

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季 PM_{2.5} 化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O₃ 分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘 PM_{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收规律

杨文柱^{1,2}, 焦燕^{2*}, 杨铭德², 温慧洋²

(1. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 内蒙古节水农业工程研究中心, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 内蒙古自治区环境化学重点实验室, 呼和浩特 010022)

摘要: 土壤盐碱化严重威胁土地可持续利用和温室气体排放. 本研究选择内蒙古河套灌区 3 种盐碱土壤 [S1: 盐化土壤, 电导率 (EC) 4.80 dS·m⁻¹; S2: 强度盐碱土壤, 电导率 (EC) 2.60 dS·m⁻¹; S3: 轻度盐碱土壤, 电导率 (EC) 0.74 dS·m⁻¹]. 利用静态暗箱法野外原位观测研究盐碱土壤甲烷 (CH₄) 吸收规律. 结果表明, 不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收每年均存在显著差异, 2014 年生长季 ($F=18.0, P<0.001$), 2015 年生长季 ($F=23.6, P<0.001$) 和 2016 年生长季 ($F=28.4, P<0.001$). 轻度盐碱土壤 CH₄ 累积吸收量最高, 盐化土壤累积吸收量最低. 随土壤盐碱程度加重, 土壤 CH₄ 累积吸收量降低. 轻度盐碱土壤 CH₄ 累积吸收量在 2014~2016 年 3 个生长季 (4~10 月) 分别为 150.0、119.6 和 99.9 mg·m⁻²; 重度盐碱土壤 CH₄ 累积吸收量比轻度盐碱土壤分别降低 27%、28% 和 19%; 盐化土壤 CH₄ 累积吸收量比轻度盐碱土壤分别降低 35%、35% 和 53%. 冗余分析表明, 盐碱土壤 CH₄ 吸收通量与土壤 EC 的投影在第一主成分轴正方向和反方向, 土壤 EC 越高, CH₄ 吸收通量越低. 土壤电导率 EC 是调控盐碱土壤 CH₄ 吸收的关键因子, 相关系数 r 为 -0.8809 ($P<0.01, n=9$).

关键词: 盐碱土壤; 不同盐碱程度; 碳汇; CH₄ 吸收; 电导率

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1950-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808061

CH₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia

YANG Wen-zhu^{1,2}, JIAO Yan^{2*}, YANG Ming-de², WEN Hui-yang²

(1. Water-saving Agricultural Engineering Research Center, College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, College of Chemistry and Environmental Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Soil salinization poses a great threat to sustainable land use and the limitation of greenhouse gas emissions. In this study, three saline alkali soils, saline soil [electrical conductivity (EC) 4.80 dS·m⁻¹], high saline-alkaline soil (EC 2.60 dS·m⁻¹), and low saline-alkaline soil (EC 0.74 dS·m⁻¹) in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia were selected as research plots. Field experiments were conducted to study the uptake of methane (CH₄) in the crop-growing season (April-October) for three years (2014-2016) using the static box method. There were significant differences in the soil CH₄ uptake among the soil types in 2014 ($F=18.0, P<0.001$), 2015 ($F=23.6, P<0.001$), and 2016 ($F=28.4, P<0.001$). The uptake of CH₄ by the soil decreases with increasing soil salinity. The accumulated CH₄ uptake was 150.0 mg·m⁻², 119.6 mg·m⁻², and 99.9 mg·m⁻² in the low saline-alkaline, high saline-alkaline, and saline soil in 2014, respectively. The cumulative uptake of CH₄ was 27%, 28%, and 19% lower in the high saline-alkaline soil and 35%, 35%, and 53% lower in the saline soil than in the low saline-alkaline soil in 2014, 2015, and 2016, respectively. Redundancy analysis shows that the projection of the CH₄ uptake flux and EC of saline-alkaline soil are in the positive direction, and in the opposite direction to the first principal component axis. The higher the soil EC, the lower the CH₄ uptake flux. Soil EC was found to be the key factor controlling the uptakes of CH₄, with a correlation coefficient (r) of -0.8809 ($P<0.01, n=9$).

Key words: saline-alkaline soils; different saline-alkaline; carbon sink; CH₄ uptake; electrical conductivity

大气 CH₄ 浓度在过去 200 年来, 从 715×10^{-9} 升高到 1774×10^{-9} [1]. 以前, 大多数研究集中在土壤 CH₄ 排放源上 [2-5]. 然而, 针对 CH₄ 汇的研究较少. 通气排水良好的森林, 草地和农田土壤是大气甲烷的重要汇, 甚至干旱沙漠土壤都有 CH₄ 吸收存在 [6], 占全球 CH₄ 汇的 10% [7]. 对于不同环境和管理因素, CH₄ 吸收在不同生态系统表现出很大的变化 [8, 9].

盐碱土壤是地球上广泛分布的一种土壤类型, 约占陆地总面积的 25% [10], 我国约有盐碱土壤

0.99 亿 hm², 主要分布在东北、华北、西北内陆地区以及长江以北沿海地带 [11]. 内蒙古河套灌区盐渍化面积约 24.2 万 hm², 占内蒙古盐渍化土地面积 70%, 位于灌区末端的乌拉特前旗达到 60% 以上 [12], 土壤中过量盐含量造成渗透胁迫和特定离

收稿日期: 2018-08-07; 修订日期: 2018-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41675140); 2016 内蒙古青年创新人才计划项目

作者简介: 杨文柱 (1977~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为低碳农业生产和温室气体减排, E-mail: yangwzh@imnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jiaoyan@imnu.edu.cn

子毒性(营养失衡)影响微生物细胞活动,影响土壤物理化学特性,微生物酶活性及其和土壤碳氮过程相关微生物活动^[13],进而影响土壤 CH₄ 吸收.然而,盐碱土壤对 CH₄ 消耗的报道非常有限,盐碱程度对 CH₄ 吸收的影响在土壤 CH₄ 汇中没有考虑^[14].

以前的很多研究集中在不同浓度的盐碱添加到非盐土壤对 CH₄ 吸收影响的室内培养实验中^[15, 16].然而,外源盐加入土壤对 CH₄ 吸收影响的室内培养,土壤的微生物组成没有充足时间适应盐添加而改变的环境,可能区别于野外天然盐碱土壤^[17].

本研究选择内蒙古河套灌区农业耕作区盐碱土壤,利用静态暗箱法野外原位观测盐碱土壤 CH₄ 吸收,确定不同盐碱程度土壤对 CH₄ 吸收的响应,估算不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收潜力,探寻不同盐碱程度土壤控制 CH₄ 吸收机制,对降低我国农田温室气体吸收总量估算不确定性具有十分重要的意义.

1 材料与方 法

1.1 研究地区概况

研究区位于内蒙古河套灌区最具代表性的盐碱土壤种植区——乌拉特前旗灌域,该地处于我国西

北黄河上中游干旱、半干旱地区,属于中温带大陆性季风气候.历年平均日照时数为3 202 h,年平均气温在 3.6 ~ 7.3℃ 范围内变化,最高和最低极端温度分别为 38.9 和 -36.5℃,无霜期每年 120 d 左右,年平均降水量 200 ~ 260 mm,年平均蒸发量 1 900 ~ 2 300 mm.

该研究选择临近的不同盐碱程度土壤农田作为研究地(S1:盐化土壤,EC 4.80 dS·m⁻¹,盐含量 1.69%; S2:强度盐碱土壤,EC 2.60 dS·m⁻¹,盐含量 0.83%; S3:轻度盐碱土壤,EC 0.74 dS·m⁻¹,盐含量 0.12%),土壤盐化分级标准见表 1^[16],S1、S2 和 S3 研究地之间距离大约 500 m,土壤类型和坡度相同,总占地面积约 5 hm²,每个研究地设置 3 个重复,每个重复占地面积 100 m × 100 m,土壤盐含量和理化特性见表 2 和表 3.

农田每年 6 月耕种,10 月收割,每年种植作物前采用机械犁地.施肥种类:基肥施入磷酸二铵,追肥施入尿素.肥料施用量,向日葵种植前基肥施入总氮量 100 kg·hm⁻²,追肥施入总氮量 200 kg·hm⁻².病虫害化学防治、P、K 肥施用量以及其他田间管理措施与当地农田生产的典型管理措施相一致,各处理相同.

表 1 土壤盐化分级指标^[18]

Table 1 Soil salinization classification index

盐分分类及适用地区	土壤含盐的质量分数 ¹⁾ /%					盐渍类型 ²⁾
	非盐化	轻度	中度	强度	盐土	
滨海、半湿润、半干旱、干旱区	<0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6(1.0)	>0.6(1.0)	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻ 、Cl ⁻ 、Cl ⁻ - SO ₄ ²⁻ 、SO ₄ ²⁻ - Cl ⁻
半荒漠及荒漠区	<0.2	0.2 ~ 0.3(0.4)	0.3 ~ 0.5(0.6)	0.5(0.6) ~ 1.0(2.0)	1.10(2.0)	SO ₄ ²⁻ 、Cl ⁻ - SO ₄ ²⁻ 、SO ₄ ²⁻ - Cl ⁻

1) 有的地区土壤含盐的质量分数用括号中的数值; 2) “+”代表两种盐含量都高,“-”代表一种盐含量高,另一种盐含量低

表 2 实验区不同盐碱程度土壤含盐的质量分数/%

Table 2 Soil salt content in the different soils at the study site/%

土壤	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	总含盐的质量分数
S1:盐化土壤	0.015	0.400	0.073	0.054	0.740	0.000	0.051	0.360	1.690
S2:强度盐碱土壤	0.006	0.120	0.083	0.045	0.390	0.000	0.048	0.140	0.830
S3:轻度盐碱土壤	0.002	0.009	0.014	0.005 6	0.013	0.000	0.064	0.010	0.120

表 3 不同盐碱程度土壤理化特性¹⁾

Table 3 Physical and chemical properties of the different saline-alkaline soils

土壤类型	ω(TP) /g·kg ⁻¹	ω(SOC) /g·kg ⁻¹	ω(TN) /g·kg ⁻¹	砂粒/%	黏粒/%
S1	1.10 ± 0.09a	14.12 ± 1.16a	1.70 ± 0.05ab	51.12	20.31
S2	1.16 ± 0.01a	15.38 ± 0.83a	2.14 ± 0.18a	56.25	26.34
S3	0.78 ± 0.03b	10.31 ± 0.28b	1.39 ± 0.06b	63.36	32.06

1) 同列不同小写字母表示不同盐碱程度土壤间差异显著(P < 0.05)

1.2 气样采集与测定

2014 年 4 月 ~ 2016 年 10 月,利用静态暗箱法进行农田野外原位气体采集.箱子长宽高 0.5 m ×

0.5 m × 0.5 m. 向日葵田行距 50 cm,株距 30 cm. 采样箱罩在行上,箱体内部没有植物.每次采集时间上午 07:00 ~ 10:00,用连接三通的 100 mL 注射器

从采样箱的采样口抽气约 100 mL, 每个气体采集时间间隔 5 min (0、5、10、15 和 20 min), 每个盐碱程度土壤采集时间 20 min, 7~9 月每 10 d 采集 1 次气体, 4 月和 10 月每月采集 2 次, 每个重复设置 3 个固定采集样品点. 气体应用气相色谱仪 (Agilent 6820D 气相色谱仪, 美国)^[17] 进行测定分析. 通过对每个采集箱的 5 个气体 CH₄ 混合比和相对应的采集间隔时间 (0、5、10、15 和 20 min) 进行直线回归, 可得到土壤 CH₄ 吸收速率. 根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度和 CH₄ 分子量, 得到单位面积 CH₄ 吸收通量^[19].

1.3 土壤采集和测定

采集气体同时利用内径 5 cm、高 100 cm 土钻采集土壤. 7~9 月每 10 d 采集 1 次, 4 月和 10 月每月采集 2 次. 不同盐碱程度土壤每个重复应用“S”形取样法, 选择 10 个取土点, 采集的土壤均匀混合, 装入密封袋, 放入 4℃ 冰箱, 供土壤有机碳、全氮、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 等指标测定. 土壤温度: 温度测定仪 (哈纳 HI98501 温度测定仪, 意大利); 水分: TDR 水分测定仪 (SPectrum TDR300 土壤水分测定仪, 美国); 土壤有机碳 (SOC): TOC 仪测定 (Picarro TOC-CRDS, 美国); 土壤全氮 (TN)、土壤铵态氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N): 流动分析仪测定 (Futura Alliance 连续流动分析仪, 法国); 土壤 pH: 电位计法; EC: 复合电极法; 土壤密度 (ρ): 环刀法; 土壤质地: 比重计速测法; 土壤盐分: 碳酸根 (CO₃²⁻)、重碳酸根离子 (HCO₃⁻) 应用电位滴定法测定; 氯离子 (Cl⁻)、硫酸根离子 (SO₄²⁻)、钾离子 (K⁺)、钠离子 (Na⁺)、钙离子 (Ca²⁺)、镁离子 (Mg²⁺) 利用电感耦合等离子体质谱仪测定 (ICAP-RQ 电感耦合等离子体质谱仪, 德国).

1.4 数据计算方法

CH₄ 吸收通量和 CH₄ 吸收速率计算公式分别如式 (1) ~ (2) 所示^[20]

$$K = H \times \frac{(M_c P T_0)}{(V_0 P_0 T)} \times (dc/dt) \times 1000 \quad (1)$$

式中, K 为 CH₄ 气体吸收通量, 单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; H 为静态暗箱高度, 单位为 cm; M_c 为温室气体的摩尔质量, 单位为 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; V_0 为标准状态下 CH₄ 的摩尔体积, 单位为 $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$; P_0 和 T_0 分别为标准状态下的大气压强和温度, 单位分别为 Pa 和 ℃; P 和 T 分别为采样点的实际大气压强和温度, 单位分别为 Pa 和 ℃; dc/dt 为采样时 CH₄ 气体浓度随时间变化的斜率, 其中 c 的单位为 $\times 10^{-6}$; t 的单位为 h.

$$P = (dc/dt) \times (V_h/W_s) \times (M_r/M_v) \times [T_{st}/(T_{st} + T)] \quad (2)$$

式中, P 为 CH₄ 吸收速率, $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; dc/dt 为单位时间培养瓶内 CH₄ 质量浓度的变化量; V_h 指培养瓶内部空间的体积, mL; W_s 为土样的质量, g; M_r 表示 CH₄ 的相对分子质量, 16.04; M_v 为标准状态下 1 mol 气体的体积, 22.4 L; T 为培养温度, ℃; T_{st} 为标准温度, 273℃.

1.5 数据统计分析

数据处理和制图采用 Sigmaplot 13、OriginPro 8 和 Excel 2010 软件, 单因素方差分析 (AVNOA) 利用 SPSS 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 分析 CH₄ 吸收差异显著性, 相关分析和逐步回归分析用于土壤特性对 CH₄ 吸收影响的研究.

2 结果与分析

2.1 大气温度和降水变化

2014~2016 年的每年 4~11 月, 大气月平均温度呈现基本一致的变化趋势, 4 月气温开始逐渐升高, 7~8 月大气温度达到最高值, 随后开始缓慢降低. 3a 中大气降水存在差异, 2014 年降水量最多, 降水频率最高, 2016 年降水量最少和降雨频率最低 (图 1).

2.2 不同盐碱程度土壤 CH₄ 季节性吸收通量和累积吸收量

2014~2016 年 3 个作物生长季, 3 种不同盐碱程度土壤 (S1、S2 和 S3) CH₄ 吸收通量季节性变化差异明显, 盐碱土壤 CH₄ 吸收通量均值 $0.001 \sim 0.108 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH₄ 通量是负值, 表明盐碱土壤是大气 CH₄ 的汇. 随作物生长发育, 3 种不同盐碱程度土壤在 7 月和 8 月均出现明显吸收峰, 2014 年最大值 $0.271 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.201 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 2015 年 $0.199 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.234 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 2016 年 $0.292 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.261 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 而在 4~6 月以及 9~11 月 CH₄ 吸收通量均较小. 盐化土壤 S1 变化趋势平缓, 无明显吸收峰出现, 2014~2016 年 CH₄ 吸收最大值 0.058 、 0.118 和 $0.113 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 整个生长季 S1 盐化土壤 CH₄ 吸收通量最低; S3 轻度盐碱土壤 CH₄ 吸收通量最高 (图 2).

S1、S2 和 S3 土壤 CH₄ 累积吸收量 2014 年作物生长季 ($F=18.0$, $P<0.001$), 2015 年作物生长季 ($F=23.6$, $P<0.001$) 和 2016 年作物生长季 ($F=28.4$, $P<0.001$) 均存在显著差异. 轻度盐碱土壤 S3 的 CH₄ 累积吸收量最高, 盐化土壤 S1 的 CH₄ 累积吸收量最低. 随土壤盐碱程度增加, CH₄ 累积

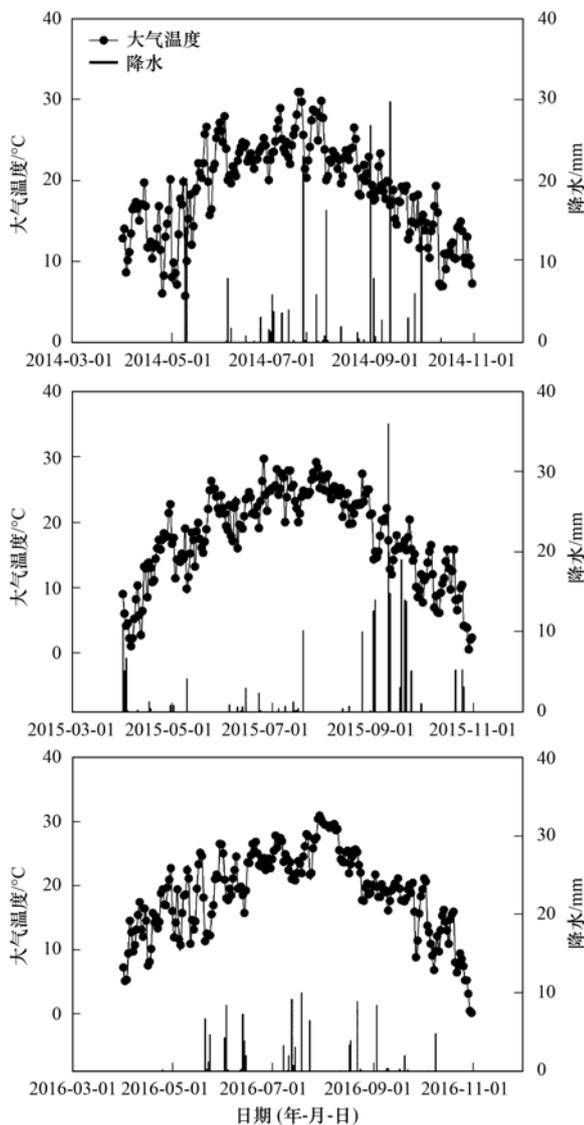


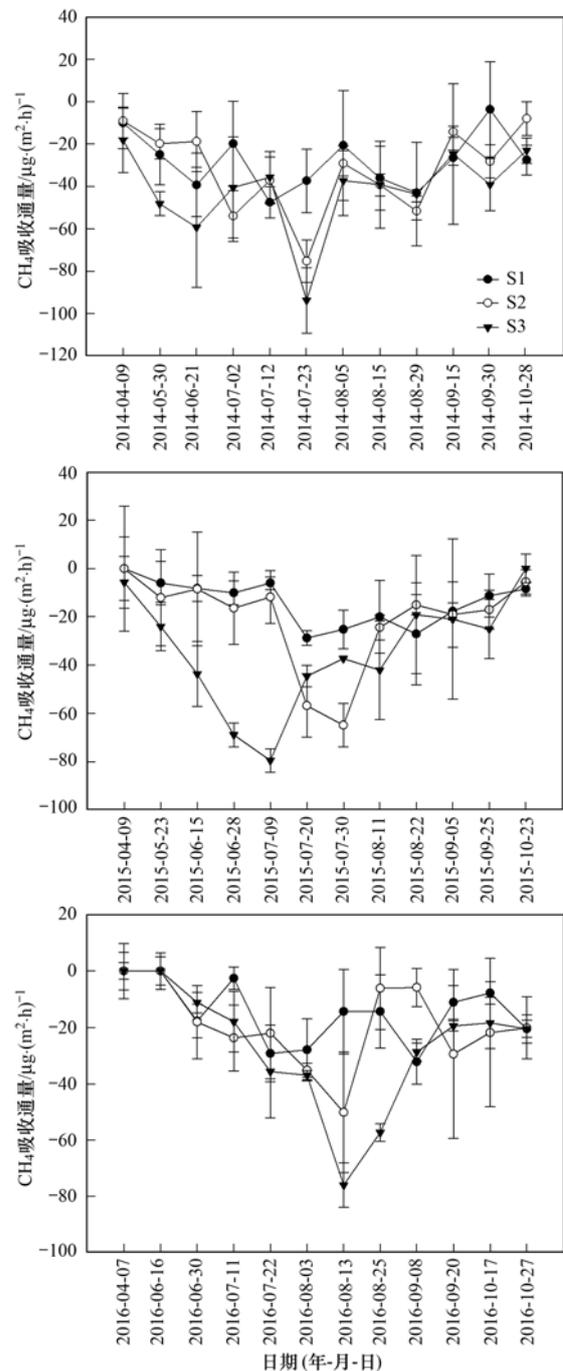
图 1 2014 ~ 2016 年大气温度和降水变化量

Fig. 1 Variations in the temperature and precipitation for 2014, 2015, and 2016

吸收量降低. 2014、2015 和 2016 年作物生长季(4 ~ 10 月)轻度盐碱土壤累积吸收量分别为 150.0、119.6 和 99.9 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 强度盐碱土壤 CH₄ 累积吸收量与轻度盐碱土壤比较分别降低 27%、28% 和 19%; 盐化土壤与轻度盐碱土壤相比, CH₄ 累积吸收量分别降低 35%、35% 和 53%. 3 种不同盐碱程度土壤年际 CH₄ 累积吸收量表现为 2014 年 > 2015 年 > 2016 年, 2014 年不同盐碱程度土壤 CH₄ 累积吸收量最高(图 3).

2.3 土壤 CH₄ 吸收通量与土壤电导率以及环境因子冗余分析

利用 Canoco4.5 for windows 软件的除趋势对应分析(detrended correspondence, DCA), 采用线性拟合模型, 选择冗余分析法, 以 CH₄ 吸收通量的矢量箭头为轴可将样本分为 2014 年 S1、S2 和 S3 土壤



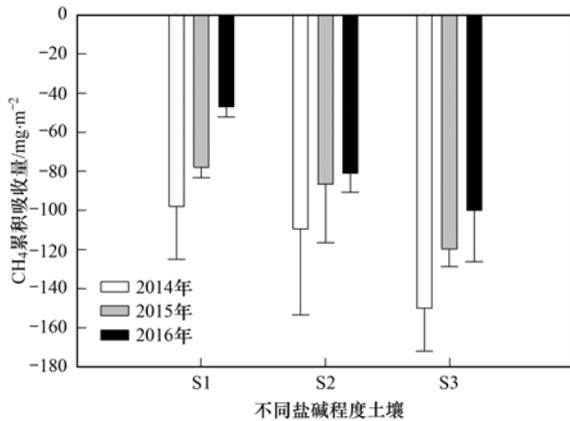
S1: 盐化土壤; S2: 强度盐碱土壤;

S3: 轻度盐碱土壤, 下同; 竖杠代表标准差

图 2 2014 ~ 2016 年不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收通量

Fig. 2 Changes in the CH₄ uptake fluxes in S1, S2, and S3 from 2014 to 2016

为 1、2 和 3; 2015 年 S1、S2 和 S3 土壤为 4、5 和 6; 2016 年 S1、S2 和 S3 土壤为 7、8 和 9. 盐碱土壤 CH₄ 吸收通量与电导率的投影在第一主成分轴的正方向和反方向, 盐碱土壤电导率越大, CH₄ 吸收通量越小. 第一主成分轴(X 轴)和第二主成分轴(Y 轴), 两个主成分轴共解释环境变量的 98.9%. 由 Monte Carlo 法检验后表明: 盐碱土壤电导率 EC 与土壤 CH₄ 呈负相关, Pearson 相关系数 r 为



不同的小写字母代表差异显著, $P < 0.05$
图 3 2014 ~ 2016 年作物生长季盐碱土壤不同盐碱程度 CH₄ 累积吸收量

Fig. 3 Cumulative CH₄ uptake of the saline-alkali soils during the growing seasons in 2014, 2015, and 2016

-0.8809 ($P < 0.01, n = 9$), 盐碱土壤电导率 EC 越高, CH₄ 吸收速率越低. 土壤温度 (T)、水分含量、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 与土壤 CH₄ 吸收无显著相关

性 ($P > 0.05$), 见表 4 和图 4.

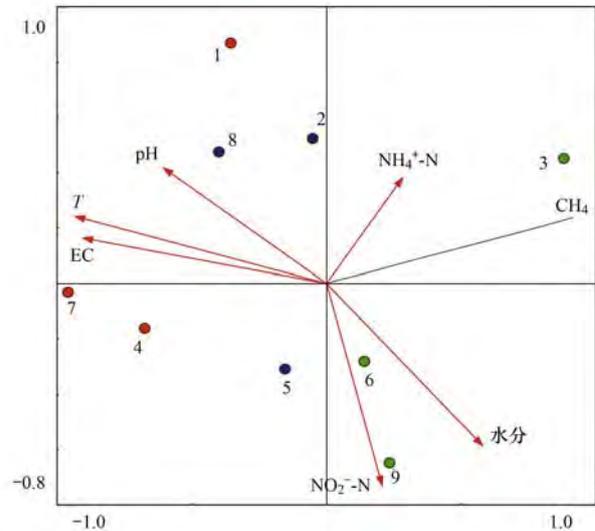


图 4 盐碱土壤 CH₄ 吸收和环境因子冗余分析

Fig. 4 Redundancy analyses of the correlation between the CH₄ uptake and environmental factors

表 4 不同盐碱程度土壤基本理化特性¹⁾

Table 4 Physiochemical properties of the three soils with different saline-alkaline content

年份	土壤类型	pH	电导率 / $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	土壤水分 /%	土壤温度 / $^{\circ}\text{C}$	NH ₄ ⁺ -N / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NO ₃ ⁻ -N / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
2014	S1	8.20 ± 0.41	0.57 ± 0.15	17.46 ± 2.01	15.79 ± 2.01	11.82 ± 0.12	8.71 ± 1.56
	S2	8.20 ± 0.12	2.82 ± 0.09	15.96 ± 1.78	17.57 ± 1.78	9.97 ± 0.09	7.85 ± 1.78
	S3	8.73 ± 0.53	3.74 ± 0.11	11.61 ± 1.12	18.64 ± 1.65	7.47 ± 0.26	1.71 ± 0.03
2015	S1	8.10 ± 0.51	0.91 ± 0.28	17.60 ± 1.16	16.44 ± 1.16	10.64 ± 0.17	34.24 ± 2.02
	S2	8.24 ± 0.76	2.38 ± 0.35	16.02 ± 1.21	17.55 ± 1.21	9.39 ± 0.16	26.25 ± 2.85
	S3	8.48 ± 0.35	4.96 ± 0.12	14.14 ± 1.36	18.00 ± 1.36	4.89 ± 0.18	12.64 ± 1.68
2016	S1	8.19 ± 0.39	1.90 ± 0.08	19.99 ± 1.29	16.76 ± 1.29	8.00 ± 0.30	17.33 ± 1.69
	S2	8.23 ± 0.48	3.30 ± 0.03	16.88 ± 1.18	18.38 ± 1.18	5.35 ± 0.22	17.22 ± 2.36
	S3	8.49 ± 0.60	5.70 ± 0.09	15.04 ± 1.11	19.69 ± 1.11	4.83 ± 0.11	8.00 ± 0.82

1) 数值为年均值 ± SD ($n = 3$)

3 讨论

3.1 不同盐碱程度土壤对 CH₄ 吸收通量变化的影响

2014 ~ 2016 年, 河套灌区 3 种不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收通量均值 $31.76 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 与全球大多数土壤 CH₄ 吸收研究结果接近. 内蒙古荒漠草原平均吸收速率 $46.4 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ^[21], 荒漠土壤在 $10 \sim 38 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间^[6]. 生态系统和区域环境的改变影响 CH₄ 吸收^[22, 23]. 3 种不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收通量季节变化规律为 7 ~ 8 月出现吸收高峰(图 2). S₁、S₂ 和 S₃ 中土壤水分、温度季节性变化趋势与 CH₄ 吸收季节性变化规律一致. 温度和水分含量较高的夏季(7 ~ 8 月), CH₄ 吸收通量较大. 8 月, 3 种盐碱土壤温度和水分均达到最大, 温度分别为: 29.3、25.0 和 24.7 $^{\circ}\text{C}$; 土壤含水

的质量分数分别为 25%、28% 和 29%. 然而, 4 ~ 6 月以及 9 ~ 11 月 CH₄ 吸收通量较小(图 2). 这一结论与 Unteregelsbacher 等^[24] 在高山森林盐土中测得 CH₄ 吸收通量季节变化规律一致, 均表现为夏季最高, 也与其他干旱半干旱盐碱土壤分析结论一致^[17, 25]. 土壤温度升高不但加快了 CH₄ 吸收的酶催化活性, 也增加了土壤水分蒸发损失总量, 提高土壤气体与大气交换的孔隙度, 进而提高了土壤 CH₄ 吸收通量.

3.2 不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收潜力

3 个生长季, 不同盐碱程度土壤 S₁、S₂ 和 S₃ 的 CH₄ 累积吸收量表现为: 轻度盐化土壤(S₃) > 强度盐化土壤(S₂) > 盐化土壤(S₁), 轻度盐碱土壤是 CH₄ 的汇, 本研究结果和 Zhang 等^[14] 研究同质地不同盐渍化土壤的结果一致, 轻度盐化土壤有较好

的 CH₄ 吸收潜力. 随着土壤盐碱程度增加, 盐含量高的土壤, CH₄ 吸收速率降低, 盐化土壤是 CH₄ 的源. 本研究结果和 Silva 等^[26] 以及 Zhang 等^[27] 的研究发现一致, 黄河三角洲盐土是 CH₄ 的源. Nancy 等^[28] 研究墨西哥湖区盐碱土壤 (EC = 85.1 dS·m⁻¹) 表明, 该区域 CH₄ 吸收速率是中国黄河流域盐碱土壤 (EC = 3.2 dS·m⁻¹) 的 1/900, 较高的盐含量强烈抑制 CH₄ 吸收. 在美国盐沼土壤发现, CH₄ 通量与土壤含盐量存在显著的负相关关系^[29]. 盐含量是控制盐碱土壤 CH₄ 吸收盐分抑制 CH₄ 氧化^[30]; 在培养实验中, 无盐土壤添加盐, 特别是氯化盐, 强烈抑制 CH₄ 吸收^[15, 16]; 甲烷氧化菌对氧化大气中的 CH₄ 扮演着重要作用, 其活性直接影响由土壤进入大气的 CH₄ 量及土壤中的 CH₄ 氧化速率^[31, 32]. 盐含量是影响土壤微生物活性的重要因素之一, 土壤含盐量与 CH₄ 氧化菌群落结构(包括种类、丰度、多样性以及比活性等因素) 高度相关^[33]. 本研究组的杨铭德等^[34] 设置的室内培养实验, 利用该野外原位观测的不同盐碱程度土壤测定 CH₄ 吸收和甲烷氧化菌比活性显示, 轻度盐化土壤甲烷吸收最高, 盐土甲烷吸收最低. 土壤 CH₄ 吸收与土壤甲烷氧化菌比活性显著正相关. 盐碱土壤电导率(EC) 和土壤甲烷氧化菌比活性显著负相关. EC 高的盐土, 土壤甲烷氧化菌比活性低, CH₄ 吸收降低. 高盐土壤抑制 CH₄ 吸收, 由于高 EC 土壤丰度最高的 *Methylocella* 甲烷氧化菌的比活性低, CH₄ 氧化菌种群的另外一种 pMMO 酶在 EC 高的土壤停止表达, 其氧化 CH₄ 的活性低^[35].

3.3 不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收估算

土壤盐渍化影响盐碱土壤 CH₄ 吸收汇. 根据整个生长季(4 月末至 10 月末) 不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收量估算, 采用 3 年 CH₄ 吸收速率均值与时间及分布面积相乘计算得出. 内蒙古河套灌区盐碱土壤面积 24.2 × 10⁴ hm², 其中, 轻度盐碱土壤面积 13.0 × 10⁴ hm²; 强度盐碱土壤面积 7.6 × 10⁴ hm²; 盐化土壤面积 3.6 × 10⁴ hm²^[36]. S1 土壤 CH₄ 吸收估算值(3 a 均值) 约为 0.59 × 10³ t, S2 土壤 CH₄ 吸收约为 0.73 × 10³ t, S3 土壤 CH₄ 吸收约为 0.93 × 10³ t, 其中 S1 土壤 CH₄ 吸收量占全国年 CH₄ 估计吸收量 (2.78 × 10⁶ t)^[22] 的 0.21%, S2 占 0.27%, S3 占 0.35%. 这些比值与周晓兵等^[37] 关于新疆古尔班通古特沙漠土壤生长季 CH₄ 吸收占全国年吸收总量 0.23% 的报道接近. 河套灌区盐碱土壤温室气体占比数据精确估算还需要盐碱土壤更多点位数据加以验证. 从吸收总量来看, 合理控盐

是提高农业盐碱土壤 CH₄ 累积吸收的有效措施.

4 结论

(1) 河套灌区 3 种不同盐碱程度土壤 CH₄ 累积吸收量存在显著差异: 轻度盐碱土壤 > 强度盐碱土壤 > 盐土. 轻度盐化土壤是重要的 CH₄ 汇.

(2) 河套灌区不同盐碱程度土壤随盐碱程度加重, CH₄ 吸收速率降低. 强度盐碱土壤 CH₄ 吸收比轻度盐碱土壤减少 25% (3 a 均值), 盐土 CH₄ 吸收比轻度盐碱土壤减少 41% (3 a 均值).

(3) 土壤 EC 是调控不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收的关键因子 ($r = -0.8809$, $P < 0.01$, $n = 9$), EC 越高的盐碱土壤, CH₄ 吸收越少.

致谢: 在资料收集和野外原位观测实验过程中得到内蒙古河套灌区乌拉特前旗灌域管理局的协助. 感谢实验室的同学们在盐碱土壤农田温室气体排放野外观测期间的辛勤付出.

参考文献:

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2006, 27(2): 207-213.
- [3] Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, et al. Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a central Sichuan Hilly Area of Southwest China [J]. Environmental Science, 2006, 27(2): 207-213.
- [4] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH₄ 排放的影响 [J]. 环境科学, 2005, 26(3): 21-24.
- [5] Jiao Y, Huang Y, Zong L G, et al. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on CH₄ emission from different paddy soils [J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 21-24.
- [6] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响 [J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
- [7] Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy [J]. Environmental Science, 2003, 24(4): 7-12.
- [8] 胡正华, 凌慧, 陈书涛, 等. UV-B 增强对稻田呼吸速率、CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3018-3022.
- [9] Hu Z H, Ling H, Chen S T, et al. Impacts of enhanced UV-B radiation on respiration rate, CH₄ and N₂O emission fluxes from rice paddy [J]. Environmental Science, 2011, 32(10): 3018-3022.
- [10] Striegl R G, McConnaughey T A, Thorstenson O C, et al. Consumption of atmospheric methane by desert soils [J]. Nature, 1992, 357(6374): 145-147.
- [11] Lowe D C. A green source of surprise [J]. Nature, 2006, 439

- (7073): 148-149.
- [8] 王跃思, 纪宝明, 黄耀, 等. 农垦与放牧对内蒙古草原 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 [J]. 环境科学, 2001, **22**(6): 7-13.
Wang Y S, Ji B M, Huang Y, *et al.* Effects of grazing and cultivating on emission of nitrous oxide, carbon dioxide and uptake of methane from grasslands [J]. Environmental Science, 2001, **22**(6): 7-13.
- [9] 张秀君, 徐慧, 陈冠雄. 影响森林土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收的主要因素 [J]. 环境科学, 2002, **23**(5): 8-12.
Zhang X J, Xu H, Chen G X. Important factors controlling rates of N_2O emission and CH_4 oxidation from forest soil [J]. Environmental Science, 2002, **23**(5): 8-12.
- [10] Pinaras V, Tsihrintzis V A, Petalas C, *et al.* Soil salinization in the agricultural lands of Rhodope District, northeastern Greece [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **166**(1-4): 79-94.
- [11] 徐恒刚. 中国盐生植被及盐渍化生态治理 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004, 11.
- [12] 刘全明, 成秋明, 王学, 等. 河套灌区土壤盐渍化微波雷达反演 [J]. 农业工程学报, 2016, **32**(16): 109-114.
Liu Q M, Cheng Q M, Wang X, *et al.* Soil salinity inversion in Hetao Irrigation district using microwave radar [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(16): 109-114.
- [13] Pathak H, Rao D L N. Carbon and Nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**(6): 695-702.
- [14] Zhang J F, Li Z J, Ning T Y, *et al.* Methane uptake in salt-affected soils shows low sensitivity to salt addition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(7): 1434-1439.
- [15] King G M, Schnell S. Effects of ammonium and non-ammonium salt additions on methane oxidation by *Methylosinus trichosporium* OB3b and Maine forest soils [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(1): 253-257.
- [16] Whalen S C. Influence of N and non-N salts on atmospheric methane oxidation by upland boreal forest and tundra soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **31**(3-4): 279-287.
- [17] Hart S C. Potential impacts of climate change on nitrogen transformations and greenhouse gas fluxes in forests; A soil transfer study [J]. Global Change Biology, 2006, **12**(6): 1032-1046.
- [18] 王遵亲. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842-844.
- [20] Osudar R, Matoušů A, Alawi M, *et al.* Environmental factors affecting methane distribution and bacterial methane oxidation in the German Bight (North Sea) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, **160**: 10-21.
- [21] Wang Z W, Hao X Y, Shan D, *et al.* Influence of increasing temperature and nitrogen input on greenhouse gas emissions from a desert steppe soil in Inner Mongolia [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, **57**(4): 508-518.
- [22] Zhuang Q L, Chen M, Xu K, *et al.* Response of global soil consumption of atmospheric methane to changes in atmospheric climate and nitrogen deposition [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2013, **27**(3): 650-663.
- [23] Wang Y F, Chen H, Zhu Q A, *et al.* Soil methane uptake by grasslands and forests in China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **74**: 70-81.
- [24] Unteregelsbacher S, Gasche R, Lipp L, *et al.* Increased methane uptake but unchanged nitrous oxide flux in montane grasslands under simulated climate change conditions [J]. European Journal of Soil Science, 2013, **64**(5): 586-596.
- [25] Sjögersten S, Wookey P A. Spatio-temporal variability and environmental controls of methane fluxes at the forest-tundra ecotone in the fennoscandian mountains [J]. Global Change Biology, 2002, **8**(9): 885-894.
- [26] Silva N S, Encinas C V, Marsch R, *et al.* Aerobic methane-oxidizing communities in saline alkaline and arable soils [J]. Journal of Biotechnology, 2014, **185**(S1): S59.
- [27] Zhang L H, Song L P, Zhang L W, *et al.* Diurnal dynamics of CH_4 , CO_2 and N_2O fluxes in the saline-alkaline soils of the Yellow River Delta, China [J]. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology, 2015, **149**(4): 797-805.
- [28] Serrano-Silva N, Valenzuela-Encinas C, Marsch R, *et al.* Changes in methane oxidation activity and methanotrophic community composition in saline alkaline soils [J]. Extremophiles, 2014, **18**(3): 561-571.
- [29] Bartlett K B, Bartlett D S, Harriss R C, *et al.* Methane emissions along a salt marsh salinity gradient [J]. Biogeochemistry, 1987, **4**(3): 183-202.
- [30] Saari A, Smolander A, Martikainen P J. Methane consumption in a frequently nitrogen-fertilized and limed spruce forest soil after clear-cutting [J]. Soil Use and Management, 2004, **20**(1): 65-73.
- [31] 郑聚锋, 张平穷, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化 [J]. 生态学报, 2008, **28**(10): 4865-4872.
Zheng J F, Zhang P J, Pan G X, *et al.* Effect of long-term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(10): 4865-4872.
- [32] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review [J]. European Journal of Soil Biology, 2001, **7**(1): 25-35.
- [33] Valenzuela-Encinas C, Alcántara-Hernández R J, Estrada-Alvarado I, *et al.* The archaeal diversity and population in a drained alkaline saline soil of the former lake Texcoco (Mexico) [J]. Geomicrobiology Journal, 2012, **29**(1): 18-22.
- [34] 杨铭德, 焦燕, 李新, 等. 基于实时荧光定量 PCR 技术对不同盐碱程度土壤甲烷氧化菌比活性的研究 [J]. 生态环境学报, 2015, **24**(5): 797-803.
Yang M D, Jiao Y, Li X, *et al.* Specific activity of Methanotrophs in saline-alkaline soils retrieved from a fluorescent quantitative real-time PCR technique [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, **24**(5): 797-803.
- [35] 邓永翠. 青藏高原湿地好氧甲烷氧化菌的群落多样性及活性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [36] 李新, 焦燕, 代钢, 等. 内蒙古河套灌区不同盐碱程度的土壤细菌群落多样性 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 249-260.
Li X, Jiao Y, Dai G, *et al.* Soil bacterial community diversity under different degrees of saline-alkaline in the Hetao Area of Inner Mongolia [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 249-260.
- [37] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 等. 新疆古尔班通古特沙漠土壤 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 通量及其对氮沉降增加的响应 [J]. 植物生态学报, 2017, **41**(3): 290-300.
Zhou X B, Zhang Y M, Tao Y, *et al.* Effluxes of nitrous oxide, methane and carbon dioxide and their responses to increasing nitrogen deposition in the Gurbantünggüt Desert of Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, **41**(3): 290-300.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)