

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积素及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测

李晓敏, 严俊霞\*, 杜自强, 王琰

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

**摘要:** 土壤呼吸是维持全球碳平衡的重要过程. 以庞泉沟自然保护区为研究区域, 基于实地测量的土壤呼吸( $R_s$ )数据, 结合海拔(ELE)、土壤温度( $T$ )、土壤水分(SWC)、归一化植被指数(NDVI)、坡度(slope)、土壤全碳(C)、总氮(N)和土壤容重(BD), 运用地理探测器模型分析了 $R_s$ 空间分异的主要驱动力及其交互作用. 结果表明: ①研究区 $R_s$ 及其影响因子的空间变异均为中等变异.  $R_s$ 与NDVI、 $T$ 和土壤N呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与ELE、slope和SWC呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),  $R_s$ 与BD显著负相关( $P < 0.05$ ), 与C相关性不显著( $P > 0.05$ ). ②NDVI和 $T$ 构成的多元线性模型可以解释 $R_s$ 空间分异的64.3%. ③ELE、 $T$ 和NDVI为研究区 $R_s$ 空间分异性的主导驱动力, 可以解释64%、59%和48%的空间变异. ④双因子的交互作用均能增强对 $R_s$ 空间分异性的解释力, 最大交互因子分别为 $ELE \cap BD$  ( $q = 0.73$ )和 $T \cap slope$  ( $q = 0.74$ ). 因此, 在 $R_s$ 的估算过程中, 结合地形及环境条件, 应考虑多种因子之间的交互作用.

**关键词:** 土壤呼吸; 空间变化; 驱动因子; 地理探测器; 庞泉沟

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4858-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110154

## Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangquangou Nature Reserve

LI Xiao-min, YAN Jun-xia\*, DU Zi-qiang, WANG Yan

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Soil respiration is an important process in maintaining global carbon balance. Taking the Pangquangou Nature Reserve as the research area, based on the field measurement of soil respiration ( $R_s$ ) data combined with altitude (ELE), soil temperature ( $T$ ), soil moisture (SWC), normalized vegetation index (NDVI), slope (slope), soil total carbon (C), total nitrogen (N), and soil bulk density (BD), we analyzed the main driving forces and interactions of  $R_s$  spatial differentiation by using the geographic detector model. The results showed that: ① the spatial variation of  $R_s$  and its influencing factors in the study area was moderate. The  $R_s$  was significantly positively correlated with NDVI,  $T$ , and N ( $P < 0.01$ ) and negatively with ELE, slope, and SWC ( $P < 0.01$ ). The  $R_s$  was significantly correlated with BD ( $P < 0.05$ ) but not with C ( $P > 0.05$ ). ② The multivariate linear model composed of NDVI and  $T$  explained 64.3% of  $R_s$  spatial variation. ③ ELE,  $T$ , and NDVI were the dominant driving forces of  $R_s$  spatial differentiation in the study area, which could explain 64%, 59%, and 48% of the spatial variability. ④ The interaction of the two factors enhanced the explanatory power of  $R_s$  spatial differentiation, and the maximum interaction factors were  $ELE \cap BD$  ( $q = 0.73$ ), and  $T \cap slope$  ( $q = 0.74$ ), respectively. Therefore, in the process of  $R_s$  estimation, combined with topographical and environmental conditions, the interaction between multiple factors should be considered.

**Key words:** soil respiration; spatial change; driving factors; geodetector; Pangquangou

土壤是陆地生态系统中最大的碳库, 土壤呼吸的微小变化, 都会对全球大气碳平衡产生很大的影响<sup>[1]</sup>. 不同尺度上的土壤呼吸都具有强烈的空间异质性<sup>[2]</sup>, 给评估陆地生态系统的碳预算带来困难. 有研究表明, 温度和水分作为非常重要的环境变量, 可以很好地解释土壤呼吸大部分的时间变异, 但不能独立解释其空间分异性, 土壤呼吸还会受到地形、生物及土壤理化因子的影响而呈现空间异质性<sup>[3,4]</sup>. Song等<sup>[5]</sup>的研究发现复杂的地形是影响土壤呼吸空间分异性的主导因子, 地形改变了植被根系分布, 使得高碳源区域表现出较强的空间异质性, Tian等<sup>[6]</sup>的研究也支持了这一观点. 土壤有机碳和根系生物量能直接影响土壤呼吸的空间变化, 尤其在生长季, 根活性强, 可以更好地解释土壤呼吸的异质性<sup>[7]</sup>. 植物分布对土壤呼吸空间异质性的响应是动态的, 复杂的, 也有研究认为植被活动越强, 土壤呼吸空间变异越大<sup>[8]</sup>. 有研究表明土壤物理和化学

因素对土壤呼吸的协同交互作用可通过线性关系表示<sup>[9]</sup>. 在不同生态环境下, 土壤呼吸空间变化的主导因子不同, 因此需要进行更深入地探究. 近年来, 学者在群落尺度上对土壤呼吸的空间变化及机制进行了研究<sup>[10-13]</sup>, 但在区域尺度上对于影响土壤呼吸的因素及其驱动机制耦合作用方面还没有一致的认知. 为了精确量化区域土壤呼吸碳通量, 提高估计大气和陆地生态系统之间碳通量的能力和维持全球生态系统碳收支平衡, 需深入研究土壤呼吸的空间分异性.

地理探测器模型是一种探测事物及地理要素空间分异性及量化其驱动力的统计方法<sup>[14]</sup>. 与相关和

收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2022-01-27

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20210302123449); 国家自然科学基金项目(41201374); 山西省高等学校科技创新项目(2015115)

作者简介: 李晓敏(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: 2915310551@qq.com

\* 通信作者, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

回归分析法相比,该方法的一个独特优势是能够探测两因子对因变量的交互作用. 一般而言,在回归模型中往往通过两因子的乘积项来表达两因子对因变量的交互作用. 然而,研究表明,两因子的交互作用不一定就是相乘关系<sup>[15]</sup>. 地理探测器通过单因子的影响力和双因子叠加后的影响力,判断两因子对因变量是否存在交互作用,以及交互作用的强弱及其表现形式. 因此,在分析地理要素空间分异和格局演变方面具有非常广泛的应用<sup>[16~19]</sup>,但对土壤呼吸空间分异性影响因素的分析的应用还未见报道. 土壤呼吸的空间格局是多因子交互作用的结果,传统的统计分析方法很难将其交互作用区分开. 基于此,本文以庞泉沟自然保护区为试验区,运用地理探测器模型定量揭示气候、地形、土壤和生物因子对庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异的单因子和不同因子之间的交互作用影响. 以揭示环境因子对土壤呼吸空间分异性的作用机制,以期为区域碳循环的可持续发展提供理论支持和决策参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区与试验地概况

研究在庞泉沟自然保护区进行,该区地处山西省吕梁市中西部(111°22'~111°33'E, 37°45'~37°55'N),面积约 10 443.5 hm<sup>2</sup>,海拔 1 600~2 831 m. 该区属暖温带大陆性季风气候,受到地形和海拔的影响,温度较同纬度低,空气湿度较高,为

典型的山地气候. 年均温 4.3℃,夏季最高温达 32.0℃,冬季最低温为 -26.0℃. 降水主要集中在 7~8 月,年平均降水量 822.6 mm,最大为 2 023.8 mm,最小为 310.9 mm. 土壤呈现垂直分布规律,类型主要有:黄绵土、山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤和草甸土. 植被类型主要有华北落叶松林(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)、云杉林(*Picea asperata* Mast)、辽东栎林(*Quercus liaotungensis*)、山杨林(*Populus davidiana* suma)、青杆(*Picea wilsonii*)、白杆(*Picea meyeri*)、桦树(*Betula*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏林(*Platycladus orientalis*)、鬼箭锦鸡儿灌丛(*Caraganajubata*)、银露梅灌丛(*Potentilla. glabra*)、沙棘灌丛(*Hippophae rhamnoides* shrub)、藁草草甸(*Carex meadow*)和嵩草草甸(*Kobresia* spp)等<sup>[20, 21]</sup>.

本研究综合考虑植被类型、土壤类型、海拔高度和坡度等环境因子的代表性以及可达性,选择了 31 个样地进行土壤呼吸及其环境因子观测(图 1). 海拔介于 1 600~1 800、1 800~2 000、2 000~2 200、2 200~2 400 和 2 400~2 700 m 的样地数目分别为 6、14、7、2 和 2(表 1). 用 GPS 测定样地的经纬度和海拔(ELE). 植被类型涵盖了针叶林(主要以华北落叶松为主)、针阔混交林(云杉、华北落叶松、辽东栎林、山杨林、白桦混交)、阔叶林(山杨林、辽东栎林)、阔叶混交林(杨桦混交、山杨辽东栎混交)、亚高山草甸和灌丛(沙棘)这 6 种不同的植被型组.

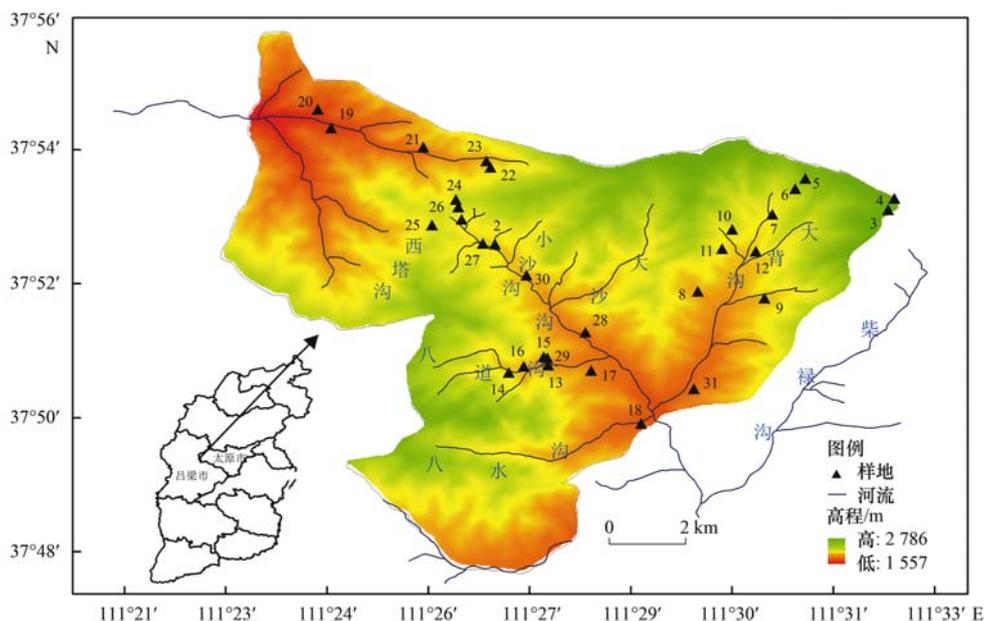


图 1 研究区土壤呼吸测定样地示意

Fig. 1 Sample sites for soil respiration measurement in the study area

表 1 不同海拔的植被类型

Table 1 Vegetation types at different altitudes

海拔/m	样地数	植被类型
1 600 ~ 1 800	6	华北落叶松、杨桦混交、辽东栎、山杨、辽东栎混交、青杨和沙棘灌丛
1 800 ~ 2 000	14	云杉、沙棘灌丛、华北落叶松、辽东栎、辽东栎混交、杨桦混交和油松
2 000 ~ 2 200	7	云杉、华北落叶松、杨桦混交和山杨林
2 200 ~ 2 400	2	华北落叶松
2 400 ~ 2 700	2	亚高山草甸和鬼箭锦鸡儿灌丛

## 1.2 数据来源及处理

### 1.2.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率( $R_s$ )用 LI-COR-6400 便携式气体分析系统连接 LI-6400-09 土壤呼吸叶室测定. 测定前 1 d, 每个样地随机放置 12 个 PVC 环, 并将环内表面的植物去除. 测定时, 每个 PVC 环测定 3 个数据, 取 12 个样点的平均值作为该样地当天的呼吸速率. 测定于 2018 年 9 月 12 ~ 15 日进行, 天气状况均为晴朗, 测定时间为每天 10:00 ~ 16:00.

### 1.2.2 环境因子测定

用 LI-COR-6400 的土壤温度探针测定 10 cm 深度的土壤温度( $T$ ). 0 ~ 10 cm 深度的土壤含水量(SWC)采用土钻法测定. 0 ~ 10 cm 深度的土壤容重(BD)采用环刀法测定.  $R_s$  测定完成后, 用土钻取 PVC 环中 0 ~ 10 cm 深度的土壤样品, 带回实验室用于测定土壤水分、土壤全氮(N)和总碳(C). N 和 C 使用 vario max 常量元素分析仪(Elementar, Germany)测定. 测得的土壤 C、N 和 BD 的含量见图 2.

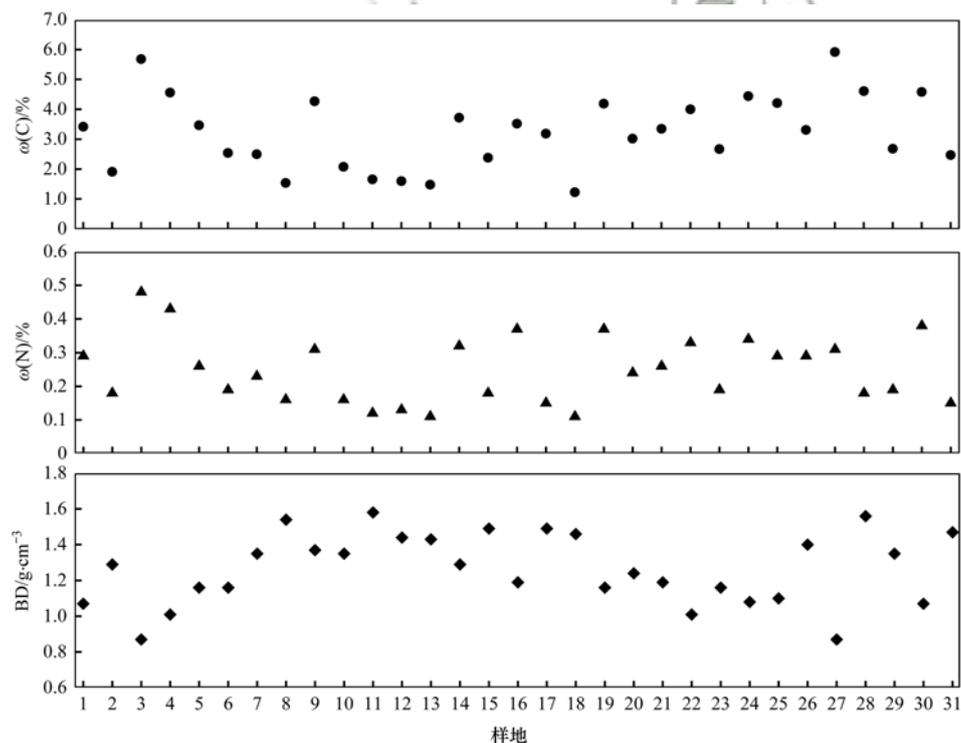


图 2 不同样地的土壤全碳(C)、全氮(N)和容重(BD)

Fig. 2 Soil total carbon (C), total nitrogen (N), and bulk density (BD) of different sampling plots

### 1.2.3 植被指数和地形数据获取

从美国国家航天航空局(NASA)网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)订购了中分辨率成像光谱仪(MODIS)的  $R_s$  测定时期的 MOD13A1 产品, 提取了研究区的归一化植被指数(NDVI)数据, 用于作为生物因子的指标分析对  $R_s$  空间分异性的影响. DEM 高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>), 空间分辨率为 30 m. 利用

ArcGIS 10.2 根据采样点的经纬度提取了各样地的坡度(slope), 用于分析地形因子对土壤呼吸空间变异性的影响.

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 传统方法

采用变异系数(CV)分析土壤呼吸和环境因子的空间变异程度. 采用皮尔逊相关法分析气象因子、生物因子、土壤因子和地形因子与  $R_s$  的相关关系. 采用 Origin 7.0(Microcal)绘制所有图.

### 1.3.2 标准差分级法

由于地理探测器模型运行的数据是离散变量, 而  $R_s$  影响因子数据属于连续变量, 因此需将连续变量离散化. 标准差分级法是以均值为中心, 以标准差倍数为级差, 分别向大于和小于均值的两个方向进行分级<sup>[22]</sup>. 该方法避免人为因素对数据干扰, 根据原始数据的数值特征和分布规律进行分级, 使计算结果更具客观性. 选择不同分级方法得到的  $q$  值最大的分类数, 分级效果最佳. 本文通过比较不同倍标准差下  $q$  值, 采用 1 倍标准差分级效果最好.

### 1.3.3 地理探测器模型

地理探测器能够判断影响因子决定力的大小, 分析要素的空间分布是否与地理事物趋势密切相关, 及影响因素间的耦合关系.

(1) 因子探测 主要通过因子解释力的大小探究不同变量对  $R_s$  的贡献率, 引入决定力指标  $q$ . 假设  $R_s$  为  $Y$ ,  $A = \{A_h\}$  为可能影响  $R_s$  的一个因子,  $h = 1, 2, \dots, L$ ,  $L$  为按照标准分级法得到的因子分类数,  $h$  为因子  $A$  的不同类型. 为了探究因子  $A$  与  $Y$  的空间关联性, 将  $R_s$  图层与因子  $A$  图层叠合<sup>[23]</sup>. 计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中,  $n$  和  $n_h$  分别为总样本数和  $h$  层样本量;  $\sigma^2$  和  $\sigma_h^2$  分别为总样本方差和  $h$  层样本方差;  $q$  取值范围为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大, 因子对  $R_s$  的解释力越强,  $q = 0$  时, 影响因子对  $R_s$  没有影响,  $q = 1$  时, 影响因子完全解释  $R_s$ .

将 ELE、 $T$ 、SWC、NDVI、slope、N、C 和 BD 这 8 个影响因子分别与研究区  $R_s$  进行因子探测分析, 计算得到各因子对  $R_s$  的解释力  $q$ , 对影响研究区  $R_s$  空间分异性的主导因素进行诊断. 然后利用 SPSS 22 软件, 根据  $q$  值大小, 用聚类分析法探究  $R_s$  空间分异性的主要驱动力.

(2) 生态探测 主要比较因子  $x_1$  和  $x_2$  在对  $R_s$  空间分布的影响是否存在显著差异<sup>[24]</sup>, 通过  $F$  检验来衡量.

$$F = n_{x_1}(n_{x_1} - 1)\sigma_{x_1}^2/n_{x_2}(n_{x_2} - 1)\sigma_{x_2}^2 \quad (2)$$

式中,  $n_{x_1}$  和  $n_{x_2}$  分别为因子  $x_1$  和  $x_2$  的样本量;  $\sigma_{x_1}^2$  和  $\sigma_{x_2}^2$  分别为因子  $x_1$  和  $x_2$  的方差.

(3) 交互探测 用于探究不同因子对  $R_s$  空间变化的削弱或增强的交互作用或相互独立关系. 用“ $\cap$ ”表示两因子间交互作用. ① 非线性拮抗:  $q(x_1 \cap x_2) < \text{Min}[q(x_1), q(x_2)]$ , 表示两个因子的共同作用小于其中任何一个因子的作用; ② 单拮抗:  $\text{Min}[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < \text{Max}[q(x_1), q(x_2)]$ , 表示两个因子的共同作用大于其中一个因子的作用且小于另一个因子的作用; ③ 双协同:  $\text{Max}[q(x_1), q(x_2)] < q(x_1 \cap x_2) < q(x_1) + q(x_2)$ , 表示两个因子的共同作用大于其中任何一个因子的作用且小于两个因子作用之和; ④ 独立:  $q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$ , 表示两个因子的共同作用等于两个因子作用之和; ⑤ 非线性协同:  $q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$ , 表示两个因子的共同作用大于两个因子作用之和<sup>[25]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸与环境因子的相关性分析

研究区  $R_s$  在  $0.86 \sim 12.29 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 平均值为  $(6.13 \pm 2.83) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ .  $R_s$  和各环境因子的变异系数(CV)的变化范围为 12%~57%, 均为中等变异. 其中, SWC 的 CV 最大为 57%, ELE、 $T$  和 BD 较低分别为 12%、14% 和 15%, 其余各因子的 CV 与  $R_s$  的差异不大, 在 30%~48% 之间(表 2). 皮尔逊相关性分析表明,  $R_s$  与 NDVI、 $T$  和 N 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与 ELE、slope 和 SWC 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ), 与 BD 显著负相关( $P < 0.05$ ), 与 C 相关性不显著( $P > 0.05$ )(表 3).

表 2 土壤呼吸及其驱动因子的描述统计分析<sup>1)</sup>

Table 2 Descriptive statistical analysis of soil respiration and its driving factors

指标	均值	最大值	最小值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
$R_s/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	6.13	12.29	0.86	2.83	46.00	-0.07	-1.03
ELE/m	2 002.45	2 682.00	1 630.00	240.75	12.00	1.23	1.84
slope/(°)	14.47	33.66	3.47	6.94	48.00	0.97	0.40
$T/^\circ\text{C}$	12.40	16.15	9.16	1.76	14.00	0.31	1.40
SWC/%	33.55	83.97	12.07	19.89	57.00	0.65	-0.69
N/%	0.25	0.48	0.11	0.10	39.00	0.51	-0.43
C/%	3.25	5.92	1.23	1.27	39.00	0.23	-0.81
BD/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.25	1.58	0.87	0.19	15.00	-0.18	-0.71
NDVI	0.67	0.89	0.15	0.20	30.00	-0.80	-0.69

1)  $R_s$ 、ELE、slope、 $T$ 、SWC、N、C、BD 和 NDVI 分别表示土壤呼吸、海拔、坡度、土壤温度、水分、全氮、全碳、容重和归一化植被指数, 下同

表 3 土壤呼吸与环境因子的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation between soil respiration and environmental factors

	$R_s$	ELE	$T$	SWC	slope	NDVI	N	C	BD
$R_s$	1								
ELE	-0.871 **	1							
$T$	0.787 **	-0.797 **	1						
SWC	-0.557 **	0.540 **	-0.577 **	1					
slope	-0.448 **	0.550 **	-0.327 **	-0.160	1				
NDVI	0.710 **	-0.586 **	0.303 **	-0.530 **	-0.160	1			
N	0.334 **	0.220 **	-0.259 *	0.835 **	-0.415 **	-0.439 **	1		
C	0.049	-0.057	-0.136	0.703 **	-0.584 **	-0.051	0.808 **	1	
BD	-0.255 *	-0.221 *	0.349 **	-0.838 **	0.468 **	0.379 **	-0.893 **	-0.860 **	1

1) \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ ), \* 表示显著相关( $P < 0.05$ )

## 2.2 土壤呼吸空间分异性的多元线性逐步回归分析

多元线性逐步回归的结果表明, Tolerance 值大于 0.1, VIF 值小于 10, 说明模型不存在共线性问

题. 模型保留参数的回归系数的 Sig. 值均小于 0.01, 表明各系数都达到显著性水平. NDVI 和  $T$  构成的多元线性模型可以解释  $R_s$  空间分异的 64.3% (表 4).

表 4 多元线性逐步回归分析

Table 4 Multiple linear stepwise regression analysis

模型保留参数	模型 $R^2$	回归系数		共线性诊断结果	
		标准化系数	Sig.	Tolerance 值	VIF 值
NDVI	0.643 **	0.386	0.008	0.694	1.441
$T$		0.521	0.001	0.694	1.441

## 2.3 基于地理探测器的土壤呼吸空间分异性分析

### 2.3.1 环境因子对土壤呼吸空间分异性的影响

因子探测器结果表明, 各影响因子  $q$  值均大于 0, 且均通过显著性检验( $P < 0.0001$ ), 表明  $R_s$  在各驱动力分区空间分布存在空间异质性. 影响  $R_s$  的各因子驱动力  $q$  值从大到小依次为: ELE(0.64) >  $T$ (0.59) > NDVI(0.48) > SWC(0.32) > slope(0.27) > N(0.14) > C(0.13) > BD(0.10). 以上分析表明, ELE 和  $T$  是影响研究区  $R_s$  空间分异性的主要驱动因子, 可以解释  $R_s$  空间变化的 64% 和 59%, 其次为 NDVI 和 SWC, 其解释力为 0.48 和 0.32. 土壤因子的解释力较低, N、C 和 BD 的解释力均低于 0.15. 聚类分析表明, 8 个环境因子可以分为 2 类, 一类以 ELE、 $T$  和 NDVI 为代表, 其解释力  $q$  值高于 0.48, 称为主导驱动力; 另一类以 SWC、slope、N、C 和 BD 为代表, 其解释力  $q$  值低于 0.32, 为重要驱动力.

### 2.3.2 各环境因子对土壤呼吸空间分异性的影响显著性分析

通过探测两个影响因子对  $R_s$  的空间变化的驱动作用是否存在显著差异, 即相对重要性是否显著, 进行显著性分析(表 5). 可以看出, ELE 除了与 slope 对  $R_s$  的空间分异性存在显著差异外, 与其他因子均无显著差异;  $T$  除了与 ELE 对  $R_s$  的空间分布变化无显著差异外, 与其他因子均存在显著差异; slope 与 ELE、SWC、 $T$  和 NDVI 对  $R_s$  的空间分布变化具有显著差异; SWC 在对  $R_s$  的空间分异性上与  $T$  和 NDVI 有显著差异; NDVI 与 slope、SWC 和  $T$  对  $R_s$  的空间分布变化具有显著差异; BD、C 和 N 均与其他所有因子对  $R_s$  的空间分布变化不存在显著差异. 结合因子探测器的结果, 可以判断出  $T$ 、ELE 和 NDVI 是土壤呼吸空间分异性的主要驱动因子.

表 5 生态探测器结果<sup>1)</sup>

Table 5 Results of ecoprobe

	slope	ELE	SWC	NDVI	BD	C	N	$T$
slope								
ELE	Y							
SWC	Y	N						
NDVI	Y	N	Y					
BD	N	N	N	N				
C	N	N	N	N	N			
N	N	N	N	N	N	N		
$T$	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	

1) Y 和 N 分别表示在 0.05 水平上存在显著差异和无显著差异

### 2.3.3 环境因子对土壤呼吸空间分异性的交互作用

交互探测器主要用来探测 2 个影响因子共同作用时是否会增加或者减弱对  $R_s$  空间分异性的决定力,或这些因子对  $R_s$  的影响是相互独立的,从而确定 2 因子对  $R_s$  的交互作用是非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立或者非线性增强.交互探测结果表明,8 个影响因子两两间的交互作用的  $q$  值都大于任何因子单独作用的  $q$  值(表 6),表明两因子的交互作用均会增强对  $R_s$  空间分异性的解释能力. ELE 和  $T$  与其他 7 个因子两两之间的交互作用均为双协同作用. NDVI 除与 BD 为非线性协同作用外,与其他 6 个因子两两之间的交互作用均为双协同作用. SWC、slope、BD、C 和 N 这 5 个因子两两之间的交互作用均为非线性协同作用,双

因子的解释能力高于任何一个单因子的  $q$  值. 总体来看,解释力低的单因子两两间的交互作用都高于两个因子  $q$  值的和,而解释力高的单因子与其他因子的交互作用则表现为双协同作用,高于两个变量的最大  $q$  值,低于两个变量的  $q$  值和. 8 个因子中, ELE、 $T$  与其他驱动因子的交互作用解释  $R_s$  空间分异性的能力最强,均为双协同作用,解释力在 0.70 左右,其中  $ELE \cap BD$  ( $q = 0.73$ ) 和  $T \cap slope$  ( $q = 0.74$ ) 的解释力最强. 与两个因子的最大  $q$  值相比, SWC、slope、BD、C 和 N 这 5 个因子两两之间的交互作用的  $q$  值提高幅度较大,解释力都增加了 0.15~0.48. 表明自然条件下,气象、地形、生物和土壤因子对  $R_s$  的空间变化不是单独起作用,也不是简单的双因子叠加,而是通过非线性协同和双协同的双向促进作用来影响  $R_s$  的空间分布.

表 6 各驱动因子对土壤呼吸空间分异性的交互作用探测结果

Table 6 Interactive effects of driving factors on spatial variability of soil respiration

	ELE	slope	SWC	$T$	N	C	BD	NDVI	NPP
ELE	0.642								
slope	0.707	0.265							
SWC	0.712	0.667	0.321						
$T$	0.697	0.740	0.636	0.589					
N	0.714	0.672	0.525	0.666	0.141				
C	0.713	0.445	0.641	0.712	0.614	0.128			
BD	0.731	0.631	0.468	0.679	0.265	0.561	0.100		
NDVI	0.685	0.613	0.568	0.709	0.615	0.572	0.582	0.476	
NPP	0.704	0.498	0.672	0.665	0.676	0.583	0.688	0.673	0.271

### 3 讨论

土壤呼吸的空间变异程度可通过变异系数量化,不同生态系统的土壤微环境不同,所以变异程度不同. 多数研究表明  $R_s$  的 CV 介于 20%~70%<sup>[3,9,26]</sup>,属于中等变异. 张义辉等<sup>[27]</sup>的研究发现太原盆地土壤呼吸的空间 CV 为 32%~59%; Tian 等<sup>[6]</sup>的研究指出湖南省八大公山自然保护区  $R_s$  的平均 CV 为  $(40.7 \pm 2.1)\%$ ; 郭全恩等<sup>[28]</sup>对绿洲荒漠过渡带土壤呼吸进行了研究,结果发现土壤呼吸受到表层水分的限制, CV 为 64.1%~78.1%. 本研究中,庞泉沟  $R_s$  的 CV 为 46%,属于中等变异范围,位于报道的范围内.

地理探测器模型通过探测因变量与自变量之间空间分布格局的一致性,评价自变量对因变量的解释能力,比一般统计量能更明确地揭示因果关系<sup>[15]</sup>. 因子探测器分析表明,海拔、温度和植被指数是影响研究区  $R_s$  空间变化的主导驱动因子,分别可以解释研究区土壤呼吸空间分布的 64%、59% 和 48%. 不同海拔样点数存在差异,通过方差齐性检验

结果为方差齐性,因此对土壤呼吸的空间响应的影响不大. 多元线性回归分析表明  $R_s$  在空间位置产生的变异主要是由温度和植被指数共同影响的,可以解释  $R_s$  空间分异的 64.3%. 温度与海拔相关性很强,存在一定的共线性. 相关分析表明(表 3), ELE 与  $T$  和 NDVI 呈显著负相关( $r$  为  $-0.80$  和  $-0.59$ ,  $P < 0.01$ ), 与 SWC 呈显著正相关( $r = 0.54$ ,  $P < 0.01$ ),表明海拔是多因素的综合反应,随着海拔的升高,温度降低、土壤水分增加,相应的植被类型也出现了有规律的变化(阔叶林-针叶林-亚高山草甸),从而对  $R_s$  空间格局产生重要的影响. 土壤中的生物化学和非生物过程都会受到温度的影响. 随着温度升高,土壤微生物酶活性增强,有机质加速分解,加快了碳周转速率,进而影响  $R_s$ <sup>[29]</sup>. 植被指数和叶面积指数是表征植物光合作用的关键指标,影响  $R_s$  的底物供应<sup>[30]</sup>. 本研究中,归一化植被指数是第 3 个影响  $R_s$  的空间分异的因子,与  $R_s$  呈显著正相关( $P < 0.01$ ). 其原因是地上植被通过光合作用固碳,合成的光合产物分配给根系,根系生物依赖地下的同化产物量,直接影响  $R_s$  的空间变化. 研究区土

壤呼吸与土壤水分呈现负相关,能够解释  $R_s$  空间格局的 32%。这可能是因为,本区属于典型的山地气候,海拔较高(1 600 ~ 2 831 m),全年土壤温度较低,降水充足,土壤蒸发和植物蒸腾较弱,土壤水分维持在一个较高的水平,不存在水分限制  $R_s$  的情况<sup>[31]</sup>,  $R_s$  对温度的变化更为敏感,随着温度的升高而增加,而土壤温度与土壤水分呈极显著负相关( $r = -0.58$ ),因此  $R_s$  表现出与土壤水分呈现负相关的结果。坡度主要通过影响土壤水分、土壤养分含量等进而影响土壤呼吸,随着坡度的增加,土壤总碳和总氮含量显著减低( $r$  为  $-0.58$  和  $-0.42$ ),因此  $R_s$  与坡度呈极显著负相关( $r = -0.45$ ),其解释力  $q$  值为 0.27。此外,本研究中,土壤全氮、总碳和容重分别能解释  $R_s$  的 14%、13% 和 10% 的空间变化。氮是植物生长的重要元素,不仅会影响光合作用,也是根活力指示因子,对  $R_s$  至关重要<sup>[29]</sup>。土壤中氮的变化会影响微生物活性进而影响呼吸,本研究中  $R_s$  与土壤全氮呈极显著正相关( $r = 0.33$ ),与刘燕飞等<sup>[32]</sup>的研究结果相一致。土壤有机质含量对土壤的通风性、阳离子保持能力等都有重要的影响,是微生物呼吸的物质基础<sup>[33]</sup>。本研究中,相关分析和因子探测器都表明,土壤全碳含量对  $R_s$  影响较小,可能与本区海拔较高,土壤有机质含量较高,样地间土壤有机碳含量空间变异较小有关,与董利军等<sup>[34]</sup>的研究结果相一致。土壤容重反映了  $R_s$  的畅通程度,研究结果显示  $R_s$  与容重为显著负相关( $r = -0.26$ ),可能与容重较高,孔隙度较低有关。

自然条件下,  $R_s$  同时受多因素的交互作用,通常对最限制它的因子做出响应<sup>[29]</sup>。在温度低于 5℃ 时,  $R_s$  对水分的变化不敏感,但温度在 10 ~ 20℃ 时反应敏感。同样,水分含量低时对温度的变化不敏感,水分含量高时随着温度的变化而变化<sup>[35]</sup>。当温度和水分含量都不存在限制的时候,二者对  $R_s$  交互作用明显<sup>[35]</sup>。本研究中温度和水分的交互作用高于两个因子的单独作用。其他的因子也可能与温度和水分交互作用影响  $R_s$ 。当温度维持在 14℃ 时,  $R_s$  受水分和 pH 的共同影响。当水分维持在田间持水量的 60% 时,  $R_s$  主要受 pH 和土壤有机质含量的共同影响<sup>[36]</sup>。研究区土壤有机质也与其他因子一起影响  $R_s$ ,交互作用解释力增大。光合作用大部分产物都被分配到土壤易分解的碳库中<sup>[37]</sup>,因此,生长季  $R_s$  随温度变化而产生的变化更大。本研究中,两因子共同作用时均会增加对研究区土壤呼吸空间分布的解释能力,表现为双协同作用或者非线性协同作用,其中  $ELE \cap BD$  ( $q = 0.73$ ) 和  $T \cap slope$  ( $q = 0.74$ ) 的解释

力最强,证明了研究区  $R_s$  同时受到气象、生物、地形和土壤等多个因子相互作用和相互影响,各要素通过其自身性质或与其他要素间相互耦合胁迫来影响  $R_s$  的空间变化。与传统的多元线性回归分析法相比,地理探测器非线性假设,能够探测两变量真正的交互效应,判断两因子是否存在交互作用,以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性,不仅仅局限于用两个变量的乘积来表示交互,而且对自变量间共线性不做要求,避免出现过度拟合的现象<sup>[14,15]</sup>。

#### 4 结论

庞泉沟自然保护区  $R_s$  及其影响因子的空间变异均为中等变异。  $R_s$  与 NDVI、 $T$  和  $N$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 ELE、slope 和 SWC 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),  $R_s$  与 BD 显著负相关( $P < 0.05$ ),与 C 相关性不显著( $P > 0.05$ )。  $R_s$  影响因子驱动力从大到小依次为  $ELE > T > NDVI > SWC > slope > N > C > BD$ 。 ELE、 $T$  和 NDVI 为主导驱动力,其解释力  $q$  值分别为 0.64、0.59 和 0.48。各因子间的交互作用表现为双协同作用和非线性协同作用,表明两因子的交互作用均会增强对  $R_s$  空间分异性的解释能力,其中  $ELE \cap BD$  ( $q = 0.73$ ) 和  $T \cap slope$  ( $q = 0.74$ ) 的解释力最强。表明田间条件下,气象、地形、生物和土壤因子对  $R_s$  的空间变化不是单独起作用,也不是简单的双因子叠加,而是通过非线性协同和双协同的双向促进作用来影响  $R_s$  的空间分布。

#### 参考文献:

- [1] Shi B K, Gao W F, Cai H Y, *et al.* Spatial variation of soil respiration is linked to the forest structure and soil parameters in an old-growth mixed broadleaved-Korean pine forest in northeastern China[J]. *Plant and Soil*, 2016, **400**(1-2): 263-274.
- [2] Liang G P, Cai A D, Wu H J, *et al.* Soil biochemical parameters in the rhizosphere contribute more to changes in soil respiration and its components than those in the bulk soil under nitrogen application in croplands[J]. *Plant and Soil*, 2019, **435**(1-2): 111-125.
- [3] Han M G, Shi B K, Jin G Z. Spatial patterns of soil respiration in a spruce-fir valley forest, Northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(1): 10-22.
- [4] 郑甲佳,黄松宇,贾昕,等. 中国森林生态系统土壤呼吸温度敏感性空间变异特征及影响因素[J]. *植物生态学报*, 2020, **44**(6): 687-698.  
Zheng J J, Huang S Y, Jia X, *et al.* Spatial variation and controlling factors of temperature sensitivity of soil respiration in forest ecosystems across China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(6): 687-698.
- [5] Song Q H, Tan Z H, Zhang Y P, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a seasonal rainforest with complex terrain[J]. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2013, **6**(2): 65-72.
- [6] Tian Q X, Wang D Y, Tang Y N, *et al.* Topographic controls on the variability of soil respiration in a humid subtropical forest[J].

- Biogeochemistry, 2019, **145**(1-2): 177-192.
- [ 7 ] 焦振. 帽儿山温带森林土壤呼吸组分时空动态及其影响因素[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- Jiao Z. Spatiotemporal dynamics in soil respiration components of the temperate forests in the Maoershan region of Northeast China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [ 8 ] Gao G Q, Goebel M, Wang Y, *et al.* Spatial-temporal variations of absorptive fine roots in the organic and soil layers of a *Larix gmelinii* forest[J]. *Trees*, 2021, **35**(3): 1013-1023.
- [ 9 ] Cai Y H, Nishimura T, Ida H, *et al.* Spatial variation in soil respiration is determined by forest canopy structure through soil water content in a mature beech forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **501**, doi: 10.1016/J.FORECO.2021.119673.
- [ 10 ] 廖艳. 我国典型低温区土壤有机碳变化及土壤呼吸特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Liao Y. Soil organic carbon change and soil respiration characteristics in the typical regions with low temperature in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [ 11 ] 毛亚辉. 青藏高原高寒沼泽草甸土壤呼吸动态变化及对增温的响应——以瓦颜山为例[D]. 青海: 青海师范大学, 2016.
- Mao Y H. Respiration dynamic change of the Qinghai-Tibet plateau alpine swamp meadow soil and its response to warming—A case study of WayanShan Mountain [D]. Qinghai: Qinghai Normal University, 2016.
- [ 12 ] 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 等. 桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 924-933.
- Ding M K, Hu X N, Cao J H, *et al.* Spatial variability in soil respiration under different land use patterns in Maocun Village, Guilin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 924-933.
- [ 13 ] 陈全胜. 内蒙古锡林河流域草原群落土壤呼吸的时空变异及其影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院植物研究所), 2002.
- Chen Q X. Study on the spatio-temporal variation of soil respiration and the controlling factors in the Xilin River Basin of inner Mongolia[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences), 2002.
- [ 14 ] 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.
- Wang J F, Xu C D. Geographic detectors: Principles and prospects [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [ 15 ] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, **33**: 114-115.
- [ 16 ] 付明花. 武汉市不透水层时空格局分析及其在城市内涝成因分析中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- Fu M H. Exploring the spatio-temporal patterns of impervious layer in Wuhan and its application in the analysis of urban waterlogging[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [ 17 ] 张莹, 张学玲, 蔡海生. 基于地理探测器的江西省万安县生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(4): 207-214.
- Zhang Y, Zhang X L, Cai H S. Temporal and spatial evolutions and its driving factors of ecological vulnerability in Wan'an county of Jiangxi province based on geogdetector[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(4): 207-214.
- [ 18 ] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别——以环渤海地区为例[J]. *地理研究*, 2015, **34**(6): 1077-1087.
- Yang R, Liu Y S, Long H L, *et al.* Spatial-temporal characteristics of rural residential land use change and spatial directivity identification based on grid in the Bohai Rim in China [J]. *Geographical Research*, 2015, **34**(6): 1077-1087.
- [ 19 ] Wu Q M, Hu W Y, Wang H F, *et al.* Spatial distribution, ecological risk and sources of heavy metals in soils from a typical economic development area, Southeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **780**, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.146557.
- [ 20 ] 李世广, 张峰. 山西庞泉沟国家级自然保护区生物多样性与保护管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- Li S G, Zhang F. Biodiversity, conservation and management of Pangquangou National Nature Reserve, Shanxi [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2014.
- [ 21 ] 马子清. 山西植被[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [ 22 ] 孙道亮. 都江堰市农村居民点时空演变与布局优化研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2020.
- Sun D L. Study on the spatial-temporal evolution and layout optimization of rural settlement areas in Dujiangyan county [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2020.
- [ 23 ] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 161-173.
- Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 161-173.
- [ 24 ] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7621-7631.
- Pan H Y, Huang P, Xu J. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min river based on geographical detector analyses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7621-7631.
- [ 25 ] 周伟, 李丽丽, 周旭, 等. 基于地理探测器的土壤重金属影响因素因子分析及其污染风险评价[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(1): 173-180.
- Zhou W, Li L L, Zhou X, *et al.* Influence factor analysis of soil heavy metal based on geographic detector and its pollution risk assessment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(1): 173-180.
- [ 26 ] 姚雄, 余坤勇, 曾琪, 等. 福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4789-4799.
- Yao X, Yu K Y, Zeng Q, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in the soil erosion area of west mountains in Fujian province, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4789-4799.
- [ 27 ] 张义辉, 李洪建, 荣燕美, 等. 太原盆地土壤呼吸的空间异质性[J]. *生态学报*, 2010, **30**(23): 6606-6612.
- Zhang Y H, Li H J, Rong Y M, *et al.* Study on spatial heterogeneity of soil respiration in Taiyuan Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(23): 6606-6612.
- [ 28 ] 郭全恩, 李保国, 南丽丽, 等. 疏勒河流域绿洲荒漠过渡带土壤呼吸特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(6): 934-938.
- Guo Q E, Li B G, Nan L L, *et al.* Characteristics of soil respiration and its influence factors in oasis-desert transitional belt of Shule River Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(6): 934-938.
- [ 29 ] 严俊霞, 李洪建, 李君剑, 等. 山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1793-

1801.  
Yan J X, Li H J, Li J J, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a planted larch forest in Shanxi Plateau [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1793-1801.
- [30] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及其影响因子研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(4): 689-704.  
Wei S J, Luo B Z, Sun L, *et al.* Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems; a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(4): 689-704.
- [31] Yan J X, Zhang X, Liu J, *et al.* MODIS-Derived estimation of soil respiration within five cold temperate coniferous forest sites in the Eastern Loess Plateau, China[J]. *Forests*, 2020, **11**(2), doi: 10.3390/f11020131.
- [32] 刘燕飞, 张羽, 赖金美, 等. 土壤氮水交互对马尾松和杉木 COS 和 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(16): 5729-5738.  
Liu Y F, Zhang Y, Lai J M, *et al.* Effects of soil nitrogen and water interaction on COS and CO<sub>2</sub> fluxes of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(16): 5729-5738.
- [33] 李键, 刘鑫铭, 姚成硕, 等. 武夷山国家公园不同林地土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, **41**(9): 3588-3602.  
Li J, Liu X M, Yao C S, *et al.* Dynamic change of soil respiration and its effecting factors in different forest lands of Wuyishan National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(9): 3588-3602.
- [34] 董利军, 李金花, 陈珊, 等. 若尔盖湿地高寒草甸退化过程中土壤有机碳含量变化及成因分析[J]. *植物生态学报*, 2021, **45**(5): 507-515.  
Dong L J, Li J H, Chen S, *et al.* Changes in soil organic carbon content and their causes during the degradation of alpine meadows in Zoige Wetland [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45**(5): 507-515.
- [35] 左嫚, 陈奇伯, 黎建强, 等. 枯落物输入变化对云南松林地 CO<sub>2</sub> 释放的影响[J]. *生态学报*, 2021, **41**(11): 4552-4561.  
Zuo M, Chen Q B, Li J Q, *et al.* Effects of alteration in forest litter input on CO<sub>2</sub> release in *Pinus yunnanensis forestland in central Yunnan Plateau* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(11): 4552-4561.
- [36] 李一凡, 王玉杰, 王彬, 等. 三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1457-1467.  
Li Y F, Wang Y J, Wang B, *et al.* Response of soil respiration and its components to simulated acid rain in a typical forest stand in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1457-1467.
- [37] 宋明华, 陈锦, 蒋婧, 等. <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> 示踪不同化学形态氮素添加对高寒草甸植物光合碳分配的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(11): 3688-3697.  
Song M H, Chen J, Jiang J, *et al.* Effect of nitrogen addition with different chemical forms on dynamics of photosynthate using <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> tracing in an alpine grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(11): 3688-3697.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)