壤 N_2O 通量变化的 51.0%,71.1%,81.7%,50.6%(表 2)。

表 2 温室气体与土壤湿度的逐步回归方程

温室气体	试验区	方程	R^2	p
CO_2	半流动沙丘	$F=6609.6M_{10}+2408.6$	0.307	<0.05
	半固定沙丘	$F=4675.1M_{10}+12.9T_{10}+5.527$	0.668	<0.01
	人工林地	$F=2932.1M_{10}+15.1T_{20}+4.401$	0.872	<0.01
	农田	$F=3265.9M_{10}+27.4T_{10}+7.969$	0.852	<0.01
	草甸湿地	$F=55.5T_{10}+18.696$	0.341	<0.05
CH_4	半流动沙丘	$F=-2229.2M_{10}-2.302T_{20}+1.065$	0.503	<0.05
	半固定沙丘	$F=-1279.8M_{10}+1.385$	0.484	<0.01
	人工林地	$F=-519.9M_{10}-2.75T_{20}+0.866$	0.849	<0.01
	农田	$F=-4.016T_{10}-409.1M_{10}+92.931$	0.858	<0.01
	草甸湿地	$F=4.882T_{10}+1.474$	0.392	<0.01
N_2O	半流动沙丘	$F=410.4M_{10}+1.038T_{10}+127.54$	0.725	<0.01
	半固定沙丘	$F=0.99T_{10}+0.235$	0.510	<0.01
	人工林地	$F=1.048T_{10}+0.162$	0.711	<0.01
	农田	$F=0.817T_{10}+0.151$	0.633	<0.01
	草甸湿地	$F=1.501T_{10}+0.360$	0.506	<0.01

注: M 为土壤含水量, T 为土壤温度,下标为土层深度,下表同。

3.4 梯级生态系统土壤含水量对温室气体通量的影响

经 Pearson 法相关分析,结果表明半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地和农田在生育期的温室气体通量均值($n=9$)与土壤含水量呈极显著相关(图 4)。本研究区属于干旱半干旱地区,土壤含水量常年较低,半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地和农田在生育期土壤含水量差异性显著($p<0.05$),其平均值 3.1%,3.6%,8.7%,18.5%,均长期小于田间持水率 9.41%,11.1%,29.7%,25.4%。土壤含水量较低的地区,水分胁迫是限制温室气体吸收或排放的重要因素^[24],水分胁迫会使微生物(包括甲烷氧化菌)及活性酶对水分的依赖增强^[25-27],因此土壤含水量是半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地和农田土壤 CO_2 , CH_4 通量变化的关键因

子。这也解释了 CO₂ 和 CH₄ 通量在 7 月 20 日和 8 月上中旬大量降雨后分别出现了排放和吸收高峰的情况(图 3),降水规律所引起的土壤含水量变化是影响土壤温室气体通量的重要因素^[28]。水分状况对土壤 N₂O 通量的生成有明显影响,同时也对土壤通气状态和传输能力有影响,温度适宜的干旱半干旱地区土壤处于田间持水率以下时, N₂O 通量与土壤含水量成正比^[29]。干湿交替的土壤状况也可能会增加土壤 N₂O 通量^[30]。这也解释了 7 月 20 日降雨后土壤 N₂O 通量出现排放高峰的情况。

草甸湿地土壤 CO₂ 通量与土壤含水量之间没有呈

现出显著的相关性($p>0.05$)(图 4)。草甸湿地本身土壤含水量较大,在 8 月上中旬连续降雨后土壤含水量高出田间持水率,39.8%,有研究表明:土壤含水量对土壤温室气体通量的影响存在一个临界值,在土壤含水量高于此临界值时其对土壤温室气体通量的影响不明显^[31-32],过多的土壤水分减少了土壤孔隙中的氧气含量,同时也降低了微生物(包括甲烷氧化菌)的活性和植物根系的呼吸^[33-35],从而限制草甸湿地温室气体通量的吸收或排放,这也解释了 8 月上中旬持续降水中, CH₄ 通量只在 8 月 6 日附近出现了吸收峰值后,直至生育期末期土壤 CH₄ 吸收值呈现减小趋势。

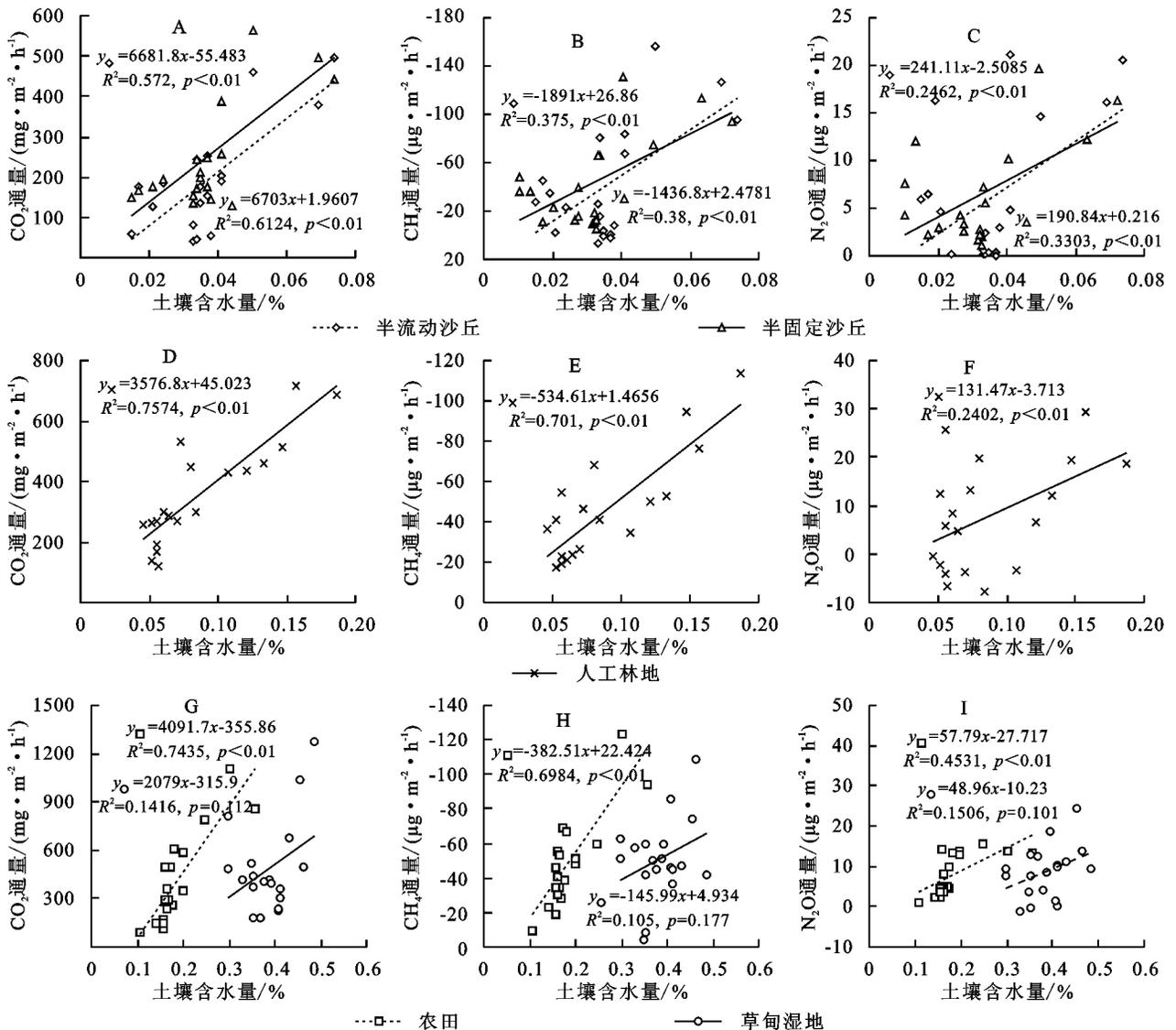


图 4 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量和土壤含水量的关系

3.5 梯级生态系统土壤温度对温室气体通量的影响

土壤温度通过影响植物根系的呼吸作用、微生物呼吸酶的活性以及硝化反应和反硝化反应,从而对土壤温室气体通量产生影响^[36-37]。生育期各生态系统土壤 CO₂ 通量与土壤温度均呈现显著指数正相关关系,CO₂ 的排放值随温度的升高而增加(图 5)。CH₄

通量(N₂O 通量)与土壤温度呈显著负(正)相关,其吸收(排放)值随着土壤温度的升高而增大。土壤含水量平均值表现为:草甸湿地(37.5%)>农田(18.5%)>人工林地(8.7%)>半固定沙丘(3.6%)>半流动沙丘(3.1%)(图 2),Q₁₀值表示土壤 CO₂ 排放速率对温度变化的敏感性,Q₁₀也显示出相近的规律:

农田(4.18) > 草甸湿地(2.87) > 人工林地(2.51) > 半固定沙丘(2.41) > 半流动沙丘(2.36)。干旱半干旱地区土壤温室气体通量对土壤温度的响应高度依赖于土壤含水量^[38], 草甸湿地主要生长芦苇群落, 芦苇群落对于土壤含水量具有良好的适应性, 且草甸湿

地土壤营养丰富, 土壤温室气体通量随着温度的增加而增大, 但当土壤含水量超过田间持水率时, 土壤温室气体通量又会随着土壤含水量的增大而降低^[39-40], 从而影响草甸湿地土壤温室气体通量对土壤温度的响应。

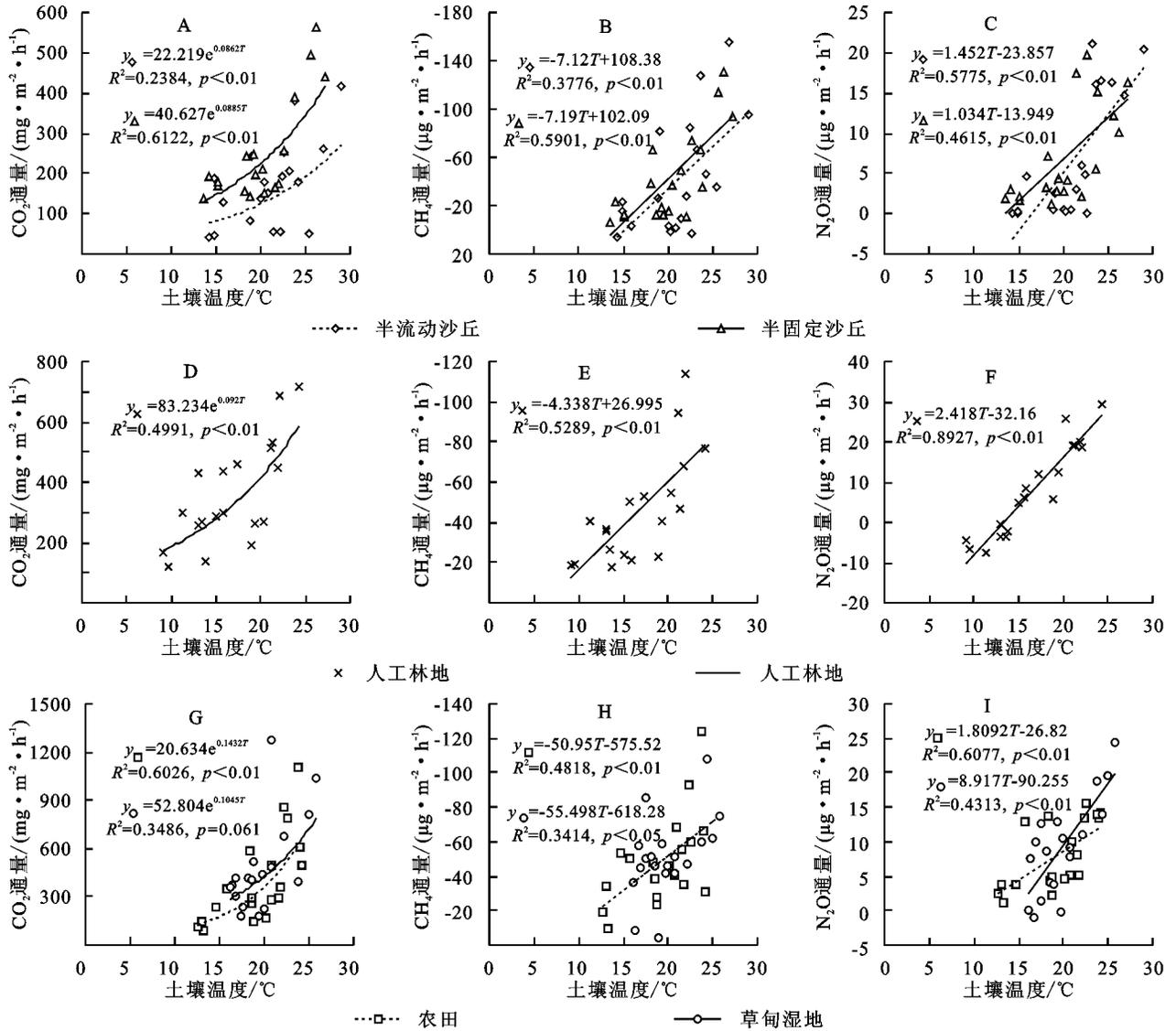


图 5 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量和土壤温度的关系

本研究区内半流动沙丘、半固定沙丘土壤保水持水能力差, 表层(0—80 cm)土壤含水量长期处于较低水平, 且在 7 月、8 月份日照强度大、空气温度较高, 高温条件下土壤浅层的根系萎顿, 微生物死亡, 会致使温室气体排放受到抑制^[41-42], 同时一段时间内的干旱导致土壤含水量较低, 这也解释了 7 月 30 日左右 CO₂, CH₄ 通量出现排放和吸收值低谷的现象, 其中半流动沙丘和半干旱沙丘植物和微生物较少, 此时的排放和吸收低谷更甚于其他试验区(图 3—4)。产生 N₂O 的硝化反应和反硝化反应强度主要依赖于土壤温度^[43-44], 生育期 N₂O 通量的季节变化趋势和气温变化趋势相近(图 1, 图 3C), 因此土壤温度是土壤

N₂O 通量的关键因子(表 2)。

3.6 梯级生态系统土壤理化性质对温室气体通量的影响

本研究区呈梯级分布的各生态系统的土壤总有机质、总氮、总磷含量呈现明显的梯级分布(表 1)。土壤中的总有机质含量、总氮、总磷影响产生和吸收温室气体的植物根系及微生物数量、硝化反应和反硝化反应的强度等因素^[41-44]。

在梯级生态带上生育期的土壤 CO₂ 通量随着土壤有机质和磷含量的梯级分布, 也呈现出梯级增长的趋势(总有机质含量: $R^2 = 0.960$, $p < 0.01$; 总磷: $R^2 = 0.967$, $p < 0.01$), 其中沙丘因土壤有机质和磷

含量较小,总体 CO₂ 排放水平较低,草甸湿地相对较大。有研究表明,土壤 CO₂ 的排放强度主要取决于土壤有机质、磷的含量以及矿化速度^[45];土壤 CH₄ 通量也随着土壤中总有机质含量的变化呈现出梯级变化的趋势($p < 0.01$),二者之间呈现出极显著的负相关性^[46],土壤中的有机质是影响土壤 CH₄ 通量的因素之一^[47],它们为甲烷菌提供 CH₄ 原料和能源从而间接地影响 CH₄ 的吸收;梯级生态带上呈梯级分布的总氮含量和土壤 N₂O 通量之间呈现出极显著的相关性(总氮: $R^2 = 0.997$, $p < 0.01$)。有研究表明,土壤 N₂O 通量和土壤氮含量呈现显著正相关^[48],本文研究结果与这一研究结果相同。

表3 梯级生态系统土壤理化性质与温室气体的关系

温室气体	总有机质含量	总氮含量	总磷含量
CO ₂	0.960**	0.980**	0.967**
CH ₄	-0.955**	-0.994**	-0.978**
N ₂ O	0.975**	0.968**	0.997**

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

4 结论

科尔沁沙丘—草甸梯级生态系统土壤温室气体通量因其土壤理化性质和生长植被的不同而有所差异,土壤温室气体通量具有明显的季节性变化,CO₂ 和 N₂O 在生育期表现为排放,CH₄ 表现为吸收。CO₂, N₂O 和 CH₄ 通量分别在水热条件较好的7月21日附近和8月22日附近达到排放和吸收的峰值。

土壤温室气体通量的季节性变化受到土壤温度和土壤含水量的共同影响,二者通过影响土壤中植物的根系、微生物和活性酶以及硝化反应和反硝化反应的强度来影响温室气体的排放或吸收,在不同条件下二者皆有可能成为土壤温室气体通量的关键因子。在受到水分胁迫的干旱半干旱地区,土壤含水量对 CO₂ 和 CH₄ 通量的变化起到了决定性的作用,而土壤温度对 CO₂ 和 CH₄ 通量的影响高度依赖于土壤含水量:半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地和农田地区土壤含水量较低,土壤温度对 CO₂ 和 CH₄ 通量有一定贡献,但土壤含水量的波动主导了 CO₂ 和 CH₄ 通量的变化,且过高的土壤温度会杀死微生物和植物根系,从而抑制 CO₂ 和 CH₄ 的排放和吸收;草甸湿地土壤含水量较高,草甸湿地生长的芦苇对土壤含水量变化具有良好的适应性,其对 CO₂ 和 CH₄ 通量影响最大的因素是土壤温度,但由于土壤含水量过高,CO₂ 和 CH₄ 的吸收或排放会随着土壤水分的升高而降低,从而影响土壤温度对 CO₂ 和通量的影响。而产生 N₂O 通量的硝化反应和反硝化反应对土壤温度的响应更为强烈。

本研究区内温室气体吸收(CH₄)/排放值(CO₂ 和 N₂O)在生育期整体呈现出半流动沙丘<半固定沙丘<人工林地<农田<草甸湿地,其主要原因是呈现梯级分布的半流动沙丘、半固定沙丘、人工林地、农田和草甸湿地土壤中总有机质、总氮、总磷含量也呈现出梯级分布的特性。从相关分析结果来看,CO₂ 通量与总有机质、总磷含量呈极显著正相关,CH₄ 通量与总有机质含量呈极显著负相关(即 CH₄ 吸收值与总有机质含量呈极显著正相关),N₂O 通量与总氮含量呈极显著正相关。

参考文献:

- [1] Kim Y S, Makoto K, Takakai F, et al. Greenhouse gas emissions after a prescribed fire in white birch-dwarf bamboo stands in northern Japan, focusing on the role of charcoal[J]. *European Journal of Forest Research*, 2011,130(6):1031-1044.
- [2] Alston M. Gender and climate change in Australia and the Pacific[J]. *Journal of Sociology*, 2010,5(1):73-87.
- [3] Mitchell J F B, Johns T C, Gregory J M, et al. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols[J]. *Nature*, 1995,376(6540):501-504.
- [4] Roberts D. Prioritizing climate change adaptation and local level resilience in Durban, South Africa[J]. *Environment and Urbanization*, 2010, 22(2):397-413.
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Series B: Chemical & Physical Meteorology*, 1992,44(2):81-99.
- [6] Jayne Belnap. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. *Hydrological Processes*, 2010,20(15):3159-3178.
- [7] Smith K A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003,54(4):779-791.
- [8] 陈静,张建国,赵英,等. 秸秆和生物炭添加对关中地区玉米—小麦轮作农田温室气体排放的影响[J]. *水土保持研究*, 2018,25(5):170-178.
- [9] 马钢,王平,王冬雪,等. 高寒灌丛土壤温室气体释放对添加不同形态氮素的响应[J]. *草业学报*, 2015,24(3):20-29.
- [10] Jones S K, Rees R M, Skiba U M, et al. Greenhouse gas emissions from a managed grassland[J]. *Global & Planetary Change*, 2005,47(2):201-211.
- [11] 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2015(9):3393-3400.
- [12] 徐世晓,赵亮,李英年,等. 降水对青藏高原高寒灌丛冷

- 季 CO₂ 通量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 193-195.
- [13] Hou L Y, Wang Z P, Wang J M, et al. Growing season in situ uptake of atmospheric methane by desert soils in a semiarid region of northern China[J]. *Geoderma*, 2012, 189/190: 415-422.
- [14] Zhongwu Wang, Xiyang Hao, Dan Shan, et al. Influence of increasing temperature and nitrogen input on greenhouse gas emissions from a desert steppe soil in Inner Mongolia[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2011, 57(4): 508-518.
- [15] Huang L, Zhang Z, Li X. Soil CO₂ concentration in biological soil crusts and its driving factors in a revegetated area of the Tengger Desert, Northern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(3): 767-777.
- [16] 禹朴家, 徐海量, 王伟, 等. 沙丘不同部位土壤呼吸对人工降水的响应[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 437-441.
- [17] Brussaard L, Pede R, Brown G G. Soil biodiversity for agricultural sustainability[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 121(3): 233-244.
- [18] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [19] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, et al. Seasonal variation of soil respiration under different land use/land cover in arid region[J]. *Science in China*, 2007, 50(1): 76-85.
- [20] Pete Smith. Global climate change and pedogenic carbonates[J]. *Geoderma*, 2001, 104(1): 180-182.
- [21] Ma A, Lu J, Wang T. Effects of elevation and vegetation on methane emissions from a freshwater estuarine wetland[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 285(6): 1319-1329.
- [22] Taylor J L A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [23] Boone R D, Nadelhoffer K J. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [24] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis[J]. *Ecology*, 2012, 93(4): 930-938.
- [25] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(3): 647-653.
- [26] Or D, Smets B F, Wraith J M, et al. Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media: A review[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(6): 1505-1527.
- [27] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3): 387-401.
- [28] 周丽艳, 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.
- [29] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(3): 273-279.
- [30] 徐华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土地管理对水稻土 CH₄ 排放季节变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 215-218.
- [31] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology & Management*, 2005, 204(1): 87-97.
- [32] Zoellick B W, Ulmschneider H M, Cade B S, et al. Isolation of Snake River islands and mammalian predation on waterfowl nests[J]. *Journal of Wildlife Management*, 2004, 68(3): 650-662.
- [33] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [34] Leon E, Vargas R, Bullock S, et al. Hot spots, hot moments, and spatio-temporal controls on soil CO₂ efflux in a water-limited ecosystem[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77(7): 12-21.
- [35] Einola J K M, Kettunen R H, Rintala J A. Responses of methane oxidation to temperature and water content in cover soil of a boreal landfill[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 1156-1164.
- [36] Trumbore S, Costa E S D, Nepstad D C, et al. Dynamics of fine root carbon in Amazonian tropical ecosystems and the contribution of roots to soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 12(2): 217-229.
- [37] Ingwersen J, Butterbachbahl K, Gasche R, et al. Barometric process separation: New method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 117-128.
- [38] Holland M E A. Biospheric trace gas fluxes and their control over tropospheric chemistry[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 547-576.
- [39] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 2010, 4(2): 217-227.

4 结论

(1) 60年来流域年均降雨量为1 599.76 mm,流域降雨以0.66 mm/a减少。年降水的37.32%集中在春季,冬季只占13.05%,变差系数以秋季最高达0.92,冬、夏、春季依次减小。年降水总量和春、夏、冬三季降雨量均呈增加趋势,但变化不显著;只有秋季降雨呈减小趋势。

(2) 在年代际变化中,年和四季降雨在60 a内都呈现减一增一减的趋势,但是年、夏季和冬季的峰值在1991—2000年,春季和秋季的峰值在1981—1990年。从空间上来看,流域面降雨在上、中游有显著的变化趋势:秋季减少,冬季增加;流域降雨在全年和四季均没有突变发生;但就单个站点而言,突变在年内有分散发生,春季和夏季较多。

(3) 年降雨量和各季降雨量变化虽不显著,但多年变差系数较大,降雨年内分布不均,呈双峰型分布,有明显的“两峰一谷”存在。流域在7—9月用水高峰时段可利用水资源量相对减少,加剧供水用水矛盾,导致该流域旱、涝灾害发生机率增大,给流域内的水利工程的调度和企业用水增加了难度。合理配置流域水资源,实施科学水量调度的在空间和时间分布,提高水资源利用率,是解决流域用水的根本方法。

参考文献:

- [1] 江西省. 江西河湖大典[M]. 武汉:长江出版社,2010.
- [2] 江西省水利厅. 江西水旱灾害[M]. 南昌:江西省水利厅,1995.
- [3] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2006,2(1):1-5.

- [4] Buizer J L, Foster J, Lund D. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3):417-426.
- [5] Tabari H, Taleae P H. Temporal variability of precipitation over Iran; 1966—2005[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3):313-320.
- [6] 马锋敏,章毅之,唐传师,等. 近52年江西省汛期极端降水事件的时空变化[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(10):1348-1355.
- [7] 徐伟成,钟永浩. 章江洪水特点与防洪对策[J]. 江西水利科技,2005(S1):76-78.
- [8] 刘惠英,白桦. 赣江上游章水流域水沙变化的驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(3):615-623.
- [9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京:气象出版社,2007.
- [10] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.
- [11] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013,100:172-182.
- [12] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28(2):126-135.
- [13] Yue S, Hashino M. Long term trends of annual and monthly precipitation in Japan[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003,39(3):587-596.
- [14] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific; 1961—1998[J]. International Journal of Climatology, 2001,21(3):269-284.

(上接第104页)

- [40] Gullledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska[J]. Ecosystems, 2000,3(3):269-282.
- [41] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1983,15(4):447-453.
- [42] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis[J]. Ecology, 2012,93(4):930-938.
- [43] 齐玉春,董云社. 土壤氧化亚氮产生、排放及其影响因素[J]. 地理学报,1999,54(6):534-542.
- [44] 郑循华,金继生. 华东稻麦轮作生态系统的N₂O排放研究[J]. 应用生态学报,1997,8(5):495-499.
- [45] Wagnera D, Pfeifferb E M. Two temperature optima of methane production in a typical soil of the Elbe river marshland[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, 22(2):145-153.
- [46] 朱玫,田洪海. 大气甲烷的源和汇[J]. 环境保护科学,1996(2):5-9.
- [47] 丁维新,蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. 生态学报,2002,22(10):1672-1679.
- [48] Yao Z, Wolf B, Chen W, et al. Spatial variability of N₂O, CH₄ and CO₂, fluxes within the Xilin River catchment of Inner Mongolia, China: a soil core study[J]. Plant & Soil,2010,331(1/2):341-359.