

郭树芳, 齐玉春, 罗小玲, 等. 滴灌对干旱区春小麦田土壤 CO₂、N₂O 排放及综合增温潜势的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):792–800.

GUO Shu-fang, QI Yu-chun, LUO Xiao-ling, et al. Effects of drip irrigation on soil CO₂ and N₂O emissions and their global warming potentials of spring wheat field in arid region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):792–800.

滴灌对干旱区春小麦田土壤 CO₂、N₂O 排放及综合增温潜势的影响

郭树芳¹, 齐玉春¹, 罗小玲², 刘长勇², 彭 琴¹, 闫钟清¹, 董云社^{1*}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2.新疆农垦科学院农业部食品质量监督检验测试中心, 新疆 石河子 832000)

摘 要:对比新疆干旱区滴灌和传统灌溉对春小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量及综合增温潜势的影响差异,旨在为该区有利于农田温室气体减排的农业管理措施的制定提供科学依据。在春小麦田中,设置滴灌和漫灌两种灌溉方式(其中滴灌包含滴灌管间和滴灌管上 2 个不同的空间处理),利用静态暗箱-气相色谱法对两种灌溉方式下不同处理的土壤 CO₂ 及 N₂O 排放通量及影响因素进行了测定和分析。结果表明:在春小麦生长季,滴灌方式下土壤 CO₂ 排放通量均值比漫灌减少了 35.76%。滴灌管间和滴灌管上两个处理的土壤 CO₂ 排放通量无显著差异,均值分别为 906.28、838.25 mg·m⁻²·h⁻¹,但均与漫灌处理有显著性差异($P<0.05$)。滴灌方式下土壤 N₂O 排放通量达 74.81 μg·m⁻²·h⁻¹,比漫灌增加 25.87%。滴灌管间和滴灌管上处理土壤 N₂O 平均排放通量均高于漫灌,分别为 85.76、63.62 μg·m⁻²·h⁻¹,3 个处理间均无显著性差异($P>0.05$)。滴灌和漫灌方式下土壤 CO₂ 累积排放量分别为 2 188.68、3 180.91 g·m⁻²,土壤 N₂O 累积排放量分别为 188.62、160.60 mg·m⁻²,滴灌方式下春小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 的综合增温潜势比漫灌减少 983.55 g CO₂·m⁻²。相关性分析表明,滴灌管间处理土壤 CO₂ 排放通量与大气温度及 5、10 cm 地温的相关性均达显著水平($P<0.05$),与 10~20 cm 层土壤微生物量碳呈极显著相关($P<0.01$);漫灌方式下,0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤水分显著影响土壤 N₂O 排放通量($P<0.05$);滴灌方式下滴灌管上处理的 0~10 cm 层土壤水分与土壤 N₂O 排放通量显著相关($P<0.05$),滴灌管间处理的 10~20 cm 层土壤 NH₄-N 含量是影响 N₂O 排放通量的显著因素($P<0.05$)。

关键词:滴灌;春小麦;CO₂ 排放;N₂O 排放;全球增温潜势

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)04-0792-09 doi:10.11654/jaes.2016.04.025

Effects of drip irrigation on soil CO₂ and N₂O emissions and their global warming potentials of spring wheat field in arid region

GUO Shu-fang¹, QI Yu-chun¹, LUO Xiao-ling², LIU Chang-yong², PENG Qin¹, YAN Zhong-qing¹, DONG Yun-she^{1*}

(1.Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.Food Quality Supervision and Testing Center of Ministry of Agriculture, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract: Drip irrigation is a new water-saving irrigation technique and is widely applied in arid region in Xinjiang. However, there is little information available about its effects on greenhouse gas emissions. In this study, a field experiment was conducted to compare the effects of both drip irrigation and conventional flood irrigation on soil CO₂ and N₂O emissions during the spring wheat growing season using static close

收稿日期:2015-11-15

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201203012-6);国家自然科学基金项目(41373084,41330528,41203054,41573131)

作者简介:郭树芳(1986—),女,河南林州人,博士研究生,研究方向为陆地生态系统碳氮循环。E-mail:guosf.12b@igsnr.ac.cn

*通信作者:董云社 E-mail:dongsy@igsnr.ac.cn

chamber method. Under drip irrigation, gas sampling was performed at between the pipes (BP) and on the pipe (OP). Results showed that: average CO₂ emissions under drip irrigation was 35.76% lower than that under flood irrigation during the spring wheat growing season, with significant difference. Average CO₂ emissions from BP and OP were 906.28 and 838.25 mg·m⁻²·h⁻¹, respectively. No differences were found between them. N₂O emissions under drip irrigation was 74.81 μg·m⁻²·h⁻¹ or 25.87% higher than that under flood irrigation. Average N₂O emissions from OP and BP were 85.76 and 63.62 μg·m⁻²·h⁻¹, respectively. However there was no significant difference between drip and flood irrigation systems ($P>0.05$). Cumulative emissions under drip and flood irrigations were respectively 2 188.68 and 3 180.91 g·m⁻² for CO₂, and 188.62 and 160.60 mg·m⁻² for N₂O. The global warming potentials of CO₂ and N₂O under drip irrigation was 983.55 g CO₂·m⁻² lower than that under flood irrigation. Significant correlations were observed between soil CO₂ emissions from BP and air temperature, soil temperature at 5 cm and 10 cm depth ($P<0.05$) and soil microbial biomass carbon at 10~20 cm depth ($P<0.05$), and also between soil N₂O emissions under flood irrigation and soil water content at 0~10 cm and 10~20 cm depth ($P<0.05$). Soil N₂O emissions from OP were significantly correlated with soil water content at 0~10 cm depth ($P<0.05$) and that from BP were significantly correlated with soil NH₄⁺-N at 10~20 cm depth.

Keywords: drip irrigation; spring wheat; CO₂ emission; N₂O emission; global warming potentials (GWPs)

农业生态系统是温室气体重要排放源,人类活动造成的温室气体排放中 13.5%来源于农田^[1]。农业温室气体减排已成为当前国内外全球变化领域关注的热点^[2],是减缓气候变化的重要途径之一^[3]。灌溉是一项重要的农田管理措施,不同灌溉方式能够改变土壤的结构和理化性质,从而使土壤有机质含量、微生物组成及含量、根系生物量等发生改变,进而带来土壤呼吸的变化^[4-5]。与此同时,尽管土壤硝化和反硝化反应同时发生,但不同灌溉系统中由于水分含量的不同,总是产生有利于其中一个反应的条件^[6],因此灌溉与否以及灌溉方式的变化也会带来土壤 N₂O 排放通量的较大差异。

滴灌是近年发展起来的一种新兴的农业节水灌溉技术。在水资源日益短缺的新疆干旱区,滴灌节水技术是农业可持续发展的关键。2008 年以前,新疆干旱区春小麦灌溉基本上是沿用传统的地面灌溉方式,2008 年以来,滴灌灌溉方式得到大力推广^[7-8],2009 年仅新疆北疆滴灌小麦种植面积就已超过了 3.5×10⁴ hm²^[9]。滴灌技术的快速发展势必会带来农田土壤温室气体排放贡献的变化。在这种背景下,加强滴灌对于旱区春小麦田土壤 CO₂ 与 N₂O 排放规律及其综合增温潜势的影响研究对于准确评价节水灌溉技术应用后所带来的环境效应具有重要的科学意义。

目前,国外关于滴灌农田温室气体的研究主要集中在番茄和甜瓜田上,研究认为,与沟灌相比,滴灌显著降低了土壤 N₂O 排放通量,而对 CO₂ 排放通量的研究则较少^[6,10-11]。国内虽然已有少量蔬菜田和干旱区膜滴灌条件下棉田土壤 CO₂ 与 N₂O 排放通量的试验研究^[12-14],但目前的研究基本上是针对不同气体分别进行的,对 CO₂ 与 N₂O 的综合研究还很少^[10]。单独的

某一温室气体排放的减少可能增加另一种温室气体排放,因此从不同温室气体的综合温室效应上研究温室气体减排调控措施更具实际意义。由于国内对滴灌与传统灌溉方式下春小麦田土壤 CO₂ 与 N₂O 排放通量的对比研究目前尚未见报道,本研究在我国西北干旱区选择春小麦田为研究对象,通过试验对比研究了滴灌和漫灌方式下春小麦田土壤 CO₂ 与 N₂O 排放通量的差异,分析了滴灌方式对土壤 CO₂ 与 N₂O 排放通量的影响及影响因素,以期评价滴灌对农田温室气体减排的影响提供科学依据。

1 试验区概况与试验方法

1.1 试验区概况

选择新疆维吾尔自治区石河子市新疆农垦科学院作物所试验田为研究区域(N44°18'16",E85°59'37"),于2014年4月至7月春小麦生长季开展试验。该试验区属典型的温带大陆性气候,全年平均气温7~8℃,≥0℃的活动积温为4023~4118℃,≥10℃的活动积温为3570~3729℃,年降水量为125.0~207.7 mm,年日照时数为2721~2818 h。试验地土壤为粘壤土,0~20 cm 层土壤 pH 为 9.19~9.28,有机碳含量为 8.38~9.77 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验区设置滴灌(DI)和漫灌(FI)两种灌溉方式,试验区面积均为 50 m×40 m。滴灌方式下设置滴灌管上(OP)和滴灌管间(BP)2 个处理,在滴灌管上位置进行气体样品采集时将滴管拉离采样点,采样后将其归位。漫灌试验区设 1 个处理,均匀随机设置采样点。每个处理 3 个重复。

滴灌试验区为无膜滴灌,60 cm 等间距配置,采

用1管4行种植模式,肥料溶解于灌溉水中随水滴入农田,灌溉水量与当地滴灌灌溉水量一致。漫灌时间及施肥情况与滴灌一致,漫灌水量与当地常规漫灌灌溉一致。全生育期共灌溉7次,日期分别为4月12日、4月27日、5月16日、5月23日、5月29日、6月11日和6月28日,施肥情况见表1。滴灌与漫灌试验区小麦播种量均为 $36\sim 40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,行距15 cm。前茬作物为棉花,春小麦于2014年4月4日播种,7月20日收获,其他农业管理措施与当地一致。

表1 滴灌和漫灌灌溉方式下农田施肥情况($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Fertilization under drip and flood irrigation($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

施肥时间 Fertilization time	尿素 Urea	磷酸一铵 Monoammonium phosphate	硫酸钾 Potassium sulphate
2014/04/27	12	3	—
2014/05/16	12	4.5	3
2014/05/23	12	4.5	3
2014/05/29	12	—	3

1.3 观测指标和方法

1.3.1 土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量

(1) 气体样品采集

CO_2 和 N_2O 的通量观测采用静态暗箱法,采样箱用8 mm厚黑色不透明的有机玻璃制成,目的在于避免观测过程中光合作用消耗 CO_2 的影响,其底面积为 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$,高度为40 cm。采集气体前需提前1 d割除小麦地上部分,并将带槽的采样底座埋入采样小区地下3~5 cm,静置以减少人为活动对测定区域的扰动。采样箱箱盖装有小风扇、温度计和采气三通阀。测定时,将采样箱放置到底座凹槽内,并用水密封,采气时通过调节三通气阀,利用医用注射器抽取箱内气体存入采样气袋中,带回实验室分析。

每次采样共9个采样箱(3个处理 $\times$ 3个重复),每个采样点面积约为 $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}$,相邻采样点间距约2 m。因为气体采集完毕后需原位采集土样,且考虑到如固定样点位置,该位置长期无植被覆盖将较实际偏离较大等原因,测定期间采样点位置并不是固定在原地,每次采样重新布设底座,相较前一个样点移动距离约为2 m。采样间隔为10~15 d,如遇下雨天气则适当调整,每次采样均选择在上半的9:00—11:00之间,观测持续时间为30 min,每间隔10 min抽取观测箱内气体一次,取样时间分别为扣箱后0、10、20、30 min,并记下气样采集时箱内温度以及观测前后的大气温度(T_{air})、大气压力以及地表温度($T_{\text{0 cm}}$)、5 cm

地温($T_{\text{5 cm}}$)及10 cm地温($T_{\text{10 cm}}$)等。地温采用TH-212便携式温度测量仪进行测定。

(2) 气体样品测定

利用LI-COR6252型 CO_2 红外线分析仪(LICOR Inc., Lincoln, NE, USA)测定气样的 CO_2 浓度,惠普5890II型气相色谱仪(Hewlett-Packard 7890, Germany)测定气样的 N_2O 浓度。 N_2O 与 CO_2 气体通量的计算公式均为:

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot D \cdot \frac{V}{A} = hD \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

$$D = n/v = P/RT$$

式中: F 为气体通量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; V 为观测箱的容积, m^3 ; A 为观测时包围的土壤面积, m^2 ; D 为箱内气体的密度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$; n 为 CO_2 的摩尔质量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; v 为气体体积, m^3 ; P 为箱内气压,Pa; T 为箱内气温,K; R 为气体常数, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\Delta m/\Delta t$ 为气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率; h 为观测箱高度,m。

1.3.2 土壤指标

在气体样品采集完毕后,用土钻采集底座框中的土壤样品,取样深度为耕层0~20 cm,分0~10 cm和10~20 cm两层采集。主要测定项目:土壤水分(SW)、土壤微生物量碳(MBC)、土壤可溶性碳(DOC)、土壤矿质氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)。

土壤含水量利用烘干法测定,DOC含量采用超纯水浸提-TOC分析仪法测定(Vario TOC Cube, Elementar, Germany),MBC含量采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提-TOC分析仪法测定, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量为新鲜土样经 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 浸提后利用连续式流动分析仪测定(Braun and L  bbe, Norderstedt, Germany)。

1.4 数据分析

将滴灌管和滴灌管间处理的气体通量平均值作为滴灌土壤气体通量的日均通量值。以观测值作为日均值,采用线性内插法,通过Matlab 7计算生长季累积排放量。利用SPSS 17软件的One-way ANOVA比较处理间气体通量的差异显著性,Person相关系数分析气体排放通量与影响因素间的相关性。文中图表采用Origin 8.5和Excel 2007绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤 CO_2 排放通量

漫灌与滴灌方式下土壤 CO_2 排放通量具有相似的季节变化特征,见图1a。小麦播种后,土壤 CO_2 通

量逐渐升高,至小麦乳熟期达到峰值,滴灌和漫灌处理土壤CO₂通量的峰值分别为1348.20、2273.01 mg·m⁻²·h⁻¹,之后开始下降直至小麦成熟收获。滴灌和漫灌土壤CO₂排放通量的分布范围分别在126.73~1758.75 mg·m⁻²·h⁻¹和253.77~3283.33 mg·m⁻²·h⁻¹之间,滴灌土壤CO₂平均排放通量为870.10 mg·m⁻²·h⁻¹,比漫灌减少了35.76%。滴灌与漫灌两种灌溉方式下CO₂排放通量具有显著性差异($P<0.05$),特别在抽穗期-成熟收获期,滴灌麦田土壤呼吸速率小于漫灌,差异达极显著水平($P<0.01$)。

滴灌方式下不同空间位置土壤CO₂排放通量处理间差异不显著(图2a)。滴灌管间和滴灌管上处理土壤CO₂排放通量均值分别为906.28、838.25 mg·m⁻²·h⁻¹,而滴灌管间及滴灌管上均与漫灌处理具有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 土壤N₂O排放通量

在春小麦生长季,滴灌和漫灌方式下土壤N₂O排放通量均在成熟期具有一个明显的峰值,且比CO₂排放通量峰值出现得晚,分别为299.14、159.58 μg·m⁻²·h⁻¹(图1b)。滴灌和漫灌方式下各小区土壤N₂O排放通量的变化范围分别为13.33~611.90 μg·m⁻²·h⁻¹和17.09~248.76 μg·m⁻²·h⁻¹,两种灌溉方式下土壤N₂O排放通量并无显著差异。在春小麦乳熟期之前,漫灌处理土壤N₂O排放通量大于滴灌,平均值分别为48.76、39.04 μg·m⁻²·h⁻¹;而对整个春小麦生长季而言,滴灌处理土壤N₂O排放通量平均值为74.81 μg·m⁻²·h⁻¹,比漫灌增加了25.87%。滴灌和漫灌方式下土壤N₂O排放峰值对总排放的贡献率分别达38.35%和57.12%。可见,在干旱区春小麦田中土壤N₂O排放高峰期在整个生长季土壤N₂O排放中的贡献较大,且滴

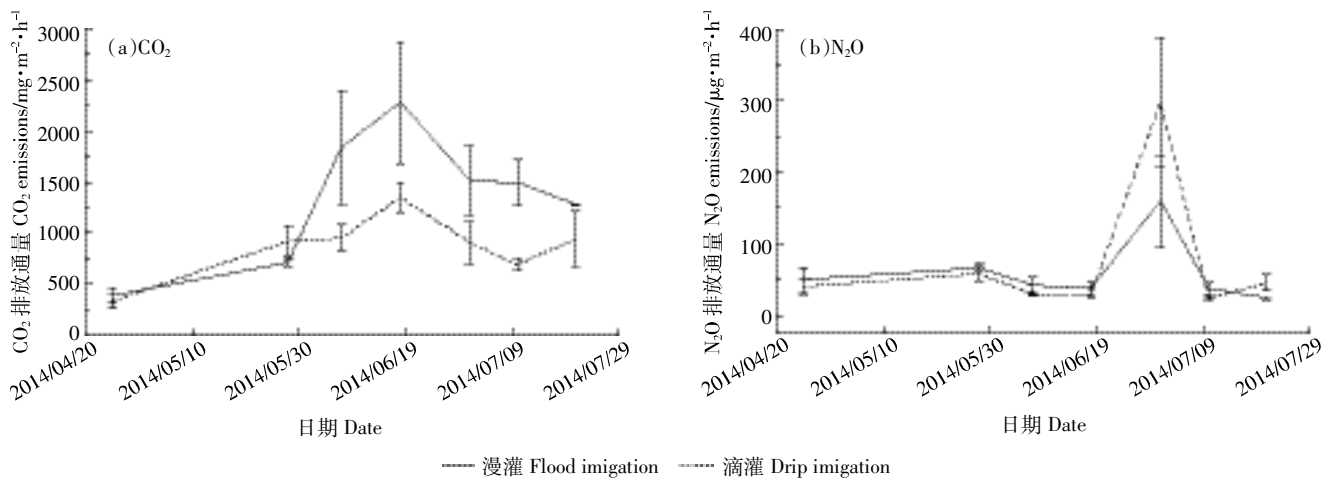


图1 滴灌和漫灌方式下土壤CO₂排放通量及N₂O排放通量分布
Figure 1 Distribution of CO₂ and N₂O emissions under drip and flood irrigation

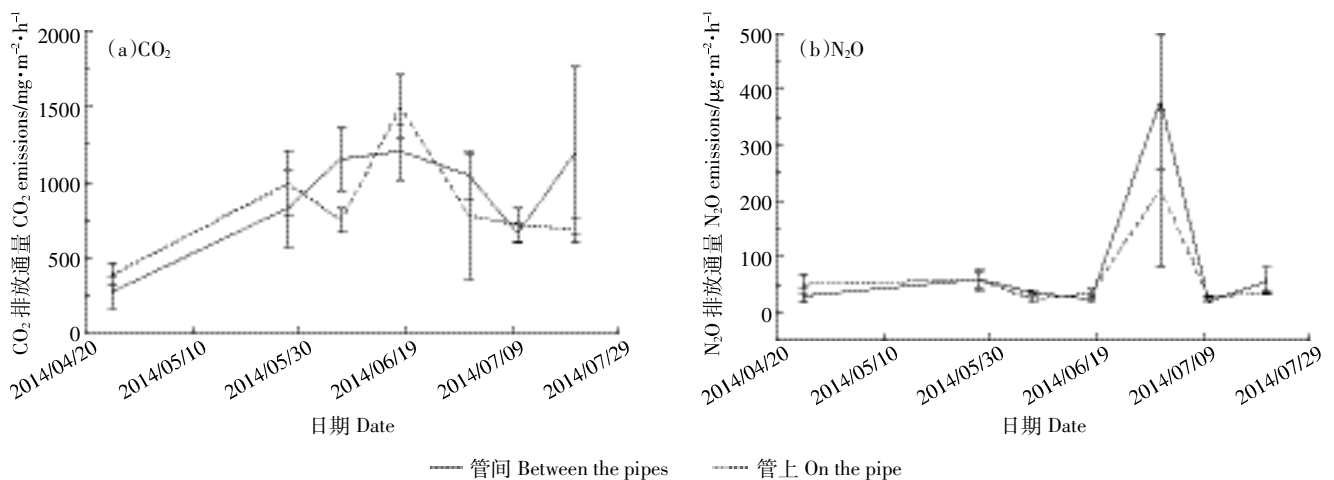


图2 滴灌方式下土壤CO₂排放通量和N₂O排放通量的空间分布
Figure 2 Spatial distribution of soil CO₂ and N₂O emissions under drip irrigation

灌方式下贡献率大于漫灌。

滴灌方式下不同空间位置土壤 N_2O 通量见图 2b。在春小麦乳熟期之前滴灌管间和滴灌管上处理土壤 N_2O 平均排放通量分别为 36.73 、 $40.91 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ；而整个春小麦生长季滴灌管间处理土壤 N_2O 平均排放通量为 $85.76 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ，比滴灌管上处理增加了 34.80% ，处理间无显著性差异。

2.3 土壤 CO_2 和 N_2O 累积排放量及综合增温潜势

在干旱区春小麦生长季，滴灌与漫灌方式下土壤 CO_2 累积排放量分别为 $2\ 188.68$ 、 $3\ 180.91 g \cdot m^{-2}$ ，滴灌方式显著降低了春小麦田的土壤 CO_2 排放量；而滴灌与漫灌方式下土壤 N_2O 累积排放量分别为 188.62 、 $160.60 mg \cdot m^{-2}$ ，即滴灌处理土壤 N_2O 累积排放量比漫灌增加了 17.45% （表 2）。

通常用增温潜势 GWP_s (CO_2 的 GWP_s 值为 1) 来表示相同质量的不同温室气体对温室效应增加的相对辐射效应。对于 100 a 时间尺度的气候变化，设 CO_2 的 GWP_s 为 1，则 N_2O 气体的 GWP_s 为 $310^{[15]}$ 。从表 2 可以看出，滴灌条件下土壤 CO_2 和 N_2O 排放的温室效应总和约比漫灌减少了 $983.55 g CO_2 \cdot m^{-2}$ ，降幅达 30.44% ，即滴灌降低了春小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的综合增温潜势。

表 2 滴灌和漫灌条件下 CO_2 和 N_2O 累积排放量及其综合增温潜势

Table 2 Cumulative emissions and GWP_s of CO_2 and N_2O under drip and flood irrigation

项目	滴灌 Drip irrigation	漫灌 Flood irrigation
$CO_2/g \cdot m^{-2}$	2 188.68a	3 180.91b
$N_2O/mg \cdot m^{-2}$	188.62a	160.6a
$GWP_s/g CO_2 \cdot m^{-2}$	2 247.15	3 230.70

注：不同小写字母表示不同处理间的差异具有显著性 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.4 土壤水分与 MBC、DOC、矿质氮含量

在春小麦生长季，土壤水分含量先升高，至成熟期达到峰值，之后逐渐降低，见图 3。从整个生长季来看，漫灌处理 0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤水分含量的平均值分别为 14.94% 和 16.25% ，滴灌处理 0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤水分含量的平均值分别为 13.36% 和 14.83% 。0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤水分均值均表现为漫灌 > 滴灌管间 > 滴灌管上。

对春小麦生长季土壤 MBC、DOC 和矿质氮的多

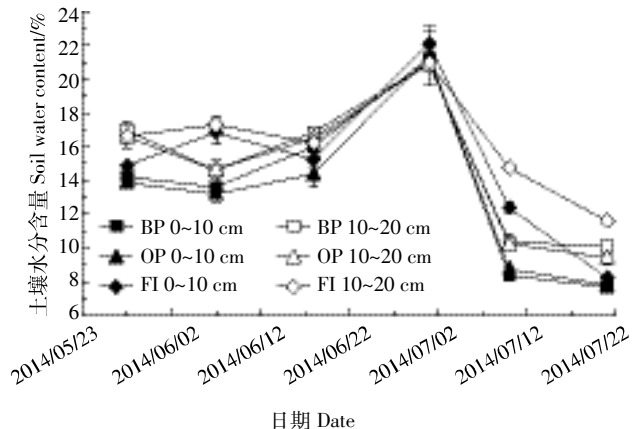


图 3 滴灌和漫灌方式下土壤水分含量变化

Figure 3 Variations of soil water content under drip and flood irrigation

次测定值进行平均，结果见表 3。从表 3 可以看出，滴灌试验区 0~10 cm 土层 MBC 含量均值略高于 10~20 cm 土层，而漫灌试验区 0~10 cm 土层 MBC 平均值则低于 10~20 cm，不同处理间土壤 MBC 含量生长季均值表现为滴灌管上 > 漫灌 > 滴灌管间。滴灌管间、滴灌管上和漫灌处理的 10~20 cm 土层 DOC 含量平均值约比 0~10 cm 土层分别高 11.5% 、 4.9% 和 5.9% ，各层土壤 DOC 含量均表现为漫灌 > 滴灌。对于不同处理土壤硝态氮含量，滴灌试验区 10~20 cm 土壤高于 0~10 cm 层土壤，而漫灌试验区则相反。对比可知，滴灌管间 0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤 $NO_3^- - N$ 含量分别比漫灌高 9.7% 和 37.7% ，滴灌管上 0~10 cm 和 10~20 cm 层土壤 $NO_3^- - N$ 含量分别比漫灌高 3.4% 和 40.2% ，均表现为滴灌 > 漫灌，且滴灌试验区 10~20 cm 土壤 $NO_3^- - N$ 含量较漫灌增加更为明显。土壤 $NH_4^+ - N$

表 3 滴灌和漫灌条件下土壤 MBC、DOC、 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 含量

Table 3 Concentrations of soil MBC, DOC, $NO_3^- - N$ and $NH_4^+ - N$ under drip and flood irrigation

指标	土层	滴灌 Drip irrigation/mg·kg ⁻¹		漫灌/mg·kg ⁻¹
Factor	Soil layer/cm	BP	OP	Flood irrigation
MBC	0~10	132.25±16.65	166.44±36.43	141.22±24.89
	10~20	131.49±16.68	164.34±30.92	156.66±14.23
DOC	0~10	43.38±7.35	45.29±2.79	48.84±2.99
	10~20	48.37±3.00	47.52±3.86	51.74±4.70
NO ₃ ⁻ -N	0~10	6.78±0.89	6.39±1.04	6.18±0.98
	10~20	7.70±1.05	7.84±1.04	5.59±0.90
NH ₄ ⁺ -N	0~10	2.21±0.19	1.59±0.15	1.71±0.14
	10~20	2.59±0.38	1.80±0.17	2.04±0.16

含量则表现为滴灌管间>漫灌>滴灌管上,且10~20 cm土层高于0~10 cm土层,其中,滴灌管间0~10 cm与10~20 cm土层NH₄⁺-N含量分别比漫灌高29.2%和7.5%,而滴灌管上0~10 cm和10~20 cm土层NH₄⁺-N含量则分别比漫灌低7.0%和13.3%。

2.5 环境因子对土壤CO₂和N₂O排放通量的影响分析

相关分析表明(表4),滴灌管间处理土壤CO₂排放通量与大气温度及5、10 cm地温均呈现显著正相关($P<0.05$),与10~20 cm层土壤微生物量碳呈极显著负相关($P<0.01$)。漫灌方式下,0~10 cm和10~20 cm土壤水分均与N₂O排放通量显著正相关($P<0.05$),而滴灌方式下仅滴灌管上处理的0~10 cm土壤水分与N₂O排放通量显著正相关($P<0.05$),其他土壤水分与N₂O排放通量相关性均未达到显著水平,但相关系数较高(R 为0.695~0.740, $P>0.05$);滴灌管间处理10~20 cm土层NH₄⁺-N含量与N₂O排放通量显著正相关($P<0.05$)。除上述因子外,其他环境因子与土壤CO₂和N₂O排放通量相关性均不显著。

3 讨论

3.1 灌溉对农田土壤CO₂排放的影响

对于不同灌溉方式对农田土壤CO₂排放通量的影响,牛海生等^[16]对于旱区冬小麦田进行了研究,认为滴灌麦田的土壤碳排放总量比漫灌麦田高

11.43%,滴灌比漫灌更有利于冬小麦田的土壤呼吸;张前兵等^[17-18]对于旱区棉田土壤呼吸的研究结果也表明,膜下滴灌和漫灌方式下灌溉频率和灌溉量的不同造成土壤含水量变化和灌溉强度均有所差异,滴灌条件下土壤结构破坏程度小,土壤微生物和根系活动增强,而漫灌条件下土壤O₂的扩散受到限制,因此膜下滴灌明显大于漫灌。上述两个研究结果与本研究对春小麦田土壤CO₂排放通量结果有所差异。而李志国等^[19]则认为覆膜滴灌处理棉田年土壤异氧呼吸通量明显小于无膜漫灌,可能与地膜阻隔了土壤气体向大气的扩散及地膜的保水功能有关,且覆膜滴灌土壤水分含量高降低了干湿交替引起的CO₂排放,与本文的研究结果一致。

本研究中,小区域范围内滴灌和漫灌两种灌溉方式下土壤温度差异小,同时,由于没有覆膜的影响,滴灌并未明显增加土壤水分含量,相反滴灌条件下土壤水分含量还小于漫灌。漫灌条件下土壤CO₂排放通量高于滴灌,可能是因为土壤呼吸的温度效应在一定的水分含量范围内随土壤水分含量的增加而升高^[20],在水分作为限制因子的干旱半干旱区,水分和温度共同影响土壤CO₂排放通量^[21-22]。本研究春小麦在抽穗期~成熟收获期,滴灌方式下土壤呼吸速率显著高于漫灌($P<0.01$),与滴灌0~10 cm层土壤微生物量碳含量比漫灌高38.09%一致。韩琳等^[23]的研究也认为滴

表4 滴灌和漫灌条件下土壤CO₂和N₂O排放通量与环境因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil CO₂ and N₂O emissions and environmental factors under drip and flood irrigation

环境因子 Environmental factor	土层 Soil layer/cm	CO ₂ 排放通量 CO ₂ emissions			N ₂ O排放通量 N ₂ O emissions		
		BP	OP	FI	BP	OP	FI
T-air		0.788*	0.426	0.613	0.342	0.234	0.153
T-0 cm	0	0.654	0.238	0.443	-0.006	-0.108	-0.219
T-5 cm	5	0.835*	0.319	0.376	0.021	-0.106	-0.198
T-10 cm	10	0.836*	0.319	0.432	0.076	-0.050	-0.156
SW	0~10	0.221	0.230	0.209	0.739	0.839*	0.838*
	10~20	0.163	0.365	0.144	0.695	0.740	0.849*
MBC	0~10	-0.101	-0.279	-0.068	0.443	0.082	0.422
	10~20	-0.946**	-0.374	-0.745	-0.045	0.249	0.334
DOC	0~10	0.694	0.597	0.237	0.129	-0.242	-0.447
	10~20	0.230	0.106	-0.191	-0.060	-0.021	-0.645
NO ₃ ⁻ -N	0~10	0.265	-0.571	-0.243	0.589	0.008	-0.595
	10~20	-0.399	-0.722	-0.348	0.545	0.558	-0.518
NH ₄ ⁺ -N	0~10	-0.357	-0.257	-0.418	0.030	-0.564	-0.664
	10~20	-0.231	-0.241	-0.257	0.867*	-0.335	-0.026

注:*表示在0.05水平下显著相关;**表示在0.01水平下显著相关。

Note: *Correlation is significant at 0.05 level; **Correlation is significant at 0.01 level.

灌单次灌水量小,适宜的土壤水分有利于微生物的生长,进而有利于微生物生物量碳的增加。在一定的温度范围内微生物活性增强,会加速土壤中有机质的分解,进而增强作物根系和土壤呼吸^[24]。

3.2 灌溉对农田土壤 N₂O 排放的影响

滴灌和漫灌方式下土壤水分的不同分布形式直接影响了土壤的硝化和反硝化反应,这两种反应是土壤中氮氧化物产生的主要途径。国内主要是关于滴灌棉田和菜地 N₂O 排放通量的研究,认为与沟灌或漫灌相比,覆膜滴灌降低了棉田的 N₂O 排放量^[14,25],与常规肥水管理相比,滴灌也降低了蔬菜地土壤 N₂O 排放通量^[26]。国外有少量关于滴灌和沟灌条件下番茄田和瓜田 N₂O 排放通量的研究,Sánchez-Martín 等^[11]认为,滴灌湿润区土壤的硝化反应比反硝化反应更有利,降低了氮氧化物的排放,而沟灌区由于较高比例的厌氧微生物而更有利于土壤反硝化反应,与沟灌相比,滴灌降低了 70% 的 N₂O 排放量,与滴灌造成的低强度灌水和土壤水分分布有关。Sánchez-Martín 等^[6]也认为,与沟灌相比,滴灌减少了甜瓜田土壤 N₂O 的排放和反硝化速率。本研究中春小麦乳熟期之前,土壤水分含量呈增加趋势,且漫灌方式下土壤水分高于滴灌,反硝化作用随着水分含量的增加而加强,N₂O 排放通量也随之增加^[27-29],因此表现为滴灌方式下土壤 N₂O 排放通量小于漫灌。

对整个生长季土壤 N₂O 与各环境因子进行逐步回归分析发现,滴灌和漫灌方式下,土壤硝态氮和铵态氮含量对土壤 N₂O 排放通量影响显著。滴灌方式下土壤总矿质氮含量高于漫灌,与 Sun 等^[30]的研究结果一致,即滴灌减少了氮的淋失。因此就整个生长季而言,滴灌方式下土壤 N₂O 排放通量高于漫灌,可能与滴灌方式下土壤矿质氮底物的增加有关。Li 等^[31]研究认为滴灌后土壤硝态氮在湿润区边缘累积,戴翠荣等^[32]研究认为,水平方向上土壤铵态氮随滴灌水扩散,湿润区外缘铵态氮含量高于湿润区内部,与本研究滴灌管间土壤矿质氮含量高于滴灌管上处理一致,进而导致滴灌管间土壤 N₂O 排放通量高于滴灌管上。在节水灌溉条件下,土壤干湿交替频繁,有利于改善土壤的通气性,增加土壤的有效氧,使得其表层具有良好的通气性,有利于硝化-反硝化进行,从而产生大量的 N₂O^[33]。另外,干湿交替产生的频繁脉冲影响了灌溉期土壤速效氮的转化,增加了灌溉期间氮氧化物的排放^[11]。在春小麦生长季,滴灌和漫灌方式下土壤 N₂O 排放量受排放峰值的影响较大,因而在 N₂O 排放

高峰期,在滴灌处理中实施其他能减少 N₂O 排放通量的措施有助于减缓春小麦生长季滴灌田 N₂O 排放。

由于不同管理措施对大气温室效应的最终影响还取决于生态系统与大气间的碳氮平衡,在今后的研究中,综合作物、土壤对碳/氮元素的吸收与固定以及土壤的碳/氮气态损失等开展同期研究,进而对滴灌造成的生态系统碳/氮收支的变化进行全面评价,将对区域农田温室气体减排措施的制定具有更为重要的指导意义。

4 结论

(1)在春小麦生长季,滴灌处理土壤 CO₂ 排放通量均值比漫灌减少了 35.76%。滴灌管间处理土壤 CO₂ 平均排放通量高于滴灌管上,处理间差异不显著。滴灌管间、滴灌管上均与漫灌处理有显著性差异 ($P<0.05$)。

(2)对整个春小麦生长季而言,滴灌方式下土壤 N₂O 排放通量比漫灌增加 25.87%。滴灌管间处理土壤 N₂O 排放通量均值比滴灌管上处理增加了 34.80%,处理间无显著性差异。

(3)干旱区春小麦田由漫灌转变为滴灌后,土壤 CO₂ 和 N₂O 的综合温室效应减小。

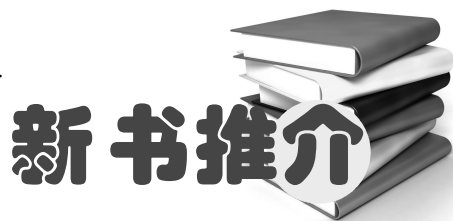
(4)滴灌方式下,滴灌管间处理 10~20 cm 土层 MBC 含量对土壤 CO₂ 排放通量影响显著 ($P<0.01$),滴灌管上处理 0~10 cm 层土壤水分和 DOC 含量、滴灌管间处理土壤铵态氮含量是显著影响土壤 N₂O 排放通量的因素 ($P<0.05$)。在漫灌方式下,土壤 N₂O 排放通量受 10~20 cm 层土壤水分与硝态氮含量的显著影响 ($P<0.05$)。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 王勤花,曲建升,张志强,等. 气候变化减缓技术:国际现状与发展趋势[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 322-327.
WANG Qin-hua, QU Jian-sheng, ZHANG Zhi-qiang, et al. International climate change mitigation technologies: Advances and outreaches [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(6): 322-327.
- [3] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 901-914.
PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHENG Ju-feng, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 901-914.
- [4] Wichern F, Luedeling E, Müller T, et al. Field measurements of the CO₂ evolution rate under different crops during an irrigation cycle in a

- mountain oasis of Oman[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(1):85–91.
- [5] 柴仲平, 梁智, 王雪梅, 等. 不同灌溉方式对棉田土壤物理性质的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(5):57–59.
- CHAI Zhong-ping, LIANG Zhi, WANG Xue-mei, et al. The influence of the different methods of irrigation on the soil physical properties in cotton field[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2008, 31(5):57–59.
- [6] Sánchez-Martín L, Meijide A, García-Torres L, et al. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agricultural Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1):99–107.
- [7] 王荣栋, 何福才, 李明, 等. 农八师滴灌春小麦种植情况调查[J]. 新疆农垦科技, 2008, 5:45–46.
- WANG Rong-dong, HE Fu-cai, LI Ming, et al. Survey on spring wheat planting under drip irrigation in Nongbashi area[J]. *Xinjiang Farm-land Reclamation Science & Technology*, 2008, 5:45–46.
- [8] 高扬, 任志斌, 段瑞萍, 等. 春小麦滴灌节水高产高效栽培技术研究[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(2):281–284.
- GAO Yang, REN Zhi-bin, DUAN Rui-ping, et al. Planting technique for spring wheat with saving water, high yield and high efficiency under drip irrigation system[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(2):281–284.
- [9] 王振华, 王克全, 葛宇, 等. 新疆滴灌春小麦需水规律初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2):61–64.
- WANG Zhen-hua, WANG Ke-quan, GE Yu, et al. Preliminary study on water demand rules of spring wheat under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(2):61–64.
- [10] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3):251–260.
- [11] Sánchez-Martín L, Arce A, Benito A, et al. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7):1698–1706.
- [12] 王艳丽, 李虎, 孙媛, 等. 水肥一体化条件下设施蔬菜地的N₂O排放[J]. 生态学报, 2016, 36(7). doi:10.5846/stxb201409301932.
- WANG Yan-li, LI Hu, SUN Yuan, et al. N₂O emissions from a vegetable field with fertigation management and under greenhouse conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7). doi:10.5846/stxb201409301932.
- [13] Zhang Q B, Yang L, Xu Z Z, et al. Effects of cotton field management practices on soil CO₂ emission and C balance in an arid region of Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(4):468–477.
- [14] Li Z, Zhang R, Wang X, et al. Effects of plastic film mulching with drip irrigation on N₂O and CH₄ emissions from cotton fields in arid land[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2013, 152(4):534–542.
- [15] Bhatia A, Pathak H, Jain N, et al. Global warming potential of manure amended soils under rice–wheat system in the Indo–Gangetic plains[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39:6976–6984.
- [16] 牛海生, 李大平, 张娜, 等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):749–755.
- NIU Hai-sheng, LI Da-ping, ZHANG Na, et al. Effect of irrigation modes on carbon budget in winter wheat field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5):749–755.
- [17] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14):77–84.
- ZHANG Qian-bing, YANG Ling, SUN Bing, et al. Respiration characteristics of cotton soil under irrigation and fertilization measures in arid region[J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14):77–84.
- [18] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12):2420–2430.
- ZHANG Qian-bing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in Arid Region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12):2420–2430.
- [19] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 膜下滴灌对新疆棉田生态系统净初级生产力、土壤异氧呼吸和CO₂净交换通量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4):1018–1024.
- LI Zhi-guo, ZHANG Run-hua, LAI Dong-mei, et al. Effects of drip irrigation with plastic mulching on the net primary productivity, soil heterotrophic respiration, and net CO₂ exchange flux of cotton field ecosystem in Xinjiang, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4):1018–1024.
- [20] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪. 长期施肥插图土壤呼吸的温度和水分效应[J]. 生态环境, 2008, 17(2):693–698.
- MENG Lei, DING Wei-xin, CAI Zu-cong. The effect of temperature and water on soil respiration in long-term fertilized Fluvo-aquic soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):693–698.
- [21] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸[J]. 生态学报, 2008, 28(5):1911–1921.
- ZHANG Li-hua, CHEN Ya-ning, LI Wei-hong, et al. Soil respiration in desert ecosystems of the arid regime[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):1911–1921.
- [22] Buyanovsky G A, Wagner G H, Gantzer C J. Soil respiration in a winter wheat ecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50:338–344.
- [23] 韩琳, 张玉龙, 金烁, 等. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8):1625–1633.
- HAN Lin, ZHANG Yu-long, JIN Shuo, et al. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(8):1625–1633.
- [24] 刘祥超, 王凤新, 顾小小. 水、热对土壤CO₂排放影响的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2):290–295.
- LIU Xiang-chao, WANG Feng-xin, GU Xiao-xiao. Study on the influence of water and temperature on soil CO₂ emission[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(2):290–295.
- [25] Wu J, Guo W, Feng J F, et al. Greenhouse gas emissions from cotton field under different irrigation methods and fertilization regimes in arid Northwestern China[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014:1–10.
- [26] 黄丽华, 沈根祥, 顾海蓉, 等. 肥水管理方式对蔬菜田N₂O释放影

- 响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1319-1324.
- HUANG Li-hua, SHEN Gen-xiang, GU Hai-rong, et al. Simulation of some impacts of fertilization and water management on nitrous oxide emissions from vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1319-1324.
- [27] Liu X J, Mosier A R, Halvorson A D, et al. Dinitrogen and N_2O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2362-2370.
- [28] Sánchez-Martín L, Vallejo A, Dick J, et al. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(1): 142-151.
- [29] 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(6): 1264-1272.
- [30] Sun Y, Hu K L, Zhang K F, et al. Simulation of nitrogen fate for greenhouse cucumber grown under different water and fertilizer management using the EU-Rotate_N model[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 112: 21-32.
- [31] Li J S, Zhang J J, Ren L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source[J]. *Irrigation Science*, 2003, 22(1): 19-30.
- [32] 戴翠荣, 姜益娟, 郑德明. 膜下滴灌和地下滴灌棉田土壤 NH_4^+-N 空间分布特征研究[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(5): 608-612.
- DAI Cui-rong, JIANG Yi-juan, ZHENG De-ming. Research on the spatial distribution characteristic of NH_4^+-N in cotton field soil under-membrane drip irrigation and subsurface drip irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(5): 608-612.
- [33] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294-4300.
- YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH_4 and N_2O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4294-4300.



有机废水处理的基本设计与计算

王光裕 编

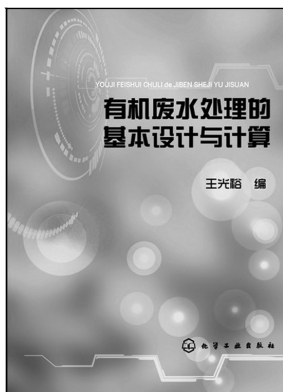
本书分为上、下两篇, 上篇主要介绍有机污染废水处理设计的基本计算方法, 内容包括传统活性污泥法、A-B 两段活性污泥法、缺氧(水解)拟好氧工艺、厌氧拟好氧工艺、厌氧拟缺氧拟好氧工艺、SBR 活性污泥法、氧化沟工艺、接触氧化法、生物流化床、有机污染物废水的特殊生物处理工艺、厌氧生物处理工艺; 下篇主要针对高浓度有机污染物废水的特点, 进一步制订生物处理方案并进行初步基本计算, 内容包括高浓度有机废水常用的预处理方法、高浓度难降解有机废水生物预处理方法、高盐度高浓度污染物废水的处理、高含硫酸盐与氮的有机工业废水处理、含磷有机工业废水的处理、中间体生产废水的处理。

※书号: 9787122254801

※定 价: 98.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2016 年 2 月



绿色环保从我做起丛书——垃圾分类

高英杰 唐在林 主编

《垃圾分类》是《绿色环保从我做起丛书》的分册之一。本书通过生动有趣的漫画和深入浅出的文字, 向读者介绍了垃圾分类对于绿色环保的重要意义、实用的生活垃圾分类法、科学利用可以变废为宝、要养成对随地废弃垃圾说“No”的好习惯、国外垃圾分类的经验分享等精彩内容。

※书号: 9787122247827

※定 价: 29.8 元

※开本: B5

※出版日期: 2016 年 2 月



如需更多图书信息, 请登录 www.cip.com.cn

服务电话: 010-64518888, 64518800(销售中心)

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

邮购地址: (100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著, 请与编辑联系, 联系电话: 010-64519525。