

长三角地区土壤 CO₂ 排放空间变化及其对环境因子的响应^①

杜骑江^{1,2}, 朱青^{2,3*}, 王卫光¹

(1 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全重点实验室, 南京 211135; 3 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 为探讨长三角地区土壤 CO₂ 排放的空间分布特征及其对地形、土壤与气象因子的响应关系, 基于 2000—2014 年 1 km 分辨率的土壤 CO₂ 排放产品, 计算了逐像元的多年均值及变异系数, 分析了土壤 CO₂ 排放在不同环境因子梯度下的变化特征。在此基础上, 利用地理探测器方法, 进一步量化了地形、土壤与气象因子对土壤 CO₂ 排放变化的贡献度。结果表明: ①长三角地区土壤 CO₂ 排放具有明显的空间分异, 其在北部的分布较为平均, 在南部则具有明显的空间差异; 浙江东部沿海地区、安徽中西部地区以及上海、江苏南通等地多年来土壤 CO₂ 排放变化波动剧烈。②土壤 CO₂ 排放随海拔、土壤有机碳含量增大呈上升趋势, 随温度和土壤容重上升呈下降趋势, 随向下短波辐射增大呈周期性波动, 随蒸散发与土壤水分升高呈先增后减的趋势, 随黏粒、粉粒含量升高则主要呈先减后增的趋势。③从长三角整体来看, 有机碳含量对土壤 CO₂ 排放的贡献最大; 在耕地与不透水面, 气象因子的影响程度最大; 而在林地, 有机碳含量的贡献度最大。综上所述, 土壤 CO₂ 排放空间分布差异较大且时间波动剧烈, 有机碳含量对土壤 CO₂ 排放的影响程度最大。

关键词: 土壤 CO₂ 排放; 长三角; 环境因子; 空间分异

中图分类号: S152.6 **文献标志码:** A

Spatial Variation of Soil CO₂ Emission and Its Responses to Environmental Factors in Yangtze River Delta Region

DU Qijiang^{1,2}, ZHU Qing^{2,3*}, WANG Weiguang¹

(1 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 211135, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China)

Abstract: In order to investigate the spatial distribution characteristics of soil CO₂ emission in the Yangtze River Delta, as well as their responses to topography, soil and meteorology factors, and the contributions of environmental factors to soil CO₂ emission variations. Based on the 1 km resolution soil CO₂ emission products from 2000 to 2014 in the Yangtze River Delta, this study calculated the multi-year mean value and variation coefficient of soil CO₂ emission per pixel, and analyzed the changes in soil CO₂ emissions along gradients of different environmental factors. On this basis, the geographic detector method was further employed to quantify the contributions of topographic, soil, and meteorological factors to the variations in soil CO₂ emissions. The results showed that: 1) There were obvious spatial differences in soil CO₂ emission in the Yangtze River Delta, with relatively uniform distribution in the northern part and obvious spatial differences in the southern part; the variations of soil CO₂ emission in eastern coastal areas of Zhejiang Province, central and western areas of Anhui Province, Nantong City and Shanghai City were fluctuated sharply over the years. 2) Soil CO₂ emission showed an increasing trend with rising elevation and soil organic carbon content, a decreasing trend with increasing temperature and soil bulk density, periodic fluctuations with increasing downward shortwave radiation, an initial increase followed by a decrease with rising evapotranspiration and soil moisture, and primarily a decrease followed by an increase with higher clay and silt contents. 3) From the perspective of the entire Yangtze River Delta, organic carbon content contributed the most to soil CO₂ emission. In croplands and impervious surfaces, meteorological factors

①基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(42125103)和科技基础资源调查专项(2023FY100100)资助。

* 通信作者(qzhu@niglas.ac.cn)

作者简介: 杜骑江(2000—), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳排放研究。E-mail: 792747378@qq.com

had the greatest influence on soil CO₂ emission, while in forestlands, organic carbon content contributed the most to soil CO₂ emission. In conclusion, the spatial distribution of soil CO₂ emission varies significantly and exhibits strong temporal fluctuations, with soil organic carbon content having the greatest impact on soil CO₂ emission.

Key words: Soil CO₂ emission; Yangtze River Delta region; Environmental factors; Spatial differentiation

土壤作为陆地生态系统中最大的有机碳库, 不仅为植被生长提供养分, 也以 CO₂ 形式向大气释放碳^[1]。这个过程主要通过根际呼吸(根和根际微生物的呼吸作用)与异养呼吸(土壤微生物与土壤动物的呼吸作用)两种方式进行^[2]。土壤 CO₂ 排放是全球碳循环的重要组成部分, 受气候条件、土壤性质、地形、人类活动等影响, 在时间与空间尺度上变化剧烈^[3]。其时空变异不仅能指示土壤微生物与理化性质的变化特征, 同时也会对地区碳收支情况乃至气候变化产生举足轻重的影响^[4]。因此, 研究土壤 CO₂ 排放变化特征及其环境因子有十分重要的科学与现实意义。

土壤 CO₂ 排放的变化规律受不同环境因子的影响。例如, 陈全胜等^[5]分析了内蒙古典型温带草原土壤呼吸, 发现土壤呼吸的温度敏感性存在一定程度的空间变异, 不同群落土壤呼吸温度敏感性与生长季土壤平均水分含量呈显著的正相关关系; 李晓敏等^[6]分析了庞泉沟自然保护区土壤碳排放空间分异的主要驱动力及其交互作用, 发现海拔、温度和归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)可以解释 64%、59% 和 48% 的空间变异; 魏华^[7]在针对温带落叶阔叶林和热带山地雨林的研究中发现, 覆被类型、温度、土壤孔隙含水率等都是影响土壤温室气体排放的重要因素, 且在不同环境条件下, 土壤温室气体排放的主控因子表现不同。一直以来, 小尺度站点式监测因为具有较高精度, 是获取土壤 CO₂ 排放数据最常见的方法。然而, 该方法难以支撑大尺度土壤 CO₂ 排放的研究需求, 因此遥感反演以及数值模拟方法成为土壤 CO₂ 排放估算的重要工具^[8]。例如, Huang 等^[9]曾基于多源遥感数据和全球土壤碳排放地面观测数据集, 构建数据驱动模型, 开发了 2000—2014 年全球 1 km 分辨率陆地生态系统土壤碳排放产品, 并分析了全球土壤碳排放时空变化与气候和土地覆盖变化之间的关系; Chen 等^[10]建立了包含土壤温度、水分、叶面积指数和土壤有机碳 4 个子模型的生物物理土壤呼吸模型, 估算了月尺度和年尺度的土壤碳排放。然而, 在下垫面情况复杂的区域, 土壤 CO₂ 排放的时空分异复杂多变, 且受到诸多因子的交互影响^[11]。而前人在进行土壤 CO₂ 排放研究时, 所考虑的环境因子种类与数量较少, 或是研

究区域尺度普遍偏小, 目前仍缺乏在大尺度区域下对土壤 CO₂ 排放空间异质性的量化与环境因子驱动机制的研究。

长三角地区城镇化率高, 土地利用类型多样, 以林地与耕地为主, 受人类活动影响剧烈。此外, 长三角地区南北跨度大, 降水、气温呈阶梯状分布, 水资源分布不均, 丘陵山地与平原河网交错分布, 土壤性质分异明显, 因此土壤 CO₂ 排放呈现较为剧烈的时空变化^[12]。本文选取长三角地区作为研究区域, 旨在揭示土壤 CO₂ 排放的变化规律, 探究环境因子对其空间分异的影响。研究结果为科学制定该地区碳中和与碳达峰指标, 以及预测未来气候变化提供可靠依据。

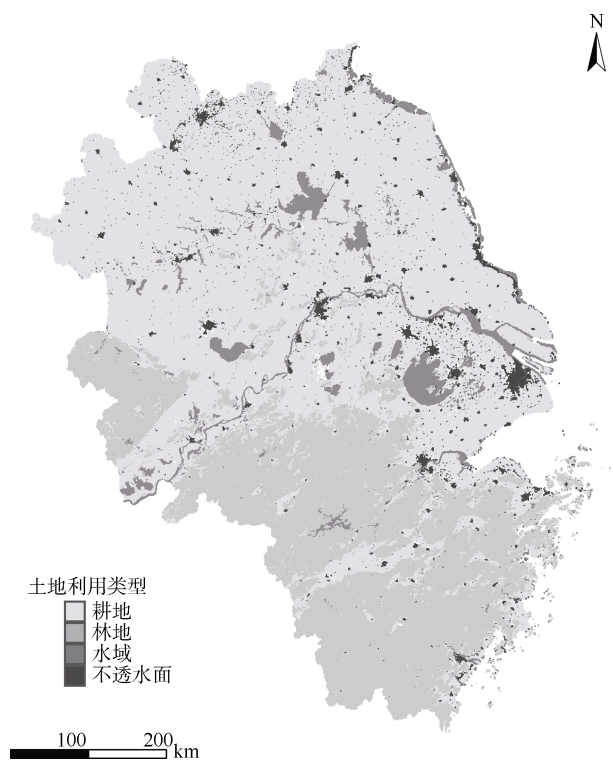
1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以长江三角洲地区(包含上海市、江苏省、浙江省、安徽省, 以下简称长三角)为研究区域(图 1), 其经纬度范围为 27.2°N~35.4°N、114.9°E~122.7°E, 面积约 3.59×10⁵ km², 约占我国陆地面积的 3.7%。长三角地区主要受东亚夏季风影响^[13], 淮河以南主要为亚热带季风气候, 淮河以北为温带季风气候, 雨热同期, 洪涝灾害频发, 年均气温 11~18 °C, 年均降水量 800~2 400 mm; 地形上, 长江以南以丘陵山地为主, 长江以北以平原为主, 地势南高北低; 土地利用类型多样, 长江以南以林地为主, 长江以北以耕地为主; 水资源丰富, 河流与湖泊众多, 是全国河网密度最高的地区。

1.2 数据来源与处理

土壤 CO₂ 排放数据采用 Huang 等^[9]构建的数据驱动模型生产的 2000—2014 年全球 1 km 分辨率陆地生态系统土壤碳排放产品; 数字地形高程模型(DEM)数据采用美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量制成的 Shuttle Radar Topography Mission 数据, 分辨率为 90 m, 修订版本为 V4.1 版本; 田间持水量数据采用 Zhang 等^[14]基于分层参数化的物理模型得到的全球 1 km 分辨率产品(m³/m³); 土壤含水量数据使用 Li 等^[15]基于站点观测的我国 1 km 土壤湿度日尺度数据集(2000—2020 年)产品(m³/m³); 气温数据使用 Peng 等^[16]基于 CRU 发布的全球 0.5° 气候数据集以



(该图基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)3189 号的标准地图制作, 底图无修改)

图1 长三角地区概况及土地利用类型空间分布(以2007年为例)

Fig. 1 Overview and spatial distribution of land cover types in Yangtze River Delta (year 2007 as an example)

及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集得到的我国逐月平均温度数据, 分辨率为 1 km; 土地利用类型数据使用武汉大学杨杰和黄昕教授团队发布的 1990—2019 年全国 30 m 土地覆盖数据^[17]; 降水数据采用朱求安等^[18]基于 1960—2020 年全国地面 2 400 多个气象站点的降水监测数据计算得到的全国 1 km 空间分辨率逐月降水插值数据集; 实际蒸散发数据采用由 Zheng 等^[19]生产的全球 1 km 分辨率地表实际蒸散发数据集; 向下短波辐射采用 He 等^[20]以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料, 以及 TRMM 降水资料为背景场, 基于 ANU-Spline 统计插值, 融合了我国气象局常规气象观测数据制作而成的数据, 该数据由国家青藏高原数据中心提供; 土壤质地(包括粉砂土、黏土含量)、土壤容重与土壤有机碳含量数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>); 坡度利用 DEM 数据在 ArcGIS 10.8 中计算得到。上述环境因子均将空间分辨率重采样至 1 km, 裁剪至长三角地理范围并去除无效值与空值后, 使用 ArcGIS10.8 计算求得其多年平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤 CO₂ 排放与环境因子阶梯变化关系计算 对各环境因子按照一定步长进行分级, 并对不同等级的土壤 CO₂ 排放进行均值计算, 以便分析土壤 CO₂ 排放对不同环境因子的响应关系, 计算公式如下:

$$\overline{Rs_i} = \frac{\sum_{j=1}^n Rs_{ij}}{n} \quad (1)$$

式中: $\overline{Rs_i}$ 是第 i 个分级的土壤 CO₂ 排放均值; n 表示该分级中像元个数; j 表示某一像元在该分级中的位置; Rs_{ij} 代表该像元的土壤 CO₂ 排放值。

1.3.2 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动因子的一种统计学方法, 可用以度量空间分异性、探测解释因子、分析变量之间交互关系, 已经在自然和社会科学多领域应用^[21]。利用地理探测器进行空间分异及因子探测, 即探测 Y 的空间分异性, 以及探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。用 q 值度量因子 X 对 Y 的解释力度, 表达式为:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (4)$$

式中: $h=1, \dots, L$, 为变量 Y 或因子 X 的分层, 即分类或分区; H_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差。 q 的值域为[0, 1], 值越大说明 Y 的空间分异性越明显; 如果分层是由自变量 X 生成的, 则 q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强, 反之则越弱。 q 值表示 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y 。

2 结果与分析

2.1 土壤 CO₂ 排放空间分布特征

研究区内 2000—2014 年平均土壤 CO₂ 排放强度低值主要位于长三角中部与南部地区(图 2), 约为 500~600 g/(m²·a)(以 C 计, 下同), 中值分布于北部地区, 为 600~700 g/(m²·a), >800 g/(m²·a)的高值则主要分布于南部。总体来看, 长三角北部土壤 CO₂ 排放空间分布较为平均, 而南部的空间分异性较大。变异系数低值主要分布于浙江省北部与江苏东部地区, 普遍在 0.07 以下; 变异系数高值主要位于浙江东部沿海地区、安徽中西部地区以及南通市、上海市等地, 普遍在 0.09 以上。

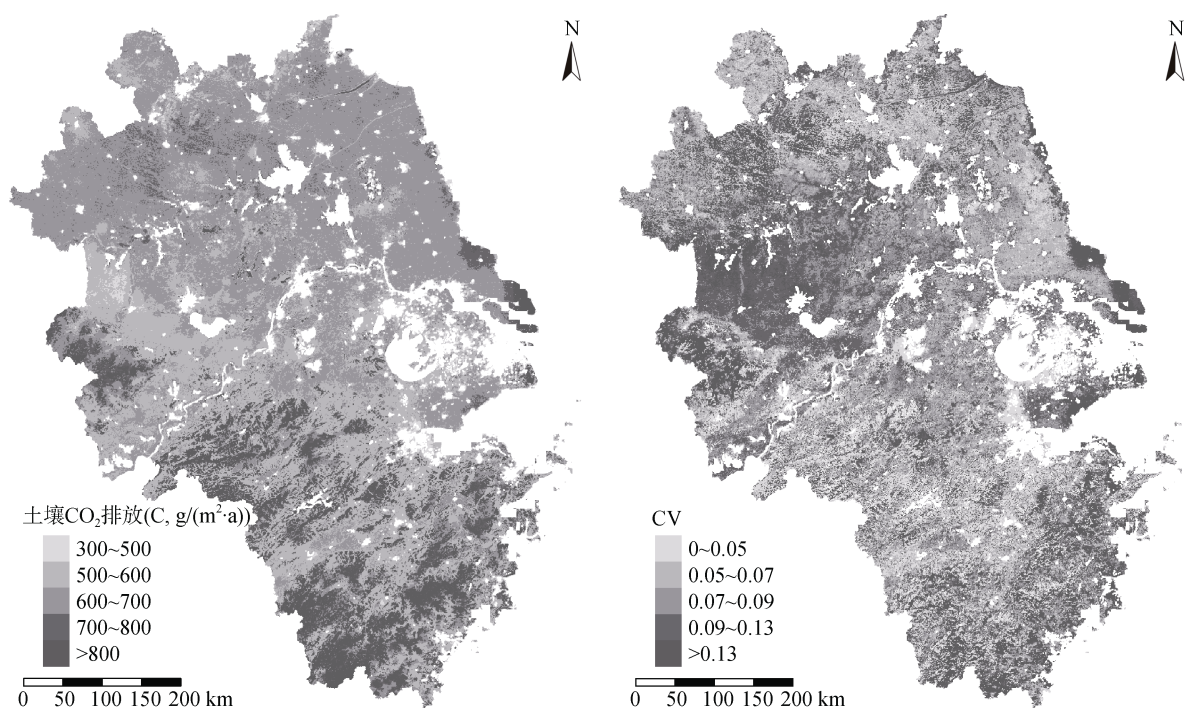
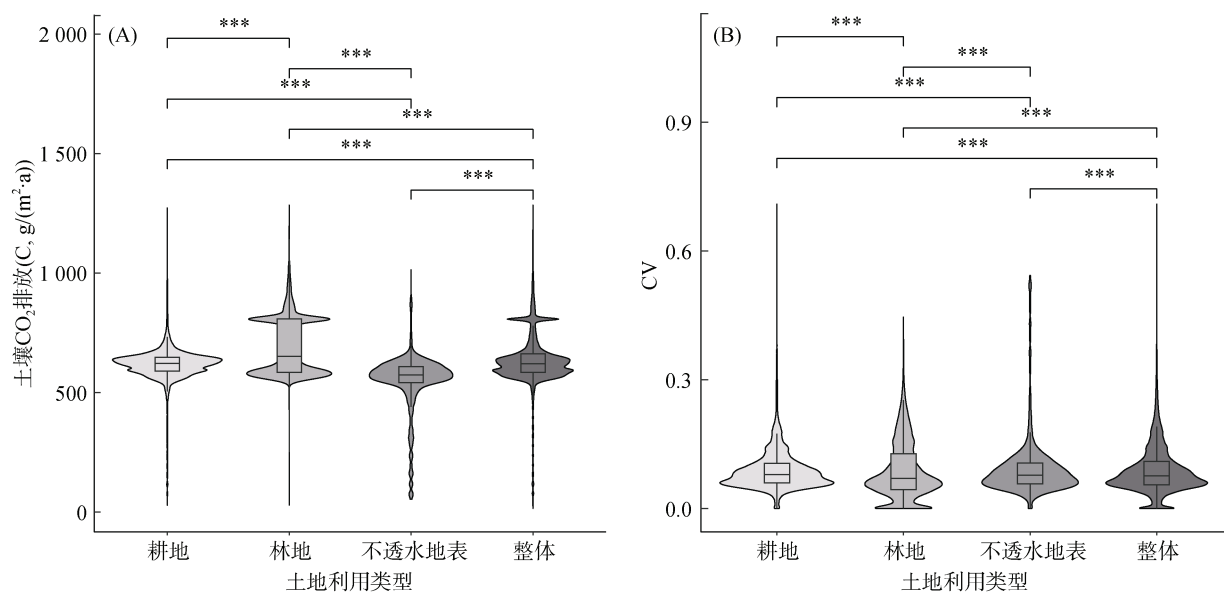


图 2 长三角地区 2000—2014 年平均土壤 CO_2 排放及时间变异系数的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of average soil CO_2 emission and temporal variation coefficient in Yangtze River Delta from 2000 to 2014

长三角不同土地利用类型土壤 CO_2 排放均值及变异系数的各组两两之间分布均通过 99.9% 显著性检验,说明不同土地利用类型之间分布存在显著性差异(图 3)。整体来看,林地的土壤 CO_2 排放强度要明显高于其他土地利用类型,主要集中于 500~600 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以及 >800 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$;耕地的土壤 CO_2 排放强度中值略高于不透水面,两者主要位于 500~700 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

从变异系数来看,3 种土地利用类型的土壤 CO_2 排放变异系数主要集中于 0~0.10,耕地与不透水面的变异系数分布较为集中,而林地的变异系数则较为分散。林地变异系数<0.05 的像元以及>0.10 的像元要多于其他两种土地利用类型,这与图 2 中变异系数的空间分布是一致的,>0.10 以及<0.05 的像元多数位于长三角南部。耕地与不透水面的变异系数没有明显差距。



(***表示差异达 $P<0.001$ 显著水平)

图 3 长三角地区不同土地利用类型土壤 CO_2 排放及时间变异系数分布

Fig. 3 Soil CO_2 emissions and temporal variation coefficients of different land cover types in Yangtze River Delta

2.2 环境因子空间分布特征

研究区内各环境因子在空间上呈现出较大的变异性(图 4)。各因子以长江为分界线, 南北分布差异

明显。土壤容重、黏粒和粉粒含量表现为北高南低, 且黏粒和粉粒在长三角北部的分布情况相反; 有机碳含量呈由北至南递增的趋势, 高值普遍集中于南部高

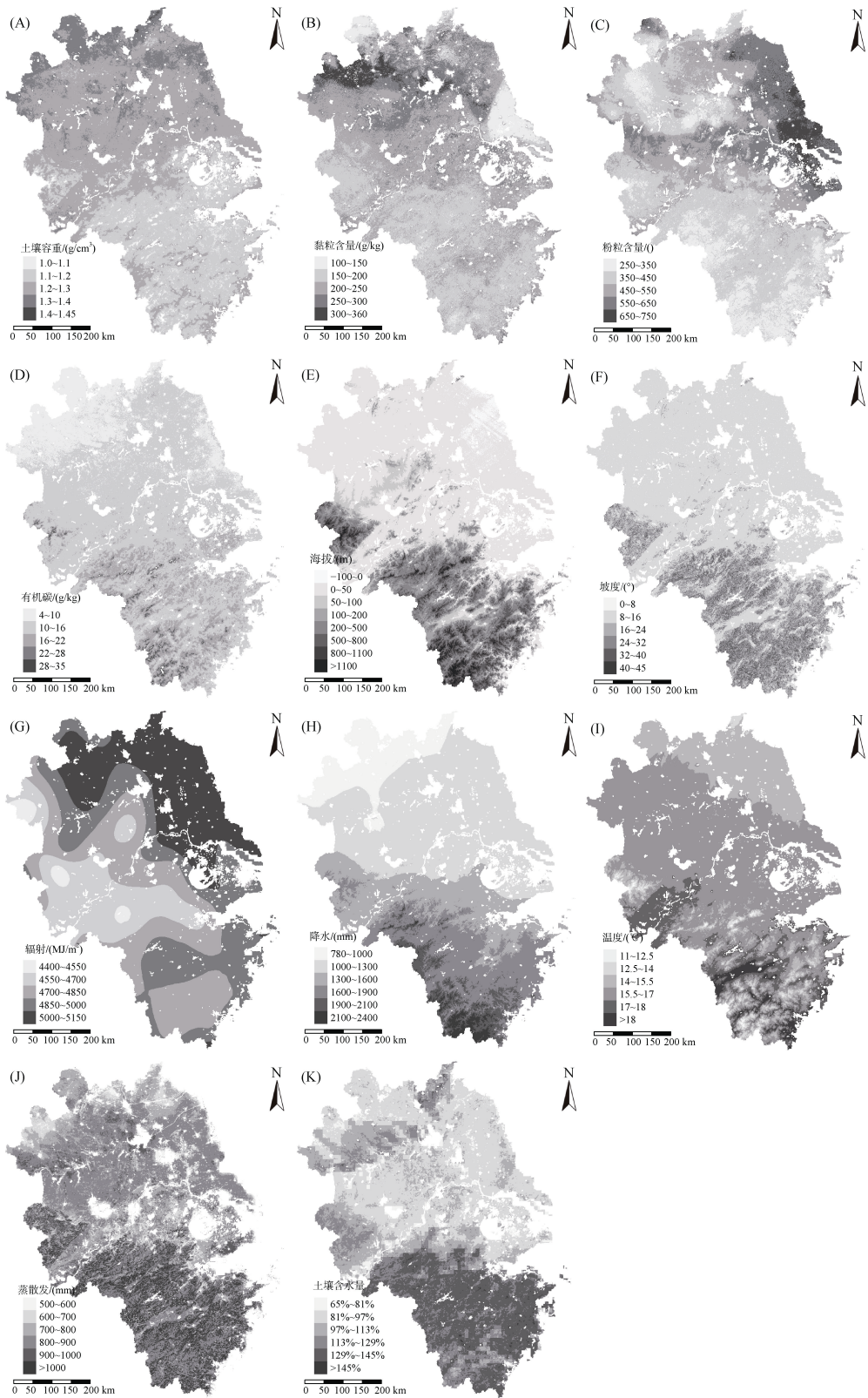


图 4 长三角地区主要环境因子空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of major environmental factors in Yangtze River Delta

海拔地区^[22]。向下短波辐射在整个长三角地区都处于较高水平,主要呈中部低、南北高的分布趋势。由于长三角中部与南部为亚热带季风气候,北部多为温带季风气候,两者存在温度与降水条件上的差异。温度整体呈从南到北递减的趋势,但在南部也存在温度较低的区域,这主要是由于这些地区海拔较高且覆被类型多为森林,使得温度较南部其他区域更低^[23]。长三角南部多为森林与丘陵,植被覆盖率高,土壤保

水能力好,而北部多为平原,覆被类型以耕地为主,水资源总量较少,使得土壤水分出现南部高于北部的情况^[24],同时也使得南部的实际蒸散发明显高于北部^[25]。

2.3 土壤 CO₂ 排放驱动因子分析

2.3.1 土壤 CO₂ 排放对环境因子变化的响应 土壤 CO₂ 排放对各环境因子空间变化响应关系如图 5~图 7 所示。土壤 CO₂ 排放随土壤容重增长呈减少趋

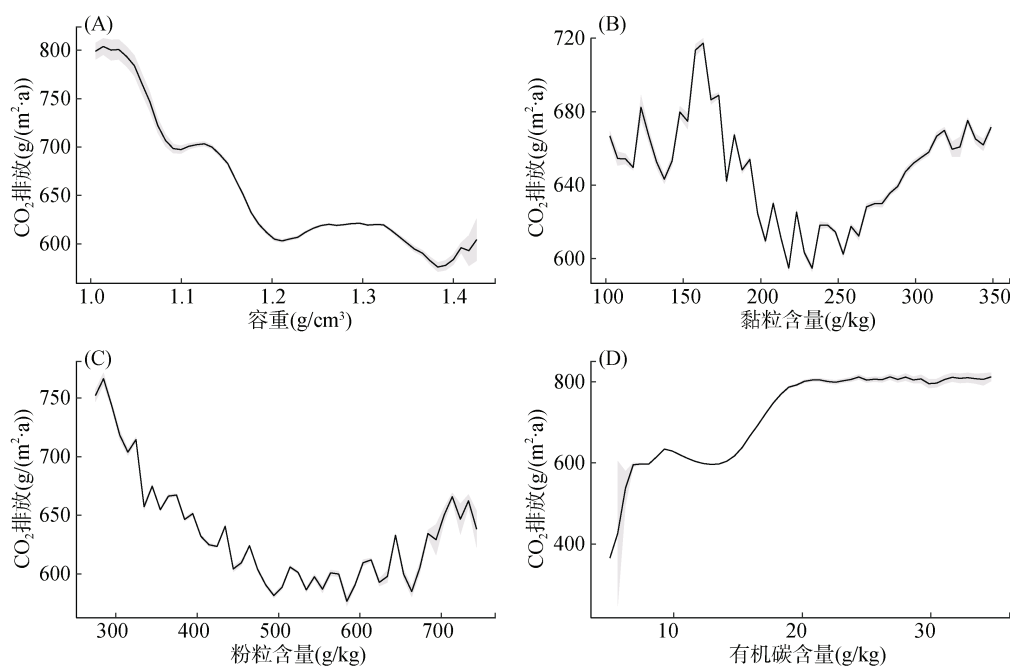


图 5 长三角地区土壤 CO₂ 排放对土壤容重(A)、土壤黏粒(B)、粉粒(C)及有机碳(D)含量的响应

Fig. 5 Responses of soil CO₂ emission to soil bulk density (A), clay (B), silt (C) and organic carbon (D) contents in Yangtze River Delta

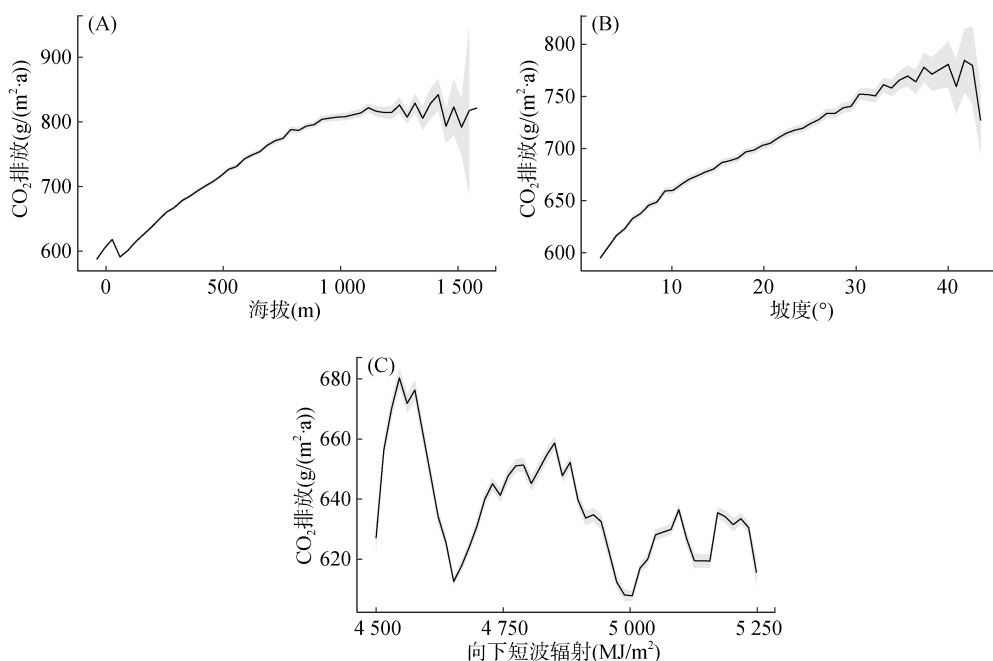


图 6 长三角地区土壤 CO₂ 排放对海拔(A)、坡度(B)与向下短波辐射(C)的响应

Fig. 6 Responses of soil CO₂ emission to altitude (A), slope (B) and downward shortwave radiation (C) in Yangtze River Delta

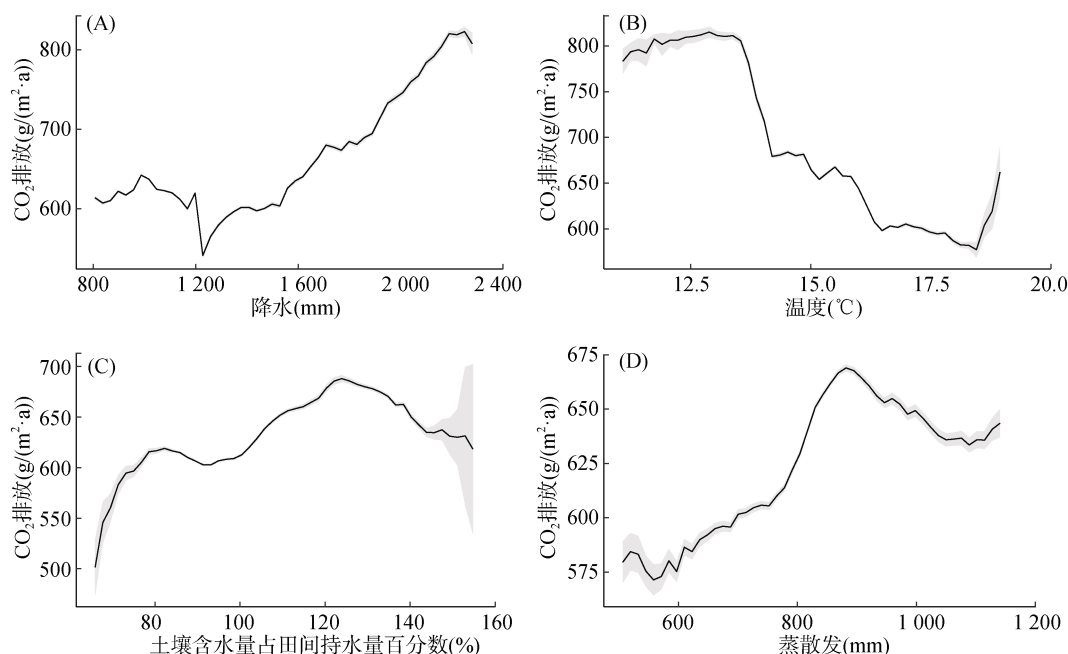


图7 长三角地区土壤 CO₂ 排放对降水(A)、温度(B)、土壤水分(C)和蒸散发(D)的响应

Fig. 7 Responses of soil CO₂ emission to precipitation (A), temperature (B), soil moisture (C) and evapotranspiration (D) in Yangtze River Delta

势;随黏粒含量增加呈先升高后降低的变化趋势;随粉粒含量增加呈先下降后小幅回升趋势;随土壤有机碳含量增加则呈先升高趋势,在有机碳含量达到 20 g/kg 之后趋于平稳。随海拔、坡度的升高,土壤 CO₂ 排放均呈明显的上升趋势;而随向下短波辐射的增强,则呈先增后减的周期波动,且整体呈下降趋势。随降水增加,土壤 CO₂ 排放整体升高;随蒸散发、温度和土壤含水量的增加,整体呈先增后减的趋势。

2.3.2 环境因子对土壤 CO₂ 排放变化的贡献度 为确定上述因子对土壤 CO₂ 排放变化的影响程度,使用地理探测器进行单因子贡献度计算以及多因子交互分析。将因子分为 3 类:土壤(黏粒含量、粉粒含量、土壤水分、土壤有机碳含量、容重)、气象水文(降水、气温、蒸散发、向下短波辐射)和地形(海拔、坡度)。各土地利用类型下的单因子贡献度及交互贡献度如图 8 所示,计算结果均通过显著性检验($P < 0.01$)。从长三角整体来看,土壤有机碳含量与海拔对土壤 CO₂ 排放的贡献度最高($q=0.28$),其次是坡度($q=0.23$) (图 8A)。

对于耕地而言,温度的贡献度最大($q=0.13$),而土壤有机碳的贡献度并不高($q=0.06$) (图 8B)。而对于林地,土壤有机碳含量的贡献度最大($q=0.29$),同时温度和海拔的贡献度处于较高水平(图 8C)。对于不透水面,贡献度最大的因子是海拔($q=0.12$),但所有因子对不透水面土壤 CO₂ 排放的贡献度均处于较低

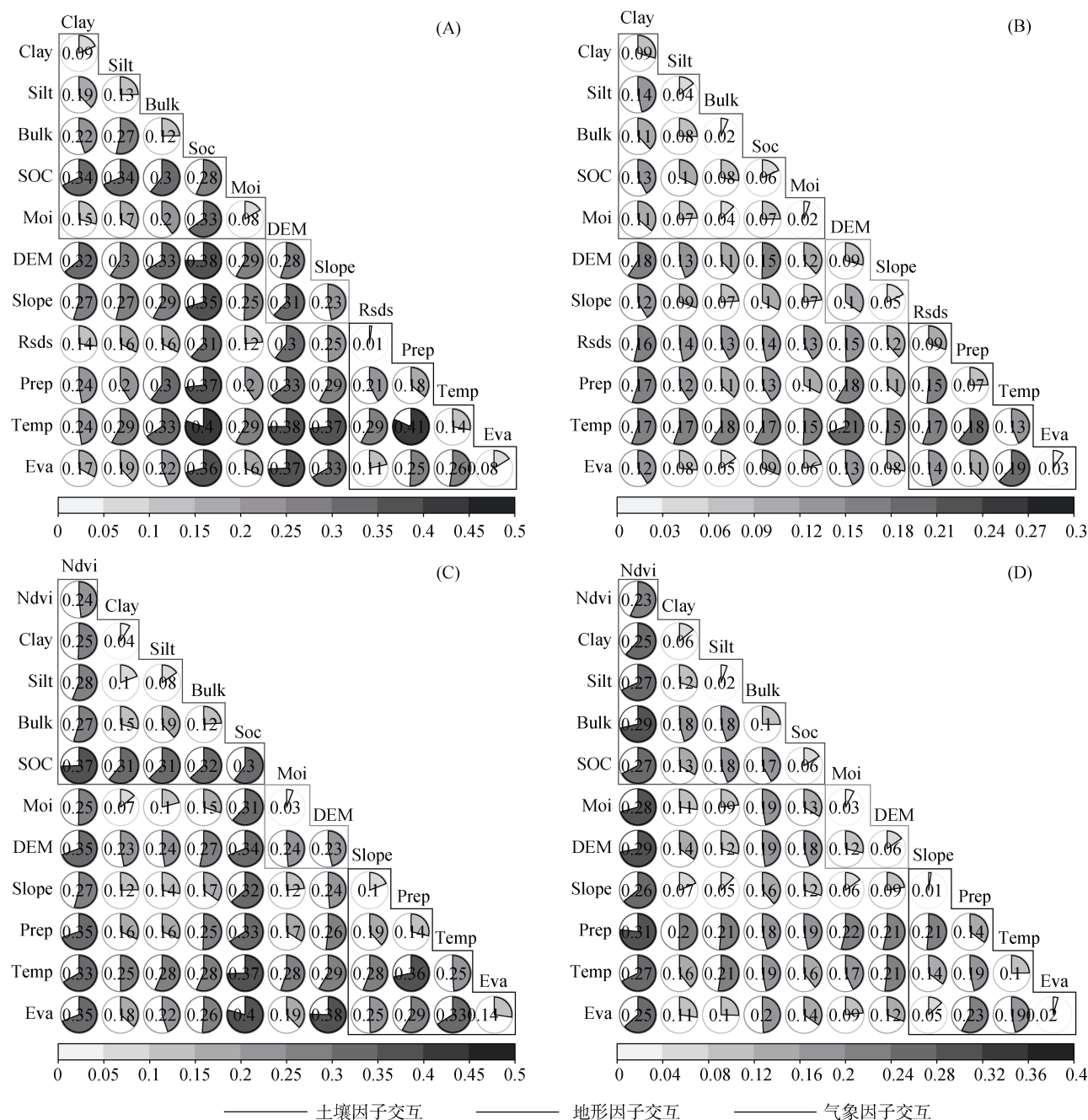
水平(图 8D)。

各因子的交互影响相比于单因子的影响更强。从图 8A 可以看出,土壤有机碳含量作为长三角地区土壤 CO₂ 排放的主导因子,其与其他因子交互后对土壤 CO₂ 排放解释力更强。从长三角整体来看,土壤因子交互、地形因子交互与气象因子交互后的作用是相近的,对土壤 CO₂ 排放的贡献水平都有较程度的提升。在耕地中,气象因子交互的影响程度明显强于土壤因子交互与地形因子交互;在林地中,土壤、地形、气象因子交互均处于较高水平;对于不透水面,气象因子交互影响作用最强,其次是地形因子交互,而土壤因子交互影响最弱。

3 讨论

3.1 环境因子对土壤 CO₂ 排放变化的影响机制

较小的土壤容重通常代表土壤的孔隙更为发育,土壤的透气透水性较好^[26],有益于好氧微生物代谢,因此土壤容重更高的研究区北部土壤 CO₂ 排放水平更低(图 2,图 4A)。黏粒含量高的土壤孔隙度高,提高了土壤的保水和保肥性能,且有利于土壤微生物代谢活动,进而提升 CO₂ 排放强度;而黏粒含量过高会导致土壤通气性差,排水不畅^[27],抑制好氧微生物的呼吸作用,降低 CO₂ 排放强度;但当黏粒含量超过 250 g/kg 后,CO₂ 排放又上升(图 5B),这是因为黏粒含量超过 250 g/kg 的区域,对应于土壤水分处



(Clay: 黏粒含量; Silt: 粉粒含量; Bulk: 容重; SOC: 土壤有机碳含量; Moi: 土壤水分; DEM: 海拔; Slope: 坡度; Rsds: 向下短波辐射; Prep: 降水; Temp: 气温; Eva: 蒸散发)

图 8 长三角地区整体(A)、耕地(B)、林地(C)与不透水面(D)各环境因子对 CO₂ 排放的贡献度

Fig. 8 Contributions of environmental factors to CO₂ emission in all (A), crop (B), forest (C) and impervious (D) lands in Yangtze River Delta

于较高水平的北部地区(图 4B、4K),抵消了高黏粒含量对 CO₂ 排放的抑制作用。土壤粉粒含量较高时容易形成紧密的结构,从而降低土壤的孔隙度和通气性^[28],进而影响土壤微生物的代谢活动,降低土壤 CO₂ 排放强度;当粉粒含量超过 600 g/kg 时,土壤 CO₂ 排放水平开始略有回升(图 5C)。土壤有机碳为土壤中的微生物提供能量和营养物质,从而提升土壤 CO₂ 排放量^[29];而在有机碳含量达到 20 g/kg 之后,

土壤 CO₂ 排放强度趋于平缓(图 5D),因为此时土壤微生物的代谢处于饱和状态,代谢强度已经达到最高。

土壤 CO₂ 排放随着海拔和坡度的增加而增大(图 6A、6B),这是因为随着海拔的提升,坡度变陡,土地利用类型从耕地逐渐过渡为林地,土壤有机碳含量上升^[30],从而间接提升了土壤 CO₂ 排放水平。然而在海拔超过 1 200 m 和坡度大于 40° 之后,土壤 CO₂ 排放出现了波动趋势。这是因为海拔过高的区域坡度

较陡,土壤相对贫瘠且保水性差^[31],对土壤微生物代谢起到抑制作用。通常情况下,坡度越大,可溶性盐分容易向坡下运移,导致土壤养分流失,土地日渐瘠薄^[32],土壤 CO₂ 排放减少。然而在长三角地区,陡坡所在的南部地区土壤水分充足(图 4F、4K),抵消了坡度变大对土壤 CO₂ 排放的抑制作用。向下短波辐射能在一定程度上影响植被的生长情况,从而间接影响土壤 CO₂ 排放。在适宜波段(如光合有效辐射波段,波长范围为 400~700 nm)和强度下,是植被光合作用的关键能量来源;而在极端条件下(如高强度 UV-B 或光抑制)则会抑制植物生长^[33]。因此,土壤 CO₂ 排放随向下短波辐射的增大出现先增后减的周期波动,且整体上呈下降趋势(图 6C)。

降水主要通过改变土壤水分来间接影响土壤 CO₂ 排放^[34]。土壤 CO₂ 排放强度整体上随降水的增加而上升(图 7A),这是因为降水可以增加土壤湿度,促进作物生长,增加作物生产力,从而增加土壤的碳输入,增强微生物的活性^[35],提升 CO₂ 排放量。温度升高能促进土壤中有机质的分解和微生物活动,对土壤 CO₂ 排放具有促进作用^[36];但在温度过高时,增温会降低土壤微生物的活性,导致 CO₂ 排放强度的下降^[37]。且温度较低的地区,土壤有机碳含量均处于较高水平(图 4I、4D),因此长三角地区低温条件下 CO₂ 排放强度较高(图 7B)。土壤水分较低的情况下,降水引起的干湿交替主要通过短时间置换土壤中 CO₂、增加土壤微生物呼吸底物、提高微生物活性、增强凋落物分解速率等途径提高 CO₂ 排放强度;而土壤水分较高时,降水迅速达到水分饱和和状态,从而形成厌氧环境,抑制微生物和根系呼吸^[35]。蒸散发通过影响土壤水分与温度进而影响土壤有机碳的分解速率和储存量^[38]。通常情况下,蒸散发与土壤水分含量呈正相关^[39],随着蒸散发量增加,土壤有机碳分解加快(图 7D);然而在蒸散发量超过 900 mm 的区域(图 4J),土壤水分和温度也处于较高水平(图 4I、4K),抑制了微生物对有机碳的分解作用,降低了土壤 CO₂ 排放强度(图 7D)。

3.2 环境因子对土壤 CO₂ 排放的贡献度

从单因子分析来看,土壤有机碳含量与海拔对土壤 CO₂ 排放的贡献度最高。因为土壤有机碳是微生物代谢的主要能源,能够通过微生物与土壤动植物的呼吸作用,对土壤 CO₂ 排放量产生显著影响。且从空间分布特征与响应关系来看,地形与土壤 CO₂ 排放具有极相似的空间分布。对于耕地而言,温度的贡献度最大,而土壤有机碳的贡献度却处于较低水平。

因为耕地多位于研究区北部,土壤有机碳含量空间分异性并不明显^[40]。因此,耕地土壤 CO₂ 排放对于有机碳含量并不敏感。而对于林地,土壤有机碳含量的贡献度最大。这是因为林地主要位于研究区南部,土壤有机碳含量空间分异性较大,且林地由于气候温暖湿润、植被凋落物多等原因,土壤有机碳含量往往较高^[41],土壤微生物对其也更敏感。相较于其他土地利用类型,林地中温度和海拔的贡献度处于较高水平。因为林地所在的南部区域地形分异性较大,因而温度随海拔变化明显,且在中高海拔条件下,土壤微生物、植物及土壤环境条件对温度变化较为敏感^[42]。因此,海拔与温度对土壤 CO₂ 排放的贡献度较高。对于不透水面,贡献度最大的因子是海拔,但所有因子对不透水面土壤 CO₂ 排放的贡献度均处于较低水平。这是因为它分布靠近城镇区域,受人类活动影响较大,其环境因子的驱动作用极易受到人类活动影响而发生变化。

从多因子交互来看,耕地温度、降水和辐射的空间波动较为剧烈,高温与强降水同步出现则会显著促进土壤 CO₂ 排放。例如,杜锟^[43]通过研究免耕和降雨对华北农田土壤 CO₂ 排放的影响发现,当土壤温度升高 10 °C 时,呼吸速率增加近 3 倍($Q_{10}=3.49\sim 3.74$);而降水后土壤湿度达到田间持水量的 60% 时,微生物活性达到峰值,可导致土壤 CO₂ 排放量提升 30% 以上。尽管土壤因子能直接影响土壤 CO₂ 排放,但其空间分布受长期耕作措施(如施肥、轮作)调控,因此其对土壤 CO₂ 排放空间变化的驱动作用被人类活动所掩盖。而长三角耕地以平原为主,地形起伏较小,其交互作用对土壤 CO₂ 排放的影响主要体现在微尺度水文条件上,但整体上被气象因子的广域性覆盖,因此交互作用也不明显。所以,在耕地中,气象因子交互的影响程度明显强于土壤因子交互与地形因子交互。林地所在地区气候整体温暖湿润,对土壤微生物代谢具有促进作用,且地形、气象因子空间分异性较大,土壤因子交互中因为土壤有机碳含量空间分异性明显,且 CO₂ 排放对有机碳含量变化最敏感。因此,土壤、地形、气象因子交互均处于较高水平。不透水面的低渗透性导致降水快速形成地表径流或局部积水,与蒸散发共同引发干湿交替效应,对土壤 CO₂ 排放有较强的调控作用;同时,城市热岛效应加剧地表复温过程,高温与降水、蒸散发协同加速土壤微生物代谢速率,从而促进土壤 CO₂ 排放。地形因子对土壤 CO₂ 排放的影响主要通过微尺度水文条件(如径流路径)间接体现。然而,气象因子通过热岛效

应、区域降水模式等主导了碳循环的空间异质性^[44],抑制了地形因子对土壤 CO₂ 排放的影响;而不透水面由于受到人类活动影响较深,土壤水分对土壤 CO₂ 排放的调控作用被削弱,且土壤因子在城市化进程中因压实和人工干预趋于均质化,空间异质性较低。因此,对于不透水面,气象因子交互影响作用最强,其次是地形因子交互,而土壤因子交互影响最弱。

3.3 土壤 CO₂ 排放空间分布格局的成因

研究区内 2000—2014 年平均土壤 CO₂ 排放强度低值主要位于长三角中部与南部地区,中值分布于北部地区,而高值则主要分布于南部。这是因为南部属于湿润地区,年降水量普遍在 1 300 mm 以上,土地利用类型以林地为主,植被覆盖率高,土壤有机碳含量高,因此土壤 CO₂ 排放值较高;而北部地区年降水量普遍为 1 000 mm 以下,水资源总量相对较低,且土地利用类型以耕地为主,有机碳含量较南部林地偏低,因此土壤 CO₂ 排放相对较低。长三角北部是地势平坦的平原地区,且土地利用类型较为单一,土壤气候条件相似;而南部多为丘陵山地,地势起伏较大,土地利用类型虽以林地为主,却也存在大量的耕地,且气候条件差异较大,因此南部土壤 CO₂ 排放空间分异性较北方更为明显。变异系数低值主要分布于浙江省北部与江苏东部地区,因为这些地区土地利用类型未出现较大波动。变异系数高值主要位于浙江东部沿海地区、安徽中西部地区以及上海市和江苏南通等地。这是因为在 2000 年以后,上述地区城市化发展迅速,部分耕地与自然土地转换为建设用地,而随着城市化的进一步发展,绿化设施与城市公园的建设使得土地利用类型再度转换^[45],因此土壤 CO₂ 排放年际变化波动较大。

土地利用类型同样也是影响土壤 CO₂ 排放的重要因子。王芸等^[46]通过湿筛法得到华北地区不同土地利用类型的土壤呼吸速率,得出林地>农田的结论,本文研究结果与此一致。此外,本文在不同土地利用类型下驱动地理探测器,得出土壤有机碳含量是土壤 CO₂ 排放的主要驱动因素。然而地理探测器会将数值因子分类转化为类型因子,因此驱动地理探测器计算贡献度会产生一定误差,今后可以考虑使用随机森林模型等机器学习方法直接计算数值因子的贡献度,后者可以有效减少误差,使结果更为精确。

4 结论

1) 长三角地区土壤 CO₂ 排放均值呈明显的南北分布差异,北部土壤 CO₂ 排放均值分布较为稳定,

南部则具有较大的波动。南部土壤 CO₂ 排放高值区与低温区、高海拔区以及高有机碳含量区重合度较高,中值分布呈现林地>耕地>不透水面的趋势;从变异系数 CV 来看,浙江东部沿海地区、安徽中西部地区以及上海市和江苏南通等地区土壤 CO₂ 排放随时间变化的波动较大, CV 的离散程度呈现林地>耕地>不透水面的趋势。

2) 土壤 CO₂ 排放随海拔、坡度、降水以及有机碳含量的增大呈上升趋势,随温度和土壤容重上升呈降低趋势,随蒸散发与土壤含水量升高则呈先增后减的趋势,随向下短波辐射变化呈周期性波动,随黏粒、粉粒含量升高呈先减后增的趋势。

3) 土壤有机碳在整个长三角地区以及林地中对土壤 CO₂ 排放贡献度最高,其余因子的贡献度在不同土地利用类型上呈现不同的情况。

研究成果有助于了解长三角地区的碳排放情况,阐释长三角地区土壤 CO₂ 排放与土壤、气象、地形因子的关系,为进一步探究该地区碳循环、碳收支情况提供科学依据。

参考文献:

- [1] 凌雷,马成艳,陈微尼,等. 兴隆山典型林分土壤呼吸的空间异质性分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(1): 76–83.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7–20.
- [3] 张丽华,陈亚宁,赵锐锋,等. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(5): 936–949.
- [4] 李键,薛澄,杨扬,等. 黄淮海平原不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 101–109, 121.
- [5] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831–836.
- [6] 李晓敏,严俊霞,杜自强,等. 庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4858–4866.
- [7] 魏华. 温带落叶阔叶林和热带山地雨林土壤温室气体排放规律及其影响因子[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [8] 田秋燕,赵正勇,杨旗,等. 基于全球数据库的森林土壤呼吸模型研究[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(6): 1–6.
- [9] Huang N, Wang L, Song X P, et al. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover[J]. Science Advances, 2020, 6(41): eabb8508.
- [10] Chen S T, Zou J W, Yao X W, et al. A biophysical model to simulate seasonal variations of soil respiration in agroecosystems in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 338: 109524.

- [11] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778–785.
- [12] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. “双碳”背景下长三角地区碳排放情景模拟研究[J]. 生态经济, 2022, 38(11): 13–18, 35.
- [13] Wang Y F, Xu Y P, Tabari H, et al. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, Eastern China[J]. Atmospheric Research, 2020, 231: 104673.
- [14] Zhang Y G, Schaap M G, Zha Y Y. A high-resolution global map of soil hydraulic properties produced by a hierarchical parameterization of a physically based water retention model[J]. Water Resources Research, 2018, 54(12): 9774–9790.
- [15] Li Q L, Shi G S, Shanguan W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using *in situ* measurement and machine learning[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267–5286.
- [16] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931–1946.
- [17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [18] 朱求安, 瞿莉莎, 金佳鑫. 中国 1 公里分辨率(0.008333°)逐月降水数据集(1960—2020 年)[N]. 国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)、河海大学“变化条件下水文模拟研究小组”. <https://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=5675866>.
- [19] Zheng C L, Jia L, Hu G C. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128444.
- [20] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7: 25.
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134.
- [22] 谢恩怡, 姚东恒, 廖宇波, 等. 粮食主产区耕地土壤有机碳空间分异特征及其影响因素: 以河北省为例[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 6002–6011.
- [23] 张波, 王文杰, 何兴元, 等. 哈尔滨城市森林遮荫和降温增湿效应差异及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 951–961.
- [24] 赵佰礼, 李元臻, 张晓华, 等. 黄土丘陵区深层土壤水分空间分布特征研究[J]. 绿色科技, 2021, 23(24): 176–180.
- [25] 林楠, 姜然哲, 刘强, 等. 近 20 年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1392–1407.
- [26] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [27] 兰天, 秦卫星, 胡惠仁, 等. 黏粒含量对粉质黏土土水特性影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 128–132.
- [28] 陆佳, 胡育文, 贾剑波, 等. 红壤丘陵区 3 种林分土壤颗粒粒级分布特征及其对养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 29–39.
- [29] 秦文宽, 张秋芳, 敖古凯麟, 等. 土壤有机碳动态对增温的响应及机制研究进展[J]. 植物生态学报, 2024, 48(4): 403–415.
- [30] 张雄志, 张慧芳, 王晨林, 等. 暖温带森林土壤有机碳含量和碳储量的海拔梯度格局及环境解释[J]. 生态学杂志, 2024, 43(10): 2979–2987.
- [31] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 722–730.
- [32] 张君, 蔡德宝, 杨树琼, 等. 丹江口库区不同坡度对土壤肥力特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 32–38.
- [33] 袁倩颖, 马彩虹, 文琦, 等. 六盘山贫困区生长季植被覆盖变化及其对水热条件的响应[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 220–227.
- [34] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 等. 降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响: 进展与展望[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 567–575.
- [35] 刘全全. 降水变化对黄土高原旱作冬小麦农田土壤温室气体排放的影响[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [36] 冉漫雪, 丁军军, 孙东宝, 等. 全球气候变化下土壤呼吸对温度和水分变化的响应特征综述[J]. 中国农业气象, 2024, 45(1): 1–11.
- [37] 张野, 刘新梅, 樊月, 等. 增温与凋落物去除对人工草地土壤呼吸的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 248–260.
- [38] 郭广芬. 未来气候变化对我国土壤有机碳储藏的影响[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2006.
- [39] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003, 19(2): 26–27, 29.
- [40] 徐梦, 李晓亮, 蔡晓布, 等. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周转变化特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19): 3714–3725.
- [41] 郭亮娜, 李江荣, 张波, 等. 森林土壤有机碳的影响因子及其研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(3): 85–91.
- [42] 魏骏兰. 不同海拔森林土壤有机质分解温度敏感性及其对外源碳添加的响应[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [43] 杜锬. 免耕和降雨影响华北农田土壤 CO₂ 排放的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [44] 江越. “双碳”目标下长三角城市群土地利用碳排放路径分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [45] 陈公太. 长三角地区土地利用变化时空特征分析[J]. 乡村科技, 2020, 11(19): 116–117.
- [46] 王芸, 赵鹏祥. 华北地区土地利用类型对土壤呼吸、有机碳组分和水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 59–65.

(责任编辑: 毛小芳)