

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 邱孟德, 邓代永, 余乐洵, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH₄ 通量特征及影响因素研究

姜欢欢^{1,2}, 孙志高^{1*}, 王玲玲^{1,2}, 牟晓杰^{1,2,3}, 孙万龙^{1,2}, 宋红丽^{1,2}, 孙文广¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程重点实验室, 山东省海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 2009年秋季(9、10月), 运用静态暗箱-气相色谱法对黄河口滨岸潮滩湿地系统的 CH₄ 排放通量进行了观测, 并对影响 CH₄ 通量特征的关键因子进行了识别. 结果表明, 在空间上, 秋季高潮滩、中潮滩、低潮滩和光滩的 CH₄ 通量范围分别为 -0.206~1.264、-0.197~0.431、-0.125~0.659、-0.742~1.767 mg·(m²·h)⁻¹, 均值为 0.089、0.038、0.197 和 0.169 mg·(m²·h)⁻¹, 均表现为 CH₄ 排放源, 但源功能整体表现为低潮滩 > 光滩 > 高潮滩 > 中潮滩; 在时间上, 9、10月的 CH₄ 排放通量范围分别为 -0.444~1.767、-0.742~1.264 mg·(m²·h)⁻¹, 均值为 0.218、0.028 mg·(m²·h)⁻¹, 除9月高潮滩表现为 CH₄ 弱汇外, 其它潮滩的 CH₄ 通量均明显高于10月. 研究发现, 黄河口滨岸潮滩湿地环境因素变化比较复杂, CH₄ 排放通量受多重因素控制. 不同潮滩湿地在9、10月 CH₄ 排放通量的差异可能主要与温度(特别是气温)以及植被生长状况的差异有关, 而水盐条件和潮汐状况对潮滩湿地系统 CH₄ 通量特征的影响也不容忽视.

关键词: 潮滩湿地; 甲烷; 通量特征; 影响因素; 黄河口; 秋季

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0565-09

Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn

JIANG Huan-huan^{1,2}, SUN Zhi-gao¹, WANG Ling-ling^{1,2}, MOU Xiao-jie^{1,2,3}, SUN Wan-long^{1,2}, SONG Hong-li^{1,2}, SUN Wen-guang¹

(1. Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: The characteristics of methane (CH₄) fluxes from tidal wetlands of the Yellow River estuary were observed *in situ* with static-chamber and GC methods in September and October 2009, and the key factors affecting CH₄ fluxes were discussed. From the aspect of space, the CH₄ flux ranges in high tidal wetland, middle tidal wetland, low tidal wetland, bare flat are -0.206-1.264, -0.197-0.431, -0.125-0.659 and -0.742-1.767 mg·(m²·h)⁻¹, the day average fluxes are 0.089, 0.038, 0.197 and 0.169 mg·(m²·h)⁻¹, respectively, indicating that the tidal wetlands are the sources of CH₄ and the source function of CH₄ differed among the four study sites, in the order of low tidal wetland > bare flat > high tidal wetland > middle tidal wetland. From the aspect of time, the ranges of CH₄ fluxes from the tidal wetland ecosystems are -0.444-1.767 and -0.742-1.264 mg·(m²·h)⁻¹, and the day average fluxes are 0.218 and 0.028 mg·(m²·h)⁻¹ in September and October, respectively. The CH₄ fluxes in each tidal wetland in September are higher than those in October except that the high tidal wetland acts as weak sink in September. Further studies indicate that the changes of environmental factors in the Yellow River estuary are complicated, and the CH₄ fluxes are affected by multiple factors. The differences of CH₄ fluxes characteristics among different tidal wetlands in autumn are probably related to temperature (especially atmospheric temperature) and vegetation growth status, while the effects of water or salinity condition and tide status on the CH₄ flux characteristics might not be ignored.

Key words: tidal wetland; methane; flux characteristic; controlling factor; Yellow River estuary; autumn

大气中 CO₂、CH₄ 等温室气体浓度升高导致的全球气候变化是人类共同关注的全球环境问题之

一. CH₄ 作为仅次于 CO₂ 的重要温室气体, 其对全球气候变暖的增温贡献已达 15%^[1,2]. 全球大气中

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40803023, 41171424); 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室基金项目(GCMAC1002); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05030404-2); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2010DZ001); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223)

作者简介: 姜欢欢(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学, E-mail: hhjiang13@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zgusun@yic.ac.cn

的 CH_4 含量(体积分数)值已从工业化前约 715×10^{-9} 增加到 20 世纪 90 年代初期的 1732×10^{-9} , 并在 2005 年达到 1774×10^{-9} , 已远远超过了根据冰芯记录得到的 65 万年以来含量的自然变化范围 ($320 \times 10^{-9} \sim 790 \times 10^{-9}$)^[3], 其对于全球变暖的影响日益成为各国政府普遍关注的科学问题. 因此, 研究 CH_4 的“源/汇”功能及其对全球变暖的影响有重要意义.

湿地作为具有多种独特功能的生态系统, 是 CH_4 最重要的排放源. 据统计, 全球湿地 CH_4 年排放估计值为 $100 \sim 200 \text{ Tg}$ ^[4], 占全球年 CH_4 排放量的 20% 左右^[5]. 我国湿地面积约有 6594 万 hm^2 , 占世界湿地面积的 10%, 位居亚洲第一位, 世界第四位. 目前国内学者对 CH_4 排放的研究主要集中在人工湿地——水稻田的探讨上^[6~8], 对自然湿地的研究也有较多涉及, 但这些研究主要集中于三江平原沼泽湿地^[9,10]、若尔盖高原湿地^[11,12]、闽江口湿地^[13~15]、长江口滨岸潮滩湿地^[16,17] 和南方红树林沼泽^[18,19] 等相关探讨上. 黄河三角洲为我国暖温带保存最完整、最广阔和最年轻的湿地生态系统, 在北方河口湿地中具有代表性. 目前, 国内对黄河口滨海湿地的研究主要集中在湿地生物多样性及保护^[20,21]、湿地环境演变与退化^[22]、湿地生态系统恢复^[23] 和湿地生态价值评价^[24] 等方面, 对生物地球化学的研究还比较薄弱, 而对温室气体的排放规律研究还鲜有报道. 鉴于此, 笔者于 2009 年秋季(9、10 月)植物生长末期对黄河口潮滩湿地的 CH_4 通量特征进行了初步研究, 目的在于探讨不同潮滩湿地系统 CH_4 的通量特征差异, 并识别影响其通量特征的关键因子, 以期评估黄河三角洲滨海湿地生态系统 CH_4 排放对大气环境的影响提供科学依据, 也为该区滨海湿地生物地球化学的相关研究提供基础数据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于山东省黄河三角洲国家级自然保护区, 试验于 2009 年 9~10 月在今黄河入海口北部滨海潮滩湿地典型试验区内进行. 黄河三角洲国家级自然保护区 ($37^{\circ}40'N \sim 38^{\circ}10'N$, $118^{\circ}41'E \sim 119^{\circ}16'E$) 位于东营市境内, 地处渤海之滨的黄河口滨岸潮滩湿地由黄河携带大量泥沙在入海口处沉积所形成. 该保护区于 1992 年经国家林业局批准建立, 总面积为 15.3 万 hm^2 , 是全国最大的河口三角洲自然保护区, 在世界范围河口湿地生态系统中具

有较强的代表性, 主要保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类. 保护区属暖温带季风气候区, 具有明显的大陆性季风气候特点, 雨热同期, 四季分明, 冷热干湿界限极为明显. 该区年平均气温 12.1°C , 无霜期 196 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温约 4300°C , 年均蒸发量 1962 mm, 年均降水量为 551.6 mm, 70% 的降水集中于 7、8 月. 保护区的土壤类型主要为隐域性潮土和盐土, 主要植被类型为芦苇 (*Phragmites australis*) 群落、芦苇-荻 (*Triarrhena sacchariflora*) 群落、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 群落、柽柳 (*Tamarix chinensis*) 群落、翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 群落及补血草 (*Limonium sinense*) 群落等.

1.2 样地选择与样品采集

在今黄河入海口北部依据水盐梯度和植被类型确定了 4 个典型研究样地. 自黄河口滨岸至潮滩, 分布的典型滨海湿地类型分别为翅碱蓬-芦苇湿地(高潮滩)、翅碱蓬-柽柳湿地(中潮滩)、翅碱蓬湿地(低潮滩)和光滩. 野外观测时, 在上述 4 个典型样地各布设一个观测点位, 每个点位 3 个重复, 研究采用的数据是基于 3 个平行采样箱数据的算术平均值. 4 个点位的地理位置和土壤基本理化性质详见表 1.

2009 年 9 和 10 月下旬(24~26 日), 即潮滩植被正处于成熟期(生长末期)时, 对 4 个潮滩湿地的 CH_4 通量进行了观测. CH_4 气体采集采用静态暗箱-气相色谱法. 采样箱由 0.4 mm 厚的铁皮制成, 箱体四周及顶部用白色泡沫包裹以确保采样时箱内温度变化不大. 采样箱采用标准式组合设计, 由箱体和底座两部分组成, 箱体规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$, 底座规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. 采集样品时, 采样箱各部分之间均用水密封, 防止气体外露和外界气体进入. 采样箱内装有搅气小风扇、温度传感器、采气三通阀及气压平衡管. 9、10 月的观测均在白天出露期进行, 但在 9 月监测期间遇潮汐. 受不规则半日潮的影响, 光滩出露时间短, 监测时间从 07:30~15:00, 每 1.5 h 进行一次观测, 共观测 6 次, 其它潮滩观测时间均从 07:30~16:30, 共观测 7 次. 样品采集采用 60 mL 塑料注射器, 在 60 min 时间段内每 15 min 采集一次样品(共采集 4 个气体样品), 采集完毕后立即将气体样品置于 0.5 L 的铝塑复合气袋中(化工部大连光明化工研究所生产). 样品采集的同时, 同步观测的环境因子有土壤含水量、土壤电导率(EC)、气温、箱温、地表温度、不同深度(5、10、15 和 20 cm)地温等.

表 1 观测点位土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Comparison of environmental conditions of soils at different sampling sites

潮滩	地理位置	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	土壤温度 / $^{\circ}\text{C}$	含水的体积分数 / $\%$	TC / $\%$	TN / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NO ₃ ⁻ -N / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NH ₄ ⁺ -N / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
高潮滩	37°45'93.6"N, 119°09'6.4"E	15.45 ± 1.44	21.22 ± 3.82	35.28 ± 0.68	1.22 ± 0.02	385.89 ± 8.19	1.31 ± 0.39	3.05 ± 0.71
中潮滩	37°46'23.8"N, 119°09'8.7"E	13.84 ± 0.81	21.23 ± 4.31	34.26 ± 0.52	1.29 ± 0.01	391.36 ± 22.94	1.21 ± 0.27	3.87 ± 1.06
低潮滩	37°46'73.1"N, 119°09'7.9"E	10.38 ± 2.08	20.74 ± 7.28	34.67 ± 2.22	1.27 ± 0.02	362.53 ± 6.29	1.10 ± 0.57	2.92 ± 0.80
光滩	37°46'89.0"N, 119°10'2.0"E	10.85 ± 0.44	20.30 ± 6.01	35.76 ± 1.71	1.56 ± 0.02	453.15 ± 31.41	1.19 ± 0.42	3.74 ± 0.75

1) 表中数值为 MEAN ± S. D.

1.3 样品分析

样品采集后 36 h 内, 在实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行分析. 60 min 内采集的 4 个气体样品浓度与采样时间间隔存在相关关系, 所有样品的相关系数均在 $R^2 > 0.95$ 时才视为有效.

1.4 通量计算与统计分析

CH₄ 排放通量采用下式进行计算:

$$J = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中, J 为气体通量 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], dc/dt 为采样时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率, M 为 CH₄ 的摩尔质量 ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), P 为采样点气压 (Pa), T 为采样时的绝对温度 (K), V_0 、 P_0 、 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积 ($\text{mL}\cdot\text{mol}^{-1}$)、空气气压 (Pa) 和绝对温度 (K), H 为地面 (或水面) 以上采样箱高度 (m). J 的结果为正值表示气体排放到大气, 负值表示气体流入土壤或土壤吸收消耗大气中 CH₄.

运用 Origin 7.5 进行计算和绘图, 运用 SPSS 13.0 进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 环境温度变化

采样期间, 9 月为阴天, 10 月为晴天, 但有微风. 图 1 为 9、10 月不同潮滩湿地的环境温度变化. 据图可知, 9、10 月采样当天的温度变化均比较明显, 其中气温和箱温的变化趋势较为一致. 具体来说, 9 月除低潮滩的气温在 10:30 取得最高值, 箱温在 13:30 取得最高值外, 高潮滩、中潮滩、光滩的气温和箱温最高值出现时间一致, 分别在 13:30、13:30、10:30 取得最高值. 不同的是, 10 月高潮滩和中潮滩的气温和箱温在 10:30 取得最高值, 而低潮滩和光滩在 13:30 取得最高

值. 9、10 月地温 (特别是 15 cm 和 20 cm) 最高值的出现存在不同程度的滞后现象. 比较而言, 9 月的各温度参数均极显著大于 10 月 ($P < 0.01$), 表明 9 月的温度极显著高于 10 月.

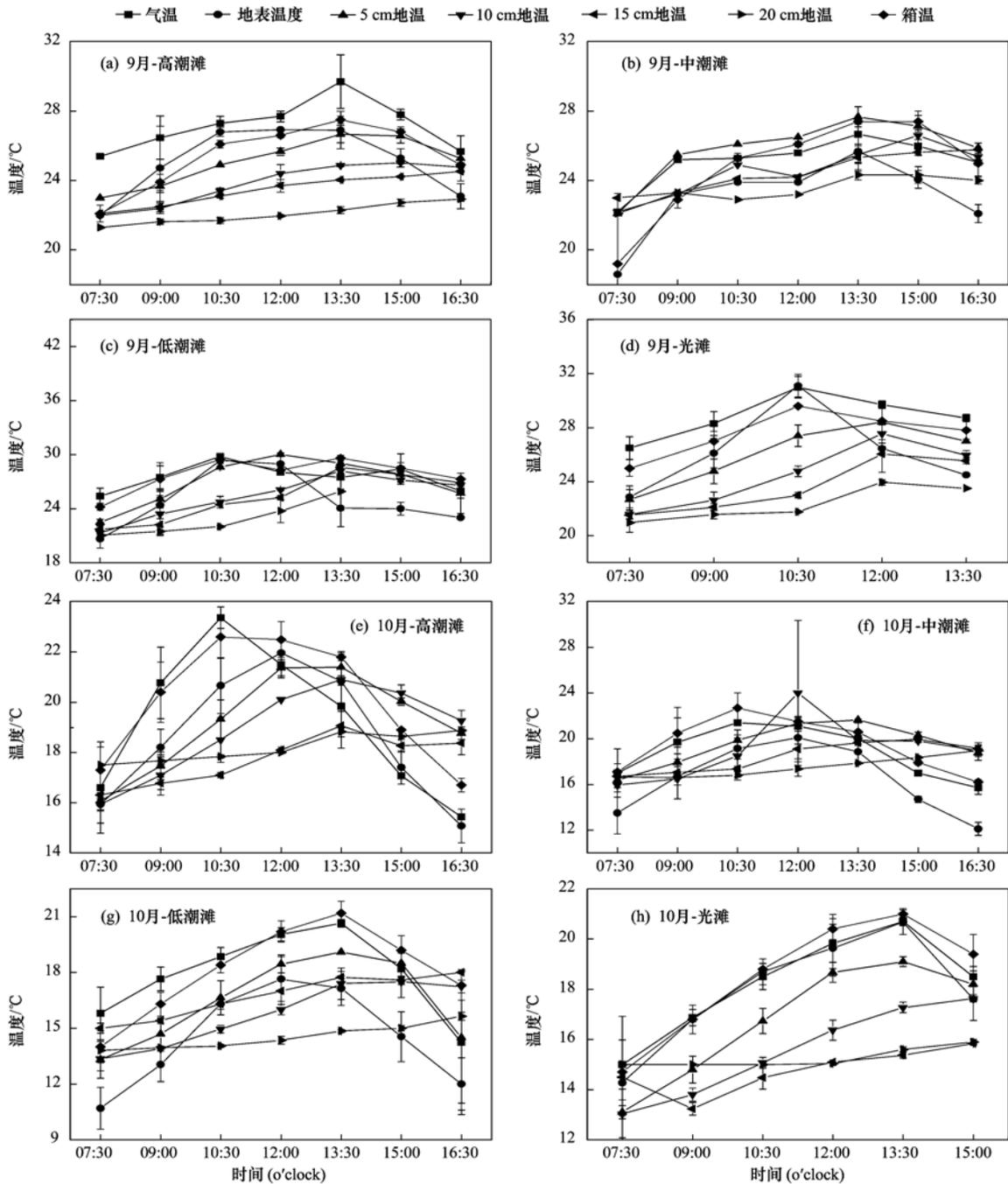
2.2 潮滩-大气界面 CH₄ 的排放通量及其变化特征

2.2.1 高潮滩

秋季高潮滩-大气界面的 CH₄ 通量整体呈“排放-吸收”变化特征 (图 2), 通量范围为 $-0.206 \sim 1.264 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.089 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 变异系数为 417.88%, 白天整体表现为 CH₄ 排放源. 整体而言, 9、10 月的 CH₄ 通量除在 13:30 呈相反变化趋势外, 其它时刻均有相似变化特征, 即在 07:30 ~ 10:30 表现为排放, 12:00、15:00、16:30 表现为吸收. 具体来说, 9 月的 CH₄ 通量范围为 $-0.206 \sim 0.168 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $-0.012 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 其中排放峰出现在 10:30, 吸收峰出现在 16:30, 整体表现为 CH₄ 的弱汇. 与之相比, 10 月的 CH₄ 通量范围为 $-0.176 \sim 1.264 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.190 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 其中排放峰出现在 09:00, 吸收峰出现在 12:00, 整体表现为 CH₄ 的较强排放源.

2.2.2 中潮滩

秋季中潮滩-大气界面的 CH₄ 通量整体呈“吸收-排放”趋势, 但其变化无明显规律 (图 2), 通量范围介于 -0.197 和 $0.431 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 之间, 均值为 $0.038 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 变异系数为 474.12%, 整体表现为 CH₄ 排放源. 具体而言, 9 月的 CH₄ 通量范围为 $-0.162 \sim 0.431 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.081 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 吸收峰出现在 12:00, 排放峰出现在 15:00, 整体表现为 CH₄ 排放源. 与之相比, 10 月的 CH₄ 通量范围为 $-0.197 \sim 0.111 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $-0.005 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 吸收峰和排放峰分别



图中数值为 $MEAN \pm S.E.$, 下同

图1 秋季不同潮滩湿地环境温度变化

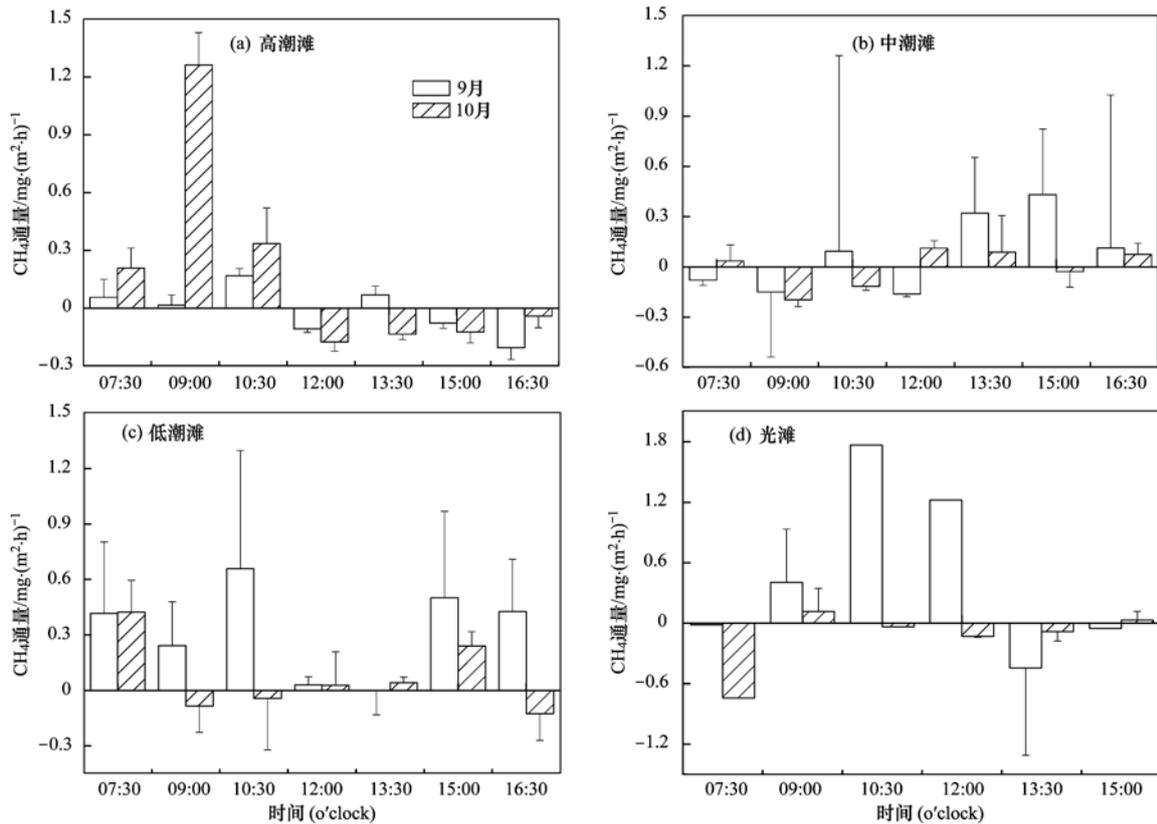
Fig. 1 Changes of environment temperatures in different tidal wetlands in Autumn

在 09:00 和 12:00, 整体表现为 CH_4 的弱汇。

2.2.3 低潮滩

秋季低潮滩-大气界面的 CH_4 通量范围介于 -0.125 和 $0.659 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间, 通量均值为 $0.197 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 变异系数为 127.83%, 整体表现为 CH_4 排放源 (图 2)。比较而言, 9、10 月的 CH_4 通量特征存在较大差异。就 9 月而言, 通量范围为

$-0.002 \sim 0.659 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值为 $0.325 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。除 13:30 表现为 CH_4 的弱汇外, 其它时刻均表现为 CH_4 排放源, 且排放峰出现在 10:30。与之相比, 10 月的 CH_4 通量范围为 $-0.125 \sim 0.424 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值为 $0.069 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH_4 通量呈“排放-吸收”交替变化特征, 其排放峰和吸收峰分别出现在 07:30 和 16:30, 且整体表现为 CH_4 弱

图2 秋季不同潮滩湿地 CH_4 排放通量变化特征Fig. 2 Variation characteristics of CH_4 fluxes in different tidal wetlands in Autumn

排放源。

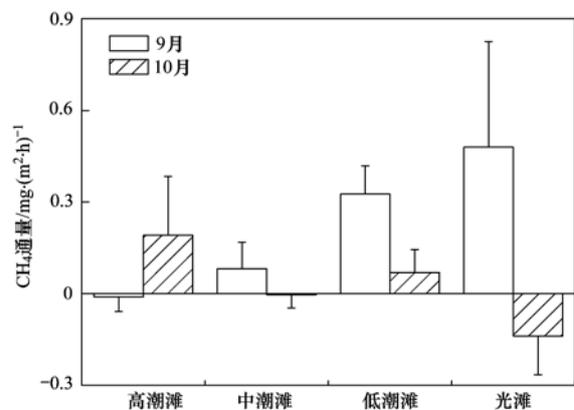
2.2.4 光滩

秋季光滩-大气界面的 CH_4 通量范围为 $-0.742 \sim 1.767 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值为 $0.169 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 变异系数为 406.94%, 整体表现为 CH_4 排放源(图2)。总体而言, CH_4 通量在9、10月均呈“吸收-排放”交替变化特征, 其在 07:30、09:00、13:30 均同时表现为吸收或排放, 而在 10:30、12:00、15:00 则呈相反变化趋势。具体而言, 9月的 CH_4 通量范围为 $-0.444 \sim 1.767 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值为 $0.480 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 整体表现为 CH_4 的强排放源, CH_4 排放量自上午开始逐渐增加, 并在 10:30 达到排放峰值, 而吸收峰值出现在下午 13:30。10月的 CH_4 通量范围为 $-0.742 \sim 0.119 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 均值为 $-0.141 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 整体表现为 CH_4 的汇。

2.2.5 CH_4 通量的空间差异

图3为秋季不同潮滩湿地白天 CH_4 通量均值之间的空间差异。数据是基于白天各个观测时刻数据的算术平均值(高、中、低潮滩 $n=7$; 光滩 $n=6$),

据图3可知, 9月除高潮滩表现为 CH_4 的较弱吸收外, 其它潮滩存在明显的 CH_4 排放梯度变化, 整体表现为光滩 > 低潮滩 > 中潮滩。与之相比, 10月的 CH_4 排放表现为高潮滩 > 低潮滩, 而 CH_4 吸收表现为光滩 > 中潮滩, 但中潮滩对 CH_4 的吸收作用很弱。总体来说, 秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统表现为 CH_4 的排放源, 但其源功能整体表现为低潮滩 > 光

图3 秋季 CH_4 通量在不同潮滩之间的空间差异Fig. 3 Spatial variation of CH_4 fluxes among different tidal wetlands in Autumn

滩 > 高潮滩 > 中潮滩。

3 影响 CH₄ 通量的环境因子分析

3.1 温度

温度主要通过影响产 CH₄ 菌的活性和 CH₄ 的氧化输送来最终影响到 CH₄ 的排放,温度的变化可使微生物由休眠状态快速转化为活化状态,从而彻底改变反应速率^[25]。温度也是日周期内变化最为明显的环境因子。通过对 9、10 月 CH₄ 通量与气温、箱温以及不同深度地温的相关分析发现,除 9 月中潮滩和光滩的各温度与 CH₄ 通量均呈正相关、10 月低潮滩的各温度与 CH₄ 通量均呈负相关外,其它情况下的相关性并不一致(或正或负)。总体而言,仅 9 月中潮滩的 CH₄ 通量与 10 cm、15 cm 地温显著正

相关(r 分别为 0.845 和 0.779, $P < 0.05$),而其它相关性并不显著(表 2)。由图 1(b)和图 2(b)也可看出,9 月中潮滩 CH₄ 最大通量出现的时刻与 10 cm 地温最大值出现的时刻正好吻合。

已有研究表明,产 CH₄ 菌发挥作用的最适宜温度为 25 ~ 30℃^[26]。本研究中,9、10 月不同潮滩各层地温的均值分别为 24.6℃和 17.1℃,9 月的土壤温度更接近于产 CH₄ 的最适温度,而这可能是 9 月的 CH₄ 排放通量总体大于 10 月的重要原因。整体而言,通过综合 9、10 月的 CH₄ 通量与各热量指标进行相关分析可知,秋季 CH₄ 通量与气温和箱温均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),而与地表温度及 5 cm 地温呈显著正相关关系($P < 0.05$),说明温度对于秋季潮滩湿地的 CH₄ 排放具有一定的促进作用。

表 2 温度与 CH₄ 通量的 Pearson 相关系数及显著性分析

Table 2 Pearson correlation coefficients and significant analysis between CH₄ fluxes and the temperatures

潮滩	月份	气温	地表温度	5 cm 地温	10 cm 地温	15 cm 地温	20 cm 地温	箱温
高潮滩	9 ²⁾	0.255	0.290	-0.269	-0.503	-0.607	-0.692	-0.056
	10 ²⁾	0.310	-0.117	-0.591	-0.657	-0.657	-0.582	0.049
中潮滩	9 ²⁾	0.520	0.467	0.562	0.845 * ¹⁾	0.779 * ¹⁾	0.732	0.639
	10 ²⁾	-0.227	-0.061	0.354	0.578	0.556	0.532	-0.320
低潮滩	9 ²⁾	0.201	-0.031	-0.316	-0.311	-0.200	-0.725	-0.141
	10 ²⁾	-0.081	-0.329	-0.108	-0.256	-0.355	-0.320	-0.360
光滩	9 ³⁾	0.788	0.877	0.527	0.326	0.049	0.036	0.706
	10 ⁴⁾	0.582	0.601	0.568	0.516	-0.041	0.308	0.602

1) * 表示 $P < 0.05$ 显著水平; 2) $n = 7$; 3) $n = 5$; 4) $n = 6$

3.2 水分

由于 CH₄ 是土壤有机物厌氧分解过程中产生的^[27],因此土壤水分的多少是控制 CH₄ 产生所需厌氧环境的关键因子,它直接影响 O₂ 可利用率、气体扩散速率和微生物活性^[28],并间接影响与 CH₄ 产生相关的土壤 pH 值、Eh 等因素,最终影响到 CH₄ 的产生与扩散。本研究发现,9 月除光滩的 CH₄ 排放通量与土壤含水量(包括土壤表层、地下 5 cm、10 cm 含水量)均呈正相关外,其它潮滩湿地的 CH₄ 通量与土壤含水量均呈负相关;而 10 月各潮滩湿地的 CH₄ 排放通量与表层、5 cm 土壤含水量呈正相关,而与 10 cm 土壤含水量呈负相关,且各相关性均不显著($P > 0.05$)。任万辉等^[6]认为,土壤中 CH₄ 的产生一般随水分含量的增加而增加,因为 CH₄ 产生所需的厌氧环境在很大程度上决定于土壤水分状况,水分增加促进了厌氧环境的形成。此外,上官行健等^[7]对稻田土壤、叶勇等^[18]对研究厦门红树林的相关研究也得到类似结论。本研究中,CH₄ 通量与土壤含水量的相关性并不显著可能是由于对于任何一个

潮滩湿地而言,其含水量变化不大,由此导致其对 CH₄ 通量的影响并不明显,而这与王维奇^[15]的研究结果相一致。虽然各潮滩的 CH₄ 排放通量变化与土壤水分均未呈现出显著相关关系,但综合各个潮滩秋季 CH₄ 通量的均值可知,低潮滩和光滩明显高于中潮滩和高潮滩,即靠近海的潮滩 CH₄ 通量高于靠陆的潮滩,此结果与叶勇等^[29]的研究得出的土壤 CH₄ 产生量外滩 > 中滩 > 内滩的滩面变化趋势一致。由于各个潮滩在其它物理性质方面还存在差异,所以只能推测水分可能具有某种效应,但不能确定 CH₄ 通量的差异是否为水分差异所致。

此外,CH₄ 排放通量还可能受到潮汐引起的水表水深变化的影响。就 9 月来说,采样当天中午出现潮汐现象,低潮滩在 13:30 时由于涨潮引起的水深为 11.4 cm,而光滩在 12:00 时水深即达 4.0 cm。涨潮后二者的通量均表现出明显变化(图 2)。就低潮滩而言,CH₄ 通量特征由 12:00 的排放转为 13:30 的微弱吸收,之后排放通量迅速增加,原因可能与低潮滩距海较远潮水上升慢下降快且持续时间较短有

关. 涨潮后, 土壤表面较深的滞水可能阻碍了 CH₄ 向大气的排放, 故通量立即变小; 而当土壤被潮水淹没一段时间后, 含氧量降低, 还原反应占主导地位, 实际上更适于 CH₄ 的产生^[16]. 当潮水退去后, 土壤中产生的大量 CH₄ 可以释放出来, 故表现为更大的排放通量. 另外, 由于涨潮而引起的土壤表层温度从 12:00 的 29.0℃ 迅速降至 13:30 的 24.1℃, 而这可能是涨潮初期引起的 CH₄ 排放减少的间接原因. 与之相比, 光滩在涨潮初期 (12:00) 的 CH₄ 排放通量明显降低, 但当潮水较大地表滞水较深时, CH₄ 通量在 13:30 ~ 15:00 一直表现为吸收, 原因可能是由于光滩距海较近潮汐涨落变化比较缓慢, 即地表潮水上升快下降慢且慢持续时间长有关, 长时间和较深的地表滞水严重阻碍了 CH₄ 向大气的排放.

3.3 盐分

除了温度和水分外, 盐分作为影响 CH₄ 排放的重要因子, 国内外也有较多相关报道. 盐度可通过影响产 CH₄ 细菌的活性来间接影响 CH₄ 通量的变化. 本研究表明, 9、10 月不同潮滩湿地的 CH₄ 通量仅与 5 cm 土层的盐度 (以 EC 表征) 呈负相关, 而与 10 cm、15 cm 土层的盐度呈正相关, 但相关性均不显著 ($P > 0.05$), 说明土壤表层较高的盐分在一定程度上抑制了 CH₄ 的产生, 而较深土层较低的盐分可能不足以对 CH₄ 产生抑制作用. 现有大量研究发现, 土壤盐分可能抑制 CH₄ 的产生^[13,19], 高的 CH₄ 产生率几乎总出现在低盐分条件下^[30]. Denier 等^[31]、Mishra 等^[32] 的研究也表明, 向试验土壤中添加盐分后, CH₄ 的产生量明显降低. 曾从盛等^[14] 的研究还发现, 随着盐分添加浓度的增加, CH₄ 产生潜力逐渐降低. 较高盐分对 CH₄ 产生抑制的主要原因在于, 盐分增加提高了土壤中电子受体的数量, 使得 CH₄ 产生菌在竞争底物乙酸和氢时处于劣势, 只有当电子受体还原待尽时才会有 CH₄ 产生, 同时盐分过多也可能限制产 CH₄ 微生物的活性^[14]. 但也有研究认为, 盐分增加导致的电子受体对 CH₄ 产生菌产生毒害作用是抑制 CH₄ 产生的主要机制^[33]. 本研究中, 盐分与 CH₄ 排放通量之间的相关性均不显著, 说明盐分可能并不是影响不同潮滩湿地秋季 CH₄ 排放通量的重要因素.

3.4 植被

采样点的主要植被类型为碱蓬, 属盐生维管束植物, 它可以通过影响 CH₄ 的产生、氧化、传输和排放来影响 CH₄ 的通量变化. 维管束植物光合作用的产物是 CH₄ 产生的主要碳源, 植物根系的周转和碳

物质的分泌为产 CH₄ 细菌提供底物, 维管束植物根际氧化是 CH₄ 氧化最主要的途径^[34]. 湿地 CH₄ 是从土壤-水-植物体系向大气进行传输的^[35], 而植物传输是植物生长区域 CH₄ 传输的主要形式 (可将 50% ~ 90% 土壤中产生的 CH₄ 传输到大气)^[34]. Sebacher 等^[36] 研究表明, 滨海湿地的 *Thpialatifolia* 群落中, 超过 50% 的进入大气的 CH₄ 是通过植物对流输送的. 可见, 植物可通过多方面来影响 CH₄ 通量, 而不同植物产生的效应也有所不同. 本研究中, 秋季的 CH₄ 排放通量总体表现为低潮滩 > 光滩 > 高潮滩 > 中潮滩 (2.2.5 节). 由于 9、10 月为高潮滩碱蓬的生长末期, 大部分植被已经枯萎, 但低潮滩的碱蓬此间正值成熟期, 其生长依然比较旺盛, 从而更有利于 CH₄ 排放, 而这也可能是导致低潮滩 CH₄ 通量较大的重要原因. 此外, 光滩虽然无植被覆盖但通量却较高, 部分原因可能在于 CH₄ 产生后可直接通过土壤或水体排放到大气的缘故.

3.5 CH₄ 排放通量环境因子识别

为了探讨影响 CH₄ 通量的可能主控因素, 本研究对黄河口 4 个潮滩湿地秋季的 13 个环境因素进行了主成分分析 ($n = 53$). 选取的环境因素包括气温、不同深度地温 (0、5、10、15、20 cm)、箱温、不同土层含水量 (0、5、10 cm)、不同土层电导率 (5、10、15 cm). 依据主成分分析原理, 选取了特征值 > 1 的前 3 个主成分 C1, C2, C3 (表 3), 其累积贡献率达到了 89.62%, 较好地反映了秋季黄河口滨岸潮滩湿地的环境特征.

表 3 特征值及主成分贡献率

Table 3 Eigenvalues and principal component contribution rates			
主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
C1	7.027	54.054	54.054
C2	2.832	21.787	75.841
C3	1.792	13.783	89.624
C4	0.603	4.640	94.264
C5	0.251	1.935	96.199
C6	0.165	1.267	97.466
C7	0.115	0.882	98.348
C8	0.091	0.697	99.045
C9	0.049	0.378	99.424
C10	0.045	0.347	99.771
C11	0.019	0.144	99.915
C12	0.007	0.055	99.969
C13	0.004	0.031	100.00

根据主成分分析结果 (表 4), 第一主成分 C₁ 与 X₁ ~ X₇ 等 7 个因素呈较大正相关, 而这些因素均与生态系统的能量状况有关, 因此可以看作是热量条

件的代表. 第二主成分 C_2 与 $X_9 \sim X_{13}$ 呈较大正相关, 而这些因素均与生态系统的水分和盐分状况有关, 可以看作是水盐条件的代表. 第三主成分 C_3 比较复杂, 与 X_8, X_{10} 呈较大正相关, 而与 X_{11}, X_{12} 呈较大负相关, 而这些因素也可以看作是水盐条件的代表. 对潮滩湿地选取每个主成分中相关系数绝对值较大者作为代表, 通过逐步引入-剔除法建立这些环境因素与 CH_4 排放通量的多元回归方程:

$$Y = -0.552 + 0.031X_1$$

$$(R = 0.360, n = 53, P = 0.039)$$

式中, Y 为 CH_4 通量, X_1 为气温.

表 4 主成分载荷

Table 4 Load of principal components

环境因子	主成分		
	C_1	C_2	C_3
气温 X_1	0.921	-0.209	0.126
地表温度 X_2	0.902	-0.180	0.087
5 cm 地温 X_3	0.975	-0.167	0.036
10 cm 地温 X_4	0.980	-0.056	0.038
15 cm 地温 X_5	0.952	-0.125	0.007
20 cm 地温 X_6	0.958	-0.050	-0.020
箱温 X_7	0.952	-0.151	0.117
地表含水量 X_8	0.429	0.426	0.645
5 cm 含水量 X_9	0.068	0.787	0.501
10 cm 含水量 X_{10}	-0.264	0.632	0.614
5 cm 电导率 X_{11}	0.263	0.669	-0.581
10 cm 电导率 X_{12}	0.395	0.703	-0.518
15 cm 电导率 X_{13}	0.488	0.737	-0.320

环境因素中只有气温进入回归方程, 说明气温对秋季黄河口潮滩湿地系统 CH_4 排放具有显著影响, 而这与 3.1 节得出的秋季 CH_4 通量与气温呈显著正相关的结论相一致, 回归分析还发现, 其它因素对 CH_4 排放通量虽有一定影响但均未达到显著水平.

4 结论

(1) 在空间上, 秋季高潮滩、中潮滩、低潮滩和光滩的 CH_4 通量均值分别为 0.089、0.038、0.197 和 0.169 $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 均表现为 CH_4 排放源, 但源功能整体表现为低潮滩 > 光滩 > 高潮滩 > 中潮滩.

(2) 在时间上, 9、10 月份潮滩湿地的 CH_4 排放通量范围分别为 $-0.444 \sim 1.767$ $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 、 $-0.742 \sim 1.264$ $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 均值为 0.218 $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 、0.028 $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 除 9 月高潮滩表现为 CH_4 弱汇外, 其它潮滩的 CH_4 通量均明显高于 10 月.

(3) 黄河口滨岸潮滩湿地的环境变化比较复

杂, CH_4 排放通量受多重因素控制. 秋季不同潮滩湿地 CH_4 排放通量的差异可能主要与温度以及植被生长状况的差异有关, 其中气温与 CH_4 通量呈显著正相关关系 ($Y = -0.552 + 0.031X_1$, $R = 0.360$, $n = 53$, $P = 0.039$), 而水盐条件和潮汐状况对 CH_4 排放通量的影响也不容忽视.

参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. Science, 1990, 248 (4960): 1217-1219.
- [2] 宋文质, 王少彬, 苏维翰, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放研究 [J]. 环境科学, 1996, 17 (1): 85-88.
- [3] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing [A]. In: Climate change: the physical science basis [C]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 王德宣, 丁维新, 王毅勇. 若尔盖高原与三江平原沼泽湿地 CH_4 排放差异的主要环境影响因素 [J]. 湿地科学, 2003, 1 (1): 63-67.
- [5] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38 (5): 751-759.
- [6] 任万辉, 许黎, 王振会. 中国稻田甲烷产生和排放研究 I. 产生和排放机理及其影响因子 [J]. 气象, 2004, 30 (6): 3-7.
- [7] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 稻田土壤中的 CH_4 产生 [J]. 地球科学进展, 1993, 8 (5): 1-12.
- [8] 彭世章, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH_4 排放规律的影响 [J]. 环境科学, 2007, 28 (1): 9-13.
- [9] 杨继松, 刘景双, 王金达, 等. 三江平原生长季沼泽湿地 CH_4 、 N_2O 排放及其影响因素 [J]. 植物生态学报, 2006, 30 (3): 432-440.
- [10] Song C C, Xu X F, Tian H Q, et al. Ecosystem-atmosphere exchange of CH_4 and N_2O and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang Plain, Northeastern China [J]. Global Change Biology, 2009, 15 (3): 692-705.
- [11] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 若尔盖高原沼泽湿地 CH_4 排放研究 [J]. 地球科学进展, 2002, 17 (16): 877-880.
- [12] 姚守平. 若尔盖高原花湖湖滨湿地甲烷排放研究 [D]. 成都: 中国科学院研究生院成都生物研究所, 2007.
- [13] 王维奇, 曾从盛, 全川. 水、盐梯度及外来植物入侵对河口湿地土壤甲烷产生潜力的影响 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25 (4): 481-486.
- [14] 曾从盛, 王维奇, 全川. 不同电子受体及盐分输入对河口湿地土壤甲烷产生潜力的影响 [J]. 地理研究, 2008, 27 (6): 1321-1330.
- [15] 王维奇. 闽江河口芦苇湿地甲烷排放及其主要环境影响因子分析 [D]. 福州: 福建师范大学, 2008.

- [16] 汪青, 刘敏, 侯立军, 等. 崇明东滩湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放的时空差异 [J]. 地理研究, 2010, **29**(5): 935-946.
- [17] 王东启, 陈振楼, 王军, 等. 夏季长江口潮间带 CH₄、CO₂ 和 N₂O 通量特征 [J]. 地球化学, 2007, **36**(1): 78-88.
- [18] 叶勇, 卢昌义, 谭凤仪, 等. 红树林湿地土壤 CH₄ 产生率及其土壤理化因素影响的研究 [J]. 土壤学报, 2000, **37**(1): 77-84.
- [19] 卢昌义, 叶勇, 林鹏, 等. 海南海莲红树林土壤 CH₄ 的产生及其某些影响因素 [J]. 海洋学报, 1998, **20**(6): 132-138.
- [20] 李政海, 王海梅, 刘书润, 等. 黄河三角洲生物多样性分析 [J]. 生态环境, 2006, **15**(3): 577-582.
- [21] 梁玉, 房用, 王月海, 等. 黄河三角洲湿地不同植被恢复类型对植被多样性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2008, **36**(9): 48-50.
- [22] 张晓龙. 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [23] 黄翀, 刘高焕, 王新功, 等. 不同补水条件下黄河三角洲湿地恢复情景模拟 [J]. 地理研究, 2010, **29**(11): 2026-2034.
- [24] 刘庆, 李伟, 陆兆华. 基于遥感与 GIS 的黄河三角洲绿色空间生态服务价值评估 [J]. 生态环境学报, 2010, **19**(8): 1838-1843.
- [25] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(4): 604-608.
- [26] 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.
- [27] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, *et al.* Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates [J]. Plant and soil, 1998, **203**(2): 227-237.
- [28] Hirota M, Senga Y, Seike Y, *et al.* Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan [J]. Chemosphere, 2007, **68**(3): 597-603.
- [29] 叶勇, 卢昌义, 林鹏. 厦门东屿白骨壤林土壤甲烷的产生量、氧化量、传输率与库量 [J]. 台湾海峡, 2001, **20**(2): 236-244.
- [30] Supparattanapan S, Saenjan P, Quantin C, *et al.* Salinity and organic amendment effects on methane emission from a rain-fed saline paddy field [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2009, **55**(1): 142-149.
- [31] Denier van der Gon H A C, Neue H U. Methane emission from a wetland rice field as affected by salinity [J]. Plant and Soil, 1995, **170**(2): 307-313.
- [32] Mishra S R, Pattnaik P, Sethunathan N, *et al.* Anion-Mediated salinity affecting methane production in a flooded alluvial soil [J]. Geomicrobiology Journal, 2003, **20**(6): 579-586.
- [33] Chidthaisong A, Conrad R. Turnover of glucose and acetate coupled to reduction of nitrate, ferric iron and sulfate and to methanogenesis in anoxic rice field soil [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2000, **31**(1): 73-86.
- [34] 段晓男, 王效科, 欧阳志云. 维管植物对自然湿地甲烷排放的影响 [J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3375-3382.
- [35] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展 [J]. 应用于环境生物学报, 2006, **12**(5): 726-733.
- [36] Sebacher D I, Harriss R C, Bartlett K B. Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants [J]. Journal of Environmental Quality, 1985, **14**(1): 40-46.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@reeces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@reeces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行