

模拟栽培条件的改变对稻田主要 温室气体排放的影响

孙园园^{1,2}, 孙永健^{3,4}, 杨志远^{3,4}, 徐 徽^{3,4}, 马 均^{3,4}, 李首成^{2*}

(1. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 2. 四川农业大学农学院, 四川 温江 611130;
3. 农业部西南作物生理、生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130; 4. 四川农业大学水稻研究所, 四川 温江 611130)

摘 要: 利用 IKONOS 高分辨率(1 m)卫星遥感图,运用典型抽样和地形→土地利用→土地覆盖→综合信息提取的方法,选定了川中丘陵区代表区域,通过对研究区域农业生产情况、土样、水样和气象资料的调查和分析,利用 DNDC 模型模拟农户作物生产条件下稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放情况,在此基础上,通过改变目前的研究区域冬水田(PF)(PF 占研究区域面积的 58.07%)生产条件中的某一影响因子,进一步研究这一因子的改变对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放的影响及全球增温潜势(GWP)变化情况。结果表明:氮肥种类和数量、有机肥种类和动物粪尿投入数量、晒田和不晒田、耕地深度、年平均气温变化、降雨量变化、土壤 pH 值变化、土壤有机质含量变化、土壤质地变化均对稻田温室气体排放有较为显著的影响。冬水田(PF)、水稻-油菜田(RR)和水稻-小麦田(RW)全年排放 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的综合 GWP:RW>RR>PF。

关键词: 稻田;温室气体排放;栽培条件;DNDC 模型;全球增温潜势
中图分类号: S511;X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0181-09

Simulation of greenhouse gas emissions as affected by cultivation practices in rice fields

SUN Yuan-Yuan^{1,2}, SUN Yong-Jian^{3,4}, YANG Zhi-yuan^{3,4}, XU Hui^{3,4}, MA Jun^{3,4}, LI Shou-Cheng^{2*}

(1. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu, Sichuan 610072, China;
2. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, wenjiang, Sichuan, 611130, China;
3. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and cultivation in southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China;
4. Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China)

Abstract: Using the high resolution(1 m) IKONOS satellite and employing typical sampling and terrain→land use→land cover→comprehensive information extraction method, representative of the middle Jintang hilly area feature were selected. Detailed farmer investigations were carried out, including crop diversity, tillage, fertilizer, manure type, irrigationsoil pH, meteorological data. Emissions of CO₂, N₂O and CH₄ emissions of rice fields with farmers crop production conditions simulated using DNDC model. In-depth analysis of factors contributing to emissions of CO₂, N₂O, CH₄, and global warming potential (GWP)was performed by changing a factor of production conditions of the winter water paddy rice field (winter paddy field area accounts for 58.07% of the area of research) in the target area. The results show that nitrogen fertilizer, organic fertilizer number and variety types, animal dung urine into quantity, middle-stage drainage, depth of cultivated fields, average temperature, rainfall, soil pH, content of soil organic matter, soil texture have significant influence on greenhouse gas emissions in paddy field. GWP of CO₂, CH₄, and N₂O emissions of one year from three kinds of paddy field-permanently flooded paddy fields (PF), rapeseed-paddy rice fields (RR) and winter wheat-paddy rice fields (RW) were in the order of RW>RR>PF.

Keywords: rice field; greenhouse gas emission; cultivation practices; DNDC Model; global warming potential(GWP)

收稿日期:2013-06-11
基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13); 美国国家科学基金(NSF)项目(DEB20075617); 中国气象局西南区域气象中心区域重大项目(2010-7); 农业部作物生理生态与耕作重点实验室开放课题、四川省教育厅资助科研项目(10ZA047); 四川省育种攻关专项(2011NZ0098-15)
作者简介: 孙园园(1981—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为农业气象、作物栽培。E-mail: yty21@163.com。
* 通信作者: 李首成(1958—), 男, 博士, 教授, 研究方向为生态农业。E-mail: lsc5101@yahoo.com.cn。

川中丘陵区是四川的主要农耕区和农业商品基地,人均耕地少,土地经营相当零散,争地矛盾和水土流失严重等不利条件,导致该区初级生产潜力受限,农业生态系统的可持续性受到严重威胁。研究川中丘陵区人为活动与自然过程的相互作用,探索影响 CO_2 等温室气体的排放量与差异性和生物地球化学循环变化的机制,有助于全球变化驱动力的分析,更有助于加强对该区生态系统管理理念和途径的探讨,使之与全球发展相协调,实现可持续发展;不仅可以更精确地找到全球变化的人为驱动因子,更能对村级生态系统管理,实现农村土地资源利用和管理与环境协调的有效结合,促进作物生态安全,保护生态环境和农业可持续发展,为建立高产、低温室气体排放量的农业生产体系,为我国履行京都议定书提供依据。20 世纪 90 年代以来,研究人员对中国不同地区稻田温室气体排放进行了一些测定,并取得了很大进展。国内外大量研究表明:土壤、施肥、管理措施、气象条件等均可对温室气体排放产生显著影响^[1-18],其中,许多研究者进行了不同影响因素对稻田温室气体排放的试验研究^[1-8,10-13,15-16],如科研人员进行了稻麦轮作系统稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放、吸收规律及交换量研究,并运用增温潜势进行了温室效应估算^[1]、应用稳定碳同位素进行 CH_4 排放和溶解土壤的实验^[2]、稻麦两熟制农田不同土壤耕作方式对稻季甲烷排放的影响^[3]、多种田间管理措施综合影响下双季稻田温室气体平均排放通量与土壤微生物菌群的多元回归关系^[4]、浮萍对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响^[5]、探讨水旱轮作水稻季秸秆沟埋还田方式下不同埋草量对越冬稻田土壤 CO_2 排放的影响^[6]、对水稻-油菜连作田冠层 CO_2 通量进行周年观测,研究该系统 CO_2 源、汇的季节和日变化规律^[7]、免耕条件下的稻草高茬和覆盖还田对双季稻田温室气体排放强度的影响^[8]、基于长江中下游稻麦轮作体系的氮肥施用田间试验,采用 DNDC 模型研究了气候条件、土壤属性、农业管理等输入因素的不确定性对籽粒产量、作物氮吸收、氮挥发、 N_2O 排放等预测结果的影响^[9]、持续淹水稻田冬季休闲期和水稻生长期 CH_4 排放通量及其稳定性碳同位组成的时间变化^[10]、通过影响土壤中参与温室气体产生和吸收过程的微生物的种群结构多样性或活性影响温室气体的排放^[11]、选用玉米秸秆在不同热解温度制成的生物质炭施入水稻土进行培养,分析各处理的 CH_4 排放量和甲烷菌、甲烷氧化菌丰度^[12]、对晚稻期间秸秆还田配施减量化肥和施化肥处理后后季早稻田的 CH_4 和 N_2O 排放通量进行观

测^[13]、收集江苏省内稻麦轮作体系水稻田 59 个样点的与 CH_4 排放相关的信息,以 CH_4MOD 模型模拟了 CH_4 排放,比较了几种尺度扩展方法的结果^[14]、对晚稻田在常规施肥、常规施肥+秸秆原位焚烧处理下的 CH_4 和 N_2O 排放通量进行观测,根据设定参数对秸秆焚烧排放的 CH_4 和 N_2O 进行估算^[15]、研究猪粪、沼液替代化肥条件下稻田 CH_4 和 N_2O 排放特征^[16]等的相关研究。也有学者通过模型模拟稻田温室气体的排放^[9,10]。但利用目前不同土壤、施肥等条件下测定的有限的温室气体排放资料,还无法准确分析出各因子对温室气体排放的影响,以及未来气候变化后温室气体排放的演变趋势。而且气象、土壤、耕作管理措施等条件很难改变,且实验周期长,人力、物力耗费巨大。所以,本文运用现有的土壤 C、N 循环模型——DNDC 模型,在目前稻田温室气体排放规律的基础上,模拟不同的土壤、管理措施、气象等各种因子对温室气体排放的影响。

1 研究对象及方法的确定

1.1 试验研究区域的选取及概况

首先利用覆盖川中丘陵区的 Landsat ETM+ 土地覆盖图,以 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 进行网格分区,在剔除了水域面积比例大于 75% 或城镇面积比例大于 25% 的区格之后,对川中丘陵区 and 待选研究区域进行最大可能的监督分类和聚类^[19-20],最后选取了四川省金堂县东南方向云合镇与简阳市北部踏水镇一带($30^\circ 30' 9.46'' \sim 30^\circ 37' 54.54''\text{N}$, $104^\circ 34' 12.79'' \sim 104^\circ 42' 36.41''\text{E}$),约 100 km^2 作为研究区域,并以该研究区域类特征信息与川中丘陵地区类特征信息进行比较,选取样点见图 1。

选取金堂县的新桥村、金桥村、沙河村、添定村、光华村为样点区。该区海拔 $385 \sim 550\text{ m}$,以紫色土为主,其中棕紫泥旱地和水田占 96.1%。水田一年一熟或两熟,旱地一年三熟或两熟,复种指数达 240.6%。丘坡较陡,土质疏松,不耐冲刷,缺乏植被保护,水土流失严重,地表径流偏低,水资源不足且分布不均,年均降水量 800 mm 左右,年均温 16.6°C ,年总积温 $6\,220^\circ\text{C}$,有效积温 $5\,606^\circ\text{C}$ 。

研究区域的选择标准和典型调查村的选取参见文献[1]。

1.2 研究内容和方法

1.2.1 DNDC 模型运行所需数据的采集 本文对研究区域内 100 个农户的农户资料及种植制度资料(353 块稻田,共 5.11 hm^2)进行了详细的调查和统计分析,具体方法参见文献[17]。通过研究区域农户

的调查资料,利用 DNDC 模型分析了农户作物生产条件下 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量;在此基础上,通过改变目前研究区域冬水田(冬水田占研究区域面积的 58.07%)生产条件中的某一影响因子,进一步研究这一因子的改变对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放的影响及全球增温潜势(GWP)变化情况。

1.2.2 数据分析软件 主要运用 DNDC 模型、Excel 2003 软件和 SPSS 10.0 软件分析数据。

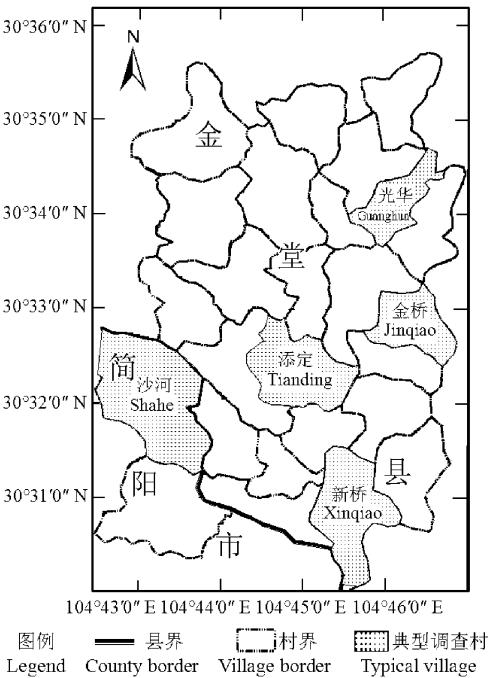


图 1 基于高分辨率(1 m)IKONOS 卫星图的
研究区域和样区分布

Fig.1 Geographical distribution of sampling plots and area of interest(AOI) based on IKONOS image of high resolution(1m)

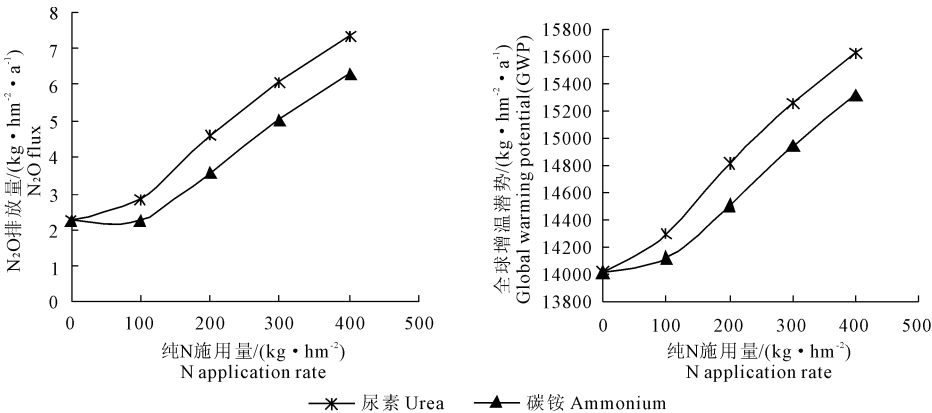


图 2 尿素和碳铵用量变化对 N₂O 排放和 GWP 的影响

Fig.2 Variations in N₂O emissions and GWP under different rate of urea and ammonium nitrogen fertilizers

2.1.2 有机肥种类和动物粪尿投入数量对温室气体排放的影响 分析农家肥(A)、绿肥(B)、稻草秸秆肥料(C)、液体动物粪尿(D)、混合肥料(堆肥)(E)

2 结果与分析

国内外大量研究结果表明:土壤、施肥、管理措施、气象条件等均可对温室气体排放产生显著影响^[1-18],分析总结这些相关结论,并结合 DNDC 模型,进行栽培条件、气象因子等的变化对温室气体排放影响的相关分析。由于有的因子的改变对某种或某几种温室气体的排放几乎没有影响,下文仅列出因为这些因子的改变而变化较大的温室气体排放情况。

2.1 模拟栽培条件的改变对主要温室气体排放的影响

2.1.1 氮肥种类和数量的变化对温室气体排放的影响 以大田常用的两种氮肥——尿素、碳铵为例,设施用量(折纯氮)0,100,200,300,400 kg·hm⁻²五个处理。对不同氮肥种类和施氮量分析发现,CO₂ 排放量变化范围为 4 105.1 ~ 4 124.5 kg·hm⁻²·a⁻¹; CH₄ 排放量变化范围为 402.2 ~ 406.6 kg·hm⁻²·a⁻¹,表明不同形式的氮肥和不同投入量的处理间 CO₂ 和 CH₄ 排放量差异不显著;但不同氮肥种类和施氮量对 N₂O 的排放量影响较大,随着氮肥用量的增加显著增加(图 2)。氮肥施用量(折纯 N)大于 200 kg·hm⁻²,N₂O 排放量均随每百千克纯氮的投入量增加呈极显著增加;施氮量小于 200 kg·hm⁻²时,处理间 N₂O 排放量,碳铵无显著差异,而尿素显著差异(*P* < 0.05),主要由尿素的含氮量高和不稳定性造成。

施用对温室气体排放的影响。结果(图 3)表明,相同碳含量有机肥的施用条件下,CH₄ 排放量:农家肥 ≧ 绿肥 ≧ 稻草秸秆 ≧ 动物粪尿 ≧ 堆肥;N₂O 排放量:

动物粪尿>>农家肥≈绿肥>稻草秸秆≈堆肥;GWP:

农家肥>>动物粪尿>绿肥>堆肥>稻草秸秆。

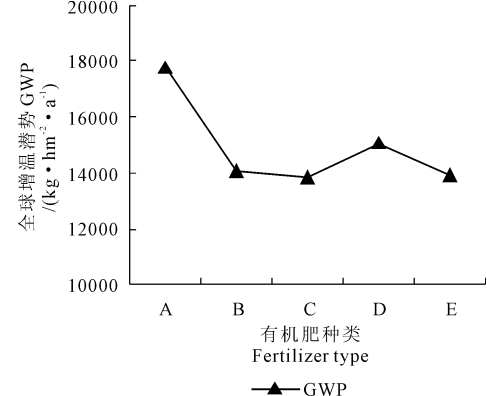
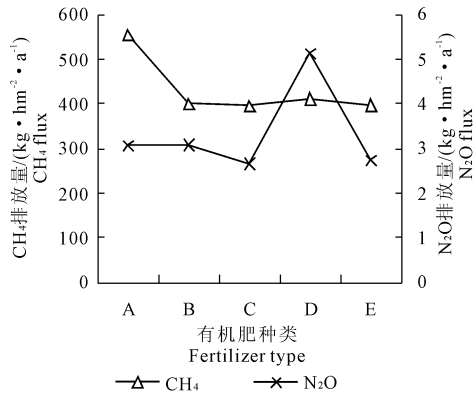


图 3 有机肥种类变化对 CH₄、N₂O 排放量和 GWP 的影响

Fig.3 Variations in CH₄、N₂O emissions and GWP from PF under the five kinds of organic fertilizers

从研究区域农户调查结果来看:农户投入的有机肥主要为液体动物粪尿(猪粪尿、人粪尿及少量的羊和兔厩肥),因此应有针对性地对动物粪尿的投入量进行进一步分析。设每公顷施液体动物粪尿的施肥量为 0、5 000、10 000、15 000、20 000 kg 来研究温室气体的排放。结果(图 4)表明:随液体动物粪尿施入量的增加,CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量均呈增加趋势,且 CO₂ 和 N₂O 的排放量随动物粪尿用量的增

加而成倍增加,CH₄ 排放量增加也较大,GWP 增势明显。主要是因为动物粪尿的施用给土壤带来了大量的碳素和氮素,加速了植株的生长和根系活动,且为土壤动物和微生物提供了养料,土壤动物和微生物的种类、数量和活性大大增加。施用有机肥一方面为土壤产生甲烷菌提供了基质,另一方面新鲜有机物质的快速分解加速了土壤淹水后氧化还原电位的下降,为产甲烷菌的生长提供环境条件。

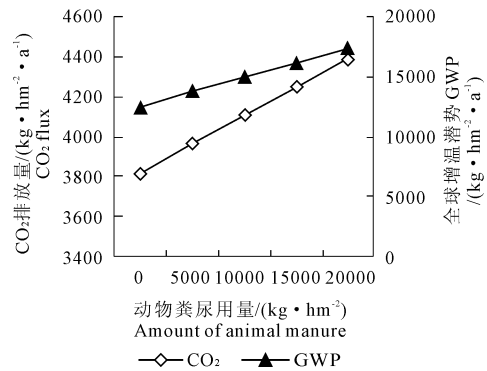
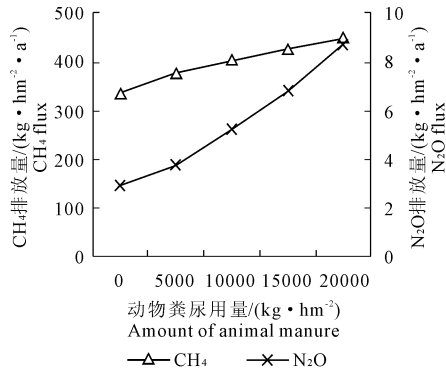


图 4 动物粪尿用量变化对 CO₂、CH₄、N₂O 排放量和 GWP 的影响

Fig.4 Variations in CO₂、CH₄、N₂O emissions and GWP from PF under the different rate of livestock manure

2.1.3 晒田和不晒田对温室气体排放的影响 PF 采用专家的晒田方法,CH₄ 排放量减少 27.57%; N₂O 排放量由 5.12 kg·hm⁻²·a⁻¹增加到 9.70 kg·hm⁻²·a⁻¹;CO₂ 排放量由 4 123 kg·hm⁻²·a⁻¹增加到 4 276 kg·hm⁻²·a⁻¹;GWP 下降 9.10%(见图 5)。适当的间歇晒田是减少 CH₄ 排放的理想措施,因为晒田会导致土壤氧化还原电位(Eh)增高而抑制 CH₄ 的产生和排放,且土壤的干湿交替会杀死产 CH₄ 菌和其它有关微生物,从而降低稻田 CH₄ 排放。

2.1.4 耕作深度对温室气体排放的影响 以耕地深度分别为 0、5、10、20 cm 为研究对象,研究温室气体的排放情况。结果(图 6)表明:(1) 随着耕作深度的增加,CH₄ 的排放量下降,可能是因为耕作深度的增加使土壤的厌氧环境被破坏;(2) 土壤耕翻造成 N₂O 排放量在 0~10 cm 范围内,随着耕作深度的增加而增加。(3) 随着耕作深度的增加,CO₂ 的排放量逐渐增加,增加的 CO₂ 主要是土壤释放的,根系释放的 CO₂ 几乎没有增加,因为耕作深度增加,导致土壤的疏松、透气性增大,土壤气体易与大气进行交换。

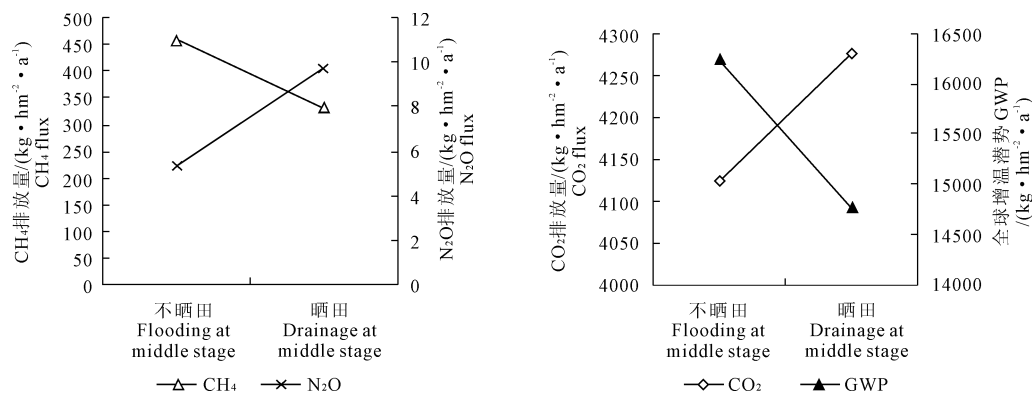


图 5 晒田和不晒田对 CO₂、CH₄、N₂O 排放量和 GWP 的影响

Fig.5 Variations in CO₂、CH₄ and N₂O emissions and GWP from PF of the drainage and flooding at middle stage

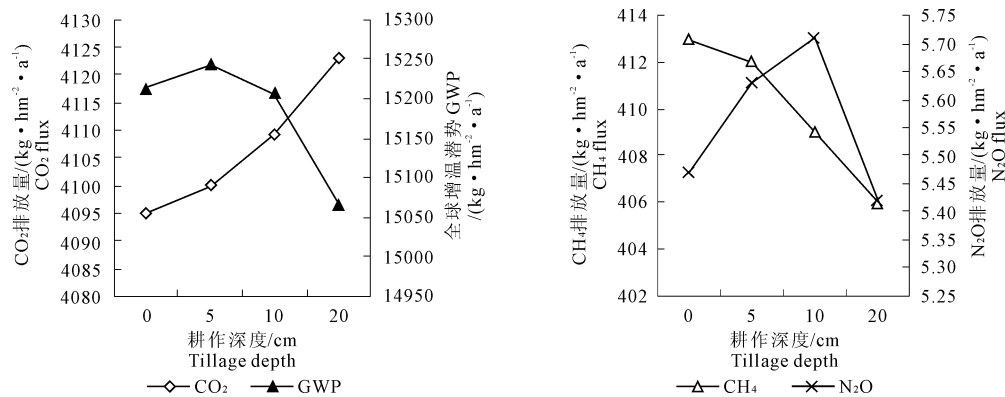


图 6 耕作深度变化对 CO₂、CH₄、N₂O 排放量和 GWP 的影响

Fig.6 Variations in CO₂、CH₄、N₂O emissions and GWP from PF under the different depths of tillage

2.1.5 年平均气温变化对温室气体排放的影响

模拟年平均气温(17.66℃)减少和增加 1℃、2℃时温室气体的排放情况。结果(图 7)表明:随着年平均气温的增加,各温室气体的年排放量均增加,主要是因为,随着温度的增加植株生长加速,根系活性加大,土壤微生物增加,呼吸速率加大。气温的增加也加快了土壤温室气体的释放。平均温度增加 1℃时,CO₂ 和 CH₄ 的增加不显著,而 N₂O 呈显著增加情况,平均温度减少 1℃时,CO₂ 和 N₂O 均呈显著减少

情况,而 CH₄ 的减少不显著;温度增加(减少)2℃时,各种温室气体的排放量增加(减少)均达到极显著水平。另一方面,稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量的增加引起了综合 GWP 的迅速增加,温度的增加引起 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量的增加,排放量的增加又会引起温室效应的增强从而引起温度的升高,它们之间是一种正反馈的效应。所以,必须寻找有效的减排措施减少温室气体的排放。

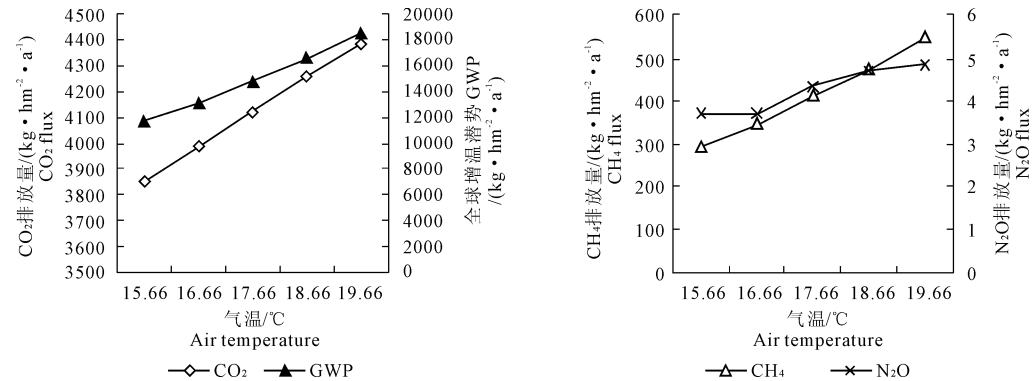


图 7 温度变化对 CO₂、CH₄、N₂O 排放量和 GWP 的影响

Fig.7 Variations in CO₂、CH₄、N₂O emissions and GWP from PF under different temperature regimes

2.1.6 降雨量变化对温室气体排放的影响 以年降雨量(763.8 mm)为基础,研究减少和增加 10%、20%年降雨量的温室气体排放情况。结果(图 8)表明:随着降雨量的增加,对 CO₂(4 120 ~ 4 123 kg·hm⁻²·a⁻¹)和 CH₄(403 ~ 408 kg·hm⁻²·a⁻¹)排放量影响不大,而 N₂O 的排放量逐渐减少,其可能原因是:降雨量的增加使土壤水层增厚,土壤环境的厌氧性

程度加大。GWP 随年降雨量的增加而下降,主要由 N₂O 排放量的变化引起。

2.1.7 土壤 pH 值的变化对温室气体排放的影响 土壤 pH 值的变化对 CO₂(4 097 ~ 4 101 kg·hm⁻²·a⁻¹)和 CH₄(401 ~ 405 kg·hm⁻²·a⁻¹)排放量影响不大,而 N₂O 的排放量随 pH 值的变化呈“抛物线”形状,是导致 GWP 变化的主要因子(图 9)。

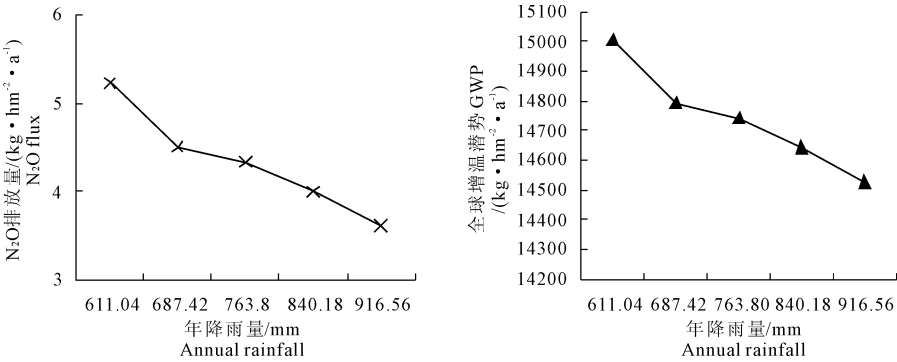


图 8 降雨量变化对 N₂O 排放量和 GWP 的影响

Fig.8 Variations in N₂O emissions and GWP from PF with annual rainfalls

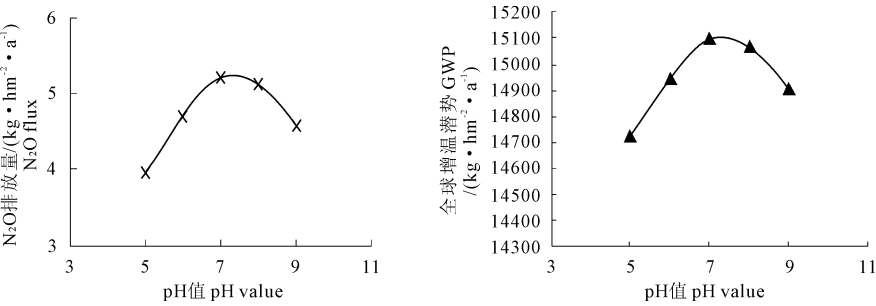


图 9 土壤 pH 值变化对 N₂O 排放和 GWP 的影响

Fig.9 Variations of N₂O emissions and GWP from PF with soil pH values

2.1.8 土壤有机质含量的变化对温室气体排放的影响 模拟土壤有机质含量为 0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%的条件下温室气体的排放情况。结果表明(图 10):随着土壤有机质含量的增加,CO₂ 的排放量极显著增加,N₂O 的排放量显著增加,而 CH₄ 气体的排放量增加不显著。主要是因为微生物在分解有机质的过程中产生大量的 CO₂。有机质在改善土壤物理性质方面具有多种功能,促进土壤团粒结构的形成,调节土壤中的养分、水分和空气之间的矛盾,创造植物生长发育所需的良好条件。土壤有机质还可以降低粘土的粘结力,增加砂土的粘结力,改善不良质地土壤的耕作性能。此外,有机质对改善土壤的渗水性,减少水分蒸发等都有明显的作用。土壤有机质含量增加,改善了土壤的理化性质,增加

了土壤养分,使土壤动物和土壤微生物的种类和数量增加,土壤通气性改善,根系的呼吸作用增加。而 CH₄ 的排放主要是因为土壤处于淹水状态,厌氧环境才会使产甲烷菌活性增加,加大 CH₄ 的排放量,而有机质含量的增加和土壤的淹水状态没有联系。

2.1.9 土壤质地变化对温室气体排放的影响 砂土(A)、壤砂土(B)、砂壤土(C)、粉砂壤土(D)、壤土(E)、砂粘壤土(F)、粉粘壤土(G)、粘壤土(H)、砂粘土(I)、粉粘土(J)、粘土(K)、有机土(L),粘土分数(%)分别为:3、6、9、14、19、27、34、41、43、49、63、6。图 11 表明:(1)从 CO₂ 排放量来看,砂土、壤砂土、砂壤土、粉砂壤土间 CO₂ 排放量存在极显著差异,壤土、砂粘壤土间 CO₂ 排放量存在显著差异,随着土壤粘性的继续增大,土类间 CO₂ 排放量差异不显著。

(2) 粘质土壤 CH_4 排放较少的原因可能是其对有机质有较强的保持作用,对氧化还原电位(Eh)变化的缓冲作用较强,气体扩散也较慢。(3) 从 N_2O 排放量来看,硝化和反硝化作用的相对强弱以及 N_2O 在土壤中的扩散速率受土壤通透性和水分含量影响。

随着土壤粘性的增大,各种温室气体的排放呈下降趋势,主要原因是:砂土的通透性好,土壤空气中的氧气含量多,根系呼吸速率大,土壤气体容易扩散到大气中。粘土通透性差,土壤空气中的氧气含量少,土壤动物和微生物种类和数量少,活性差。

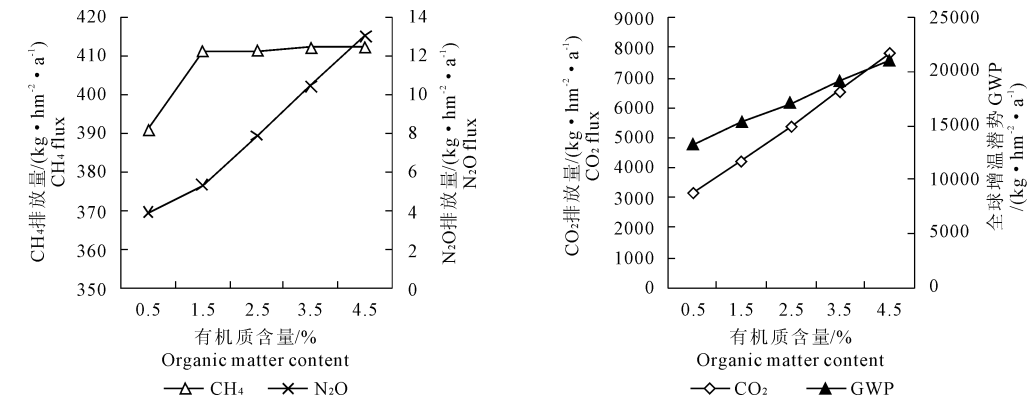


图 10 土壤有机质含量变化对 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放量和 GWP 的影响

Fig. 10 Variations of CO_2 、 CH_4 、 N_2O emissions and GWP from PF with soil organic C contents

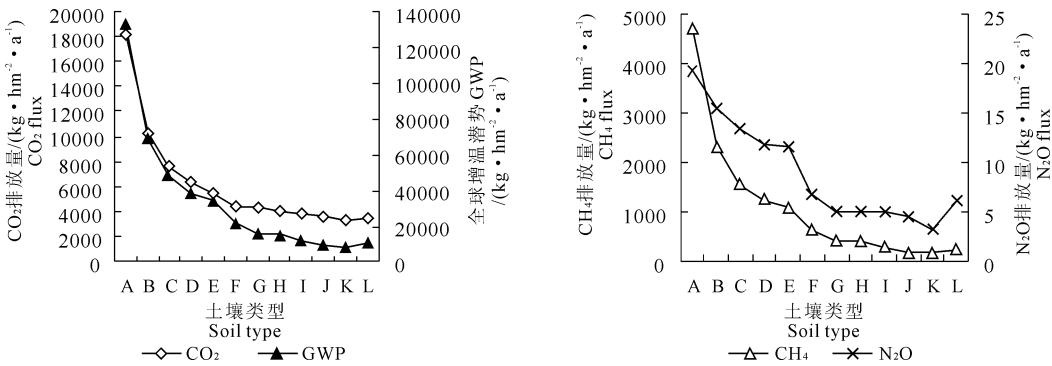


图 11 土壤质地对 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放量和 GWP 的影响

Fig. 11 Variations of CO_2 、 CH_4 、 N_2O emissions and GWP from PF with soil textures

2.2 不同种植制度稻田的 GWP

目前国际通用的温室气体增温潜势表示方法为:在百年时间尺度上,单位质量 CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 CO_2 的 23 倍和 296 倍,取 CO_2 $1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 $\text{GWP}=1$,可以得出各种处理情况下 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP。

PF、RR 和 RW 全年所排放的 CH_4 和 N_2O 所产生的综合 GWP 分别为:10 968.5、8 577.4 和 7 743.5, CH_4 和 N_2O 的综合 GWP: $\text{PF}\gg\text{RW}>\text{RR}$ 。PF 改为水旱轮作制度后能大大减少 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP。而 PF、RR 和 RW 全年所排放的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 所产生的综合 GWP: $\text{RW}>\text{RR}>\text{PF}$ 。

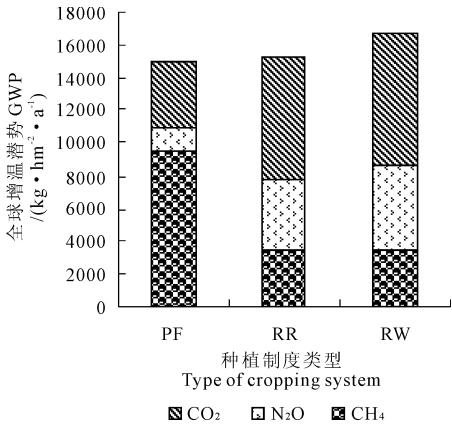


图 12 不同种植制度稻田的 GWP

Fig. 12 CO_2 equivalents (GWP) from PF of three cropping systems

3 结论与讨论

1) 本研究表明,随着耕地深度(耕地深度分别为 0 cm、5 cm、10 cm、20 cm)的增加,CH₄ 的排放量下降。与 Ussiri 等^[21]的结论相同,他认为,土壤中 CH₄ 的释放与土壤温度呈反比关系,因此免耕引起土壤温度降低可能在一定程度上促进了 CH₄ 的释放。而代光照等^[22]的研究表明,与翻耕不施肥相比,免耕不施肥显著提高了 CH₄ 的排放量;与翻耕施肥相比,免耕施肥仅略降低了 CH₄ 的排放量,表明耕地深度对 CH₄ 排放量的影响还与施肥量有关。与郑建初等^[3]的试验结果不同(表现为麦季免耕 + 稻季翻耕 > 麦季免耕 + 稻季旋耕 > 麦季翻耕 + 稻季翻耕 > 麦季旋耕 + 稻季翻耕 > 麦季翻耕 + 稻季旋耕 > 麦季旋耕 + 稻季旋耕),与李成芳等^[23]、Harada H 等^[24]的试验结果不同(稻田免耕能减少 CH₄ 排放)。还有研究表明,与传统耕作相比,采用免耕方式有利于土壤有机碳的积累^[25-27],但是,究竟是因为耕作深度的增加使土壤的厌氧环境被破坏,还是耕作破坏了土壤原有结构降低了土壤对 CH₄ 的氧化,降低了土壤 CH₄ 汇集的程度,或者是在稻田免耕条件下,更多的毛孔连贯在一起,更有利于甲烷氧化菌的存在,其原因还有待于进一步研究。

2) 本研究表明,土壤耕翻造成 N₂O 排放量在 0 ~ 10 cm 范围内随着耕作深度的增加而增加,这可能与土壤的 N₂O 产生过程主要发生在 0 ~ 10 cm 土层上有关,与郑循华等^[28]的试验结果相似。本研究还表明,在耕地深度达 20 cm 时(近似于翻耕的耕地深度),造成 N₂O 排放量减少;代光照等^[22]的研究表明,与翻耕不施肥相比,免耕不施肥显著降低了 N₂O 的排放量;与翻耕施肥相比,免耕施肥略提高了 N₂O 的排放量,表明耕作深度对 N₂O 排放量的影响还与施肥量有关,其变量关系和变化原因还有待进一步研究。

3) 本研究表明,N₂O 排放量随着氮肥用量的增加显著增加,而 CH₄ 的排放量变幅不大;随液体动物粪尿施入量的增加,CH₄ 和 N₂O 的排放量均显著提高;这与代光照等^[22]施肥显著提高了稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放的结论相似。

4) 本研究表明,随着土壤有机质含量的增加,CH₄ 的排放量先显著增加而后增加不显著;土壤 pH 值的变化对 CH₄ 排放量影响不大;徐华等^[29]的研究表明,土壤 CH₄ 产生量受与土壤有机质含量有关的有机碳和全氮含量的显著影响,与颗粒组成、土壤

pH 等其它土壤理化性质之间无显著相关性,表明土壤有机质含量是影响 CH₄ 产生的最重要土壤性质。而 Wassmann 等^[30]和 Wang 等^[31]认为,在土壤样品空间分布较小的情况下,土壤 CH₄ 产生量不仅与土壤有机碳和全氮含量显著相关,还与颗粒组成和土壤 pH 显著相关。

5) 本研究表明,土壤 pH = 7 左右时,N₂O 的排放量最大,可能是因为在土壤的酸碱度为中性时,微生物种类和数量大,活性高。pH 值主要取决于土壤本身的物理化学性质,而且各地的土壤 pH 值相差很大。因此,要改变土壤的 pH 值来减少二者的排放是不可行的,但是在某些地方的酸雨过程可以影响土壤的 pH 来增加或减少 N₂O 的排放。2011 年,全国酸雨分布区域主要集中在长江以南、青藏高原以东地区,酸雨发生面积约 120 万 km²^[32]。这一点还是应该引起注意的。

6) 本研究表明,随着降雨量的增加,N₂O 的排放量逐渐减少,与袁伟玲等^[33]“间歇灌溉稻田 N₂O 累积排放量显著高于长期淹灌稻田”的试验结果类似。

由于土壤是由各种颗粒状矿物质、有机物质、水分、空气、微生物等组成的相当复杂的环境体系,所以其温室气体的排放过程和排放量的影响因素很多,过程复杂,有待于进一步研究。

虽然两季田的总的增温潜势较冬水田略高,但作物只收获一季,且冬水田的 CH₄ 和 N₂O 总的增温潜势较两季田的高。释放的 CO₂ 有利于植株周围 CO₂ 浓度的增加,部分 CO₂ 会被植株再次吸收利用,形成光合产物。而 N₂O 破坏臭氧层,对人体健康不利。与同期水旱轮作相比,冬水田休闲既增大了 CH₄ 排放量,又少一季收获量,无论从社会效益还是从经济效益上来说都是不利的。

参考文献:

- [1] 侯玉兰,王 军,陈振楼,等.崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究[J].农业环境科学学报,2012,31(9):1862-1867.
- [2] Zhang Xiao-yan, Zhang Guang-bin, Ji Yang. Straw application altered CH₄ emission, concentration and ¹³C - isotopic signature of dissolved CH₄ in a rice field[J]. Pedosphere, 2012,22(1):13-21.
- [3] 郑建初,陈留根,张岳芳,等.稻麦两熟制农田稻季温室气体甲烷及养分减排研究[J].江苏农业学报,2012,28(5):1031-1036.
- [4] 秦晓波,李玉娥,石生伟,等.稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析[J].生态学报,2012,32(6):1811-1819.
- [5] 马永跃,王维奇,曾从盛.浮萍对福州平原稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响分析[J].中国生态农业学报,2012,20(6):723-727.
- [6] 高文玲,卞新民,吴 洁,等.沟埋还田方式下不同埋草量对冬

季稻田 CO₂ 排放的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(3):295-300.

[7] 苏荣瑞, 刘凯文, 耿一风, 等. 江汉平原稻-油连作系统冠层 CO₂ 通量变化特征[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3):362-367.

[8] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):210-216.

[9] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 稻麦轮作农田氮素循环的 DNDC 模型分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1):77-88.

[10] 张晓艳, 张广斌, 纪洋, 等. 冬季淹水稻田 CH₄ 排放通量及其 $\delta^{13}\text{C}$ 的时间变化特征[J]. 土壤学报, 2012, 49(2):296-302.

[11] Liu Yu-xue, Yang Min, Wu Yi-min, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11:930-939.

[12] Feng You-zhi, Xu Yan-ping, Yu Yong-chang, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 46:80-88.

[13] 石生伟, 李玉娥, 秦晓波, 等. 晚稻期间秸秆还田对早稻田 CH₄ 和 N₂O 排放以及产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(2):336-341.

[14] 郭森, 逆超普, 蔡祖聪, 等. 温室气体排放量空间尺度扩展方法的误差来源分析——以 CH₄MOD 模型为例[J]. 土壤学报, 2012, 49(5):916-923.

[15] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 早稻秸秆原位焚烧对红壤晚稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及产量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2):184-189.

[16] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 猪粪沼液施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(5):124-131.

[17] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. 基于 DNDC 模型的川中丘陵区不同轮作制度下稻田 CO₂ 排放研究[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4):530-537.

[18] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH₄、NO₂ 排放的模拟对比分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6/7):1003-1010.

[19] Erle C E, Li Rong-gang, Yang Lin-zhang, et al. Long-term change in village scale ecosystems in China using landscape and statistical methods[J]. Ecol Appl, 2000, 10(4):1057-1073.

[20] Erle C E. Long-term ecological changes in the densely populated rural landscapes of China[C]//Asner G P, DeFries R S, Houghton R A, eds. Ecosystem Interactions with Land Use Change[M]. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004.

[21] Ussiri D A N, Lal R, Jarecki M K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(2):247-255.

[22] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2166-2172.

[23] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 不同耕作方式下稻田土壤 CH₄ 和 CO₂ 的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2482-2488.

[24] Harada H, Kobayashi H, Shindo H. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2007, 53:668-677.

[25] Lu Fei, Wang Xiao-ke, Han Bing, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2):281-305.

[26] Dong Wen-xu, Hu Chun-sheng, Chen Su-ying, et al. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ emission in a wheat-corn double-cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(1):27-37.

[27] Jacobs A, Rauber R, Ludwig B. Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 102:158-164, 240.

[28] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5):1-5.

[29] 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 水稻土 CH₄ 产生潜力及其影响因素[J]. 土壤学报, 2008, 45(1):98-104.

[30] 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, 203:227-237.

[31] Wang B, Xu Y, Wang Z, et al. Methane production potentials of twenty-eight rice soils in China[J]. Soil Fert Soils, 1999, 29:74-80.

[32] 解淑艳, 王瑞斌, 郑皓皓. 2005—2011 年全国酸雨状况分析[J]. 环境监控与预警, 2012, 4(5):33-37.

[33] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12):4294-4300.

(上接第 173 页)

[14] 于东平, 张鑫, 何毅, 等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):66-71.

[15] 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(8):1486-1492.

[16] 史忠海, 王国庆, 余辉, 等. 气温变化对黄河流域蒸发能力的影响[J]. 河南气象, 2006, (1):31-32.

[17] 汪治桂, 王建兵, 冯景昌, 等. 甘肃玛曲县近 40a 潜在蒸散量的变化趋势[J]. 干旱气象, 2011, 29(4):488-491.

[18] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. 地理学报, 2005, 60(1):6-9.

[19] 蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化[J]. 高原气象, 2003, 22(5):464-470.

[20] 崔英, 刘廷玺, 杜艳霞. 黄河内蒙古段蒸发皿蒸发量变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4):252-261.

[21] 李林, 张国胜, 汪青春, 等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因素研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3):256-259.

[22] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4):437-441.

[23] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3):378-386.