

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 ..... 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)

2015年北京大气VOCs时空分布及反应活性特征 ..... 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)

北京市建筑类涂料VOCs排放清单编制技术方法及应用 ..... 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)

基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征 ..... 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)

2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 ..... 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)

北京市大气环境PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>及其碳质组分季节变化特征及来源分析 ..... 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)

南京春季北郊地区大气PM<sub>2.5</sub>中主要化学组分及碳同位素特征 ..... 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)

热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 ..... 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)

杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 ..... 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)

基于远程通讯技术的混动公交车SCR系统运行及NO<sub>x</sub>排放特征 ..... 杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)

基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 ..... 李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)

重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 ..... 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)

黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 ..... 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)

脱甲河水系N<sub>2</sub>O关键产生过程及氮素来源探讨 ..... 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)

生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 ..... 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)

黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 ..... 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)

城市黑臭水体的吸收特性分析 ..... 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)

岷江上游水体中DOM光谱特征的季节变化 ..... 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)

防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 ..... 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)

基于δ<sup>15</sup>N和δ<sup>18</sup>O的农业区地下水河硝酸盐污染源 ..... 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)

垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 ..... 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)

铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 ..... 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)

基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 ..... 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)

AAO工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 ..... 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)

抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 ..... 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)

磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 ..... 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)

海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 ..... 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)

低温下A<sup>2</sup>/O-BAF反硝化除磷脱氮特性 ..... 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)

O<sub>3</sub>-BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 ..... 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)

基于MBR不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 ..... 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)

3种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 ..... 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)

硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 ..... 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)

包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 ..... 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)

中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 ..... 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)

典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 ..... 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)

秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 ..... 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)

不同肥料施用对设施蔬菜地NH<sub>3</sub>挥发和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)

施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 ..... 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)

长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 ..... 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)

典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 ..... 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)

凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 ..... 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)

天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 ..... 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)

水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 ..... 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)

窖水中微生物降解污染物的关键细菌 ..... 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)

砷氧化菌对胡敏酸络合As(III)的氧化作用 ..... 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)

海域高温油田1株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 ..... 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)

1株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌Zobellella sp. B307的分离及脱氮特性 ..... 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岩然 (4793)

1株镰刀菌属KY123915的分离及其对17β-雌二醇的降解特性 ..... 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)

氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 ..... 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)

林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 ..... 任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)

DEP对蚯蚓抗氧化酶系的影响及DNA损伤 ..... 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)

生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 ..... 李建陶, 曾鸣 (4834)

《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)

# 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响

田飞飞<sup>1</sup>, 纪鸿飞<sup>1</sup>, 王乐云<sup>1</sup>, 郑西来<sup>1,2\*</sup>, 辛佳<sup>1,2\*</sup>, 能惠<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:** 为了揭示土壤水分、温度和添加不同氮肥对大沽河流域农田土壤氮素矿化的影响, 设置对照(CK)、添加尿素 N 120 mg·kg<sup>-1</sup>(Ur)和添加尿素 N 36 mg·kg<sup>-1</sup> + 有机肥(相当于添加 N 120 mg·kg<sup>-1</sup>, UM)这 3 个处理进行为期 84 d 的室内恒温培养实验, 实验共设 3 个培养温度(15、25 和 35℃)和 3 个水分梯度[60%、75% 和 90% 田间持水量(WHC)]. 结果表明, 施肥类型和培养温度对土壤氮素矿化速率、累积矿化量和氮潜在矿化势( $N_0$ )均具有显著影响( $P < 0.01$ ). 与 CK 处理相比, Ur 和 UM 处理的矿化速率和累积矿化量分别增加了 1.46~8.17 和 2.00~8.15 倍. 各施肥处理的土壤氮矿化速率和累积矿化氮量随温度升高而增加, 且各温度梯度之间差异均达到显著水平( $P < 0.05$ ). 与未施肥处理相比, Ur 和 UM 施肥处理均能够显著提高土壤中可溶性有机氮(SON)的含量, 且施肥处理土壤中 SON 含量与氮素累积矿化量之间有显著负相关关系, 表明 SON 作为一个不可忽视的组分, 参与了土壤氮素矿化过程. 升高温度能显著提高土壤中 SON 的矿化速率和矿化强度, 但水分对各处理土壤的 SON 无显著影响. 此外, 施肥处理显著降低了土壤氮矿化的温度敏感性( $Q_{10}$ )( $P < 0.05$ ), 尿素配施有机肥处理的土壤的氮矿化温度敏感系数最低( $Q_{10} = 1.01$ ), 说明配施有机肥显著降低了土壤氮素矿化速率对温度变化响应的强度, 这有利于减缓高温条件下矿质氮的释放速率, 并提升作物对氮素的利用效率.

**关键词:** 有机肥; 氮素矿化; 水分; 可溶性有机氮; 温度敏感性( $Q_{10}$ )

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4717-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801040

## Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil

TIAN Fei-fei<sup>1</sup>, JI Hong-fei<sup>1</sup>, WANG Le-yun<sup>1</sup>, ZHENG Xi-lai<sup>1,2\*</sup>, XIN Jia<sup>1,2\*</sup>, NAI Hui<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** An 84-day laboratory incubation experiment was conducted to investigate the effects of different fertilizers (urea; manure), moisture conditions (60%, 75% and 90% water holding capacity) and temperatures (15, 25 and 35°C) on nitrogen mineralization. The experiment included 3 treatments: ①CK, unfertilized control; ②Ur, adding urea at N 120 mg·kg<sup>-1</sup>; ③UM, adding urea and manure (equal to adding N 120 mg·kg<sup>-1</sup>). Total inorganic nitrogen and soluble organic nitrogen (SON) were determined at different times throughout the experiment. The results showed that soil temperature and fertilization type had significant impacts on the net mineralization rates, cumulative mineralization, and the potentially mineralizable nitrogen ( $N_0$ ) ( $P < 0.01$ ). In addition, the soil net N mineralization rates and cumulative mineralization significantly ( $P < 0.05$ ) increased by 1.46-8.17 and 2.00-8.15 times, respectively, when fertilizers were added into soils. The soil net N mineralization rates and cumulative mineralization increased with the increase of temperature. Compared with CK treatment, Ur and UM treatments could significantly increase the content of soil soluble organic nitrogen (SON). There was a significant negative correlation between the content of SON and cumulative mineralization. It indicated that SON was involved in soil nitrogen mineralization as a non-negligible component. Increasing the temperature could significantly increase the mineralization rate and mineralization intensity of SON in soil, but the water content had no significant influence on the SON of the soils. Moreover, the authors found that fertilization treatment worked significantly in decreasing the  $Q_{10}$  value for soil N mineralization compared with CK treatment. Further, the  $Q_{10}$  value was significantly lowest in UM treatment ( $Q_{10} = 1.01$ ). The results showed that the application of organic manure significantly reduced the sensitivity of the rate of nitrogen mineralization to temperature changes, which was beneficial in slowing down the release rate of mineral nitrogen under high temperatures and improving the nitrogen utilization efficiency of crops.

**Key words:** organic fertilizer; soil nitrogen mineralization; soil moisture; soluble organic nitrogen; temperature sensitivity ( $Q_{10}$ )

收稿日期: 2018-01-04; 修订日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41731280); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402810)

作者简介: 田飞飞(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源利用与水污染控制, E-mail: tianff1114@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhixilai@ouc.edu.cn; xinjl5@ouc.edu.cn

氮素是土壤中影响植物生长和农田生态系统生产力的主要限制因子。土壤中的氮素主要以有机态氮形式存在,植物直接吸收利用的有效态氮主要以矿质氮为主,土壤有机态氮需要经过土壤微生物的矿化作用,才能转化为可被植物直接吸收利用的有效态氮<sup>[1]</sup>。土壤氮素矿化是一个复杂的生化过程,土壤温度、水分、土壤理化性质、施肥管理等因素及其变化都会影响土壤氮素矿化强度<sup>[2-5]</sup>。在全球变暖背景下,土壤的水热环境发生极大变化,土壤氮素矿化对温度和水分变化响应的研究备受瞩目。有研究表明,土壤净氮矿化速率与温度呈显著正相关,升高温度能增强微生物的活性,促进土壤氮素矿化<sup>[2,6]</sup>。也有研究表明,土壤水分也是调控土壤氮素矿化的重要驱动因子,土壤水分接近田间持水量时净氮矿化速率最高<sup>[4]</sup>。在自然条件下土壤温度的变化往往伴随着湿度的变化,Wang 等<sup>[7]</sup>的研究表明,温度和水分并不是单独影响土壤氮素矿化的,它们对土壤氮素矿化具有明显的交互作用。施肥是农田生态系统调节土壤供氮能力和作物增产的普遍措施,氮肥施入土壤中有机态氮矿化数量和强度决定其对植物吸收氮素的供应能力。但一旦氮肥施用过量,将会造成氮素的损失,同时损失的氮素会通过径流、淋溶、氨挥发、反硝化等途径进入水体或大气,导致地下水硝酸盐污染、水体富营养化及温室效应等<sup>[8,9]</sup>。因此,研究施肥对农田土壤氮素转化的影响有重要的生态价值。

近年来,关于温度、水分、施肥等单一因素对农田土壤氮素矿化的影响已有大量研究<sup>[9-12]</sup>,但关于施肥与土壤温度、土壤水分等对土壤氮素矿化的复合作用研究较少,同时施加氮肥后土壤氮素矿化温度敏感性变化规律的研究也鲜有报道。土壤可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)虽仅占土壤全氮 0.3%~1%,却是土壤氮库中最活跃的组分之一,对植物营养及不同生态系统氮素循环起着重要的作用<sup>[13]</sup>。一方面,SON 可以作为植物生长可利用氮素的直接或间接来源;另一方面,SON 的移动性相对较强,可随土壤水分运移而发生径流或淋溶损失,造成环境污染<sup>[14,15]</sup>。因此,近年来关于土壤中可溶性有机氮的研究引起国内外不少学者的重视。SON 含量及其在土壤中的行为易受土壤类型、施肥状况以及土壤水热变化等因素的影响<sup>[16-18]</sup>,目前关于这些因素对土壤中 SON 含量影响的研究相对较少,且得到的结果也不尽一致。有研究表明,仅添加外源有机物料和施用化肥均可显著影响

土壤 SON 的变化<sup>[19]</sup>,但外源有机物料和化肥的配施效果更显著,可大大提高土壤 SON 的含量<sup>[20]</sup>。虽然添加外源有机物料等不同施肥措施对农田土壤 SON 的影响研究较多,但不同施肥条件下土壤中 SON 的含量及变化规律对温度和湿度的响应鲜见报道。为此,本文以大沽河地下水源地农田土壤为研究对象,采用室内模拟培养实验,并根据实际农田土壤温度和湿度的变化幅度,设计一系列温度和水分梯度,研究温度和湿度的变化对不同施肥处理的土壤氮素矿化作用及 SON 含量的影响,探讨土壤氮素矿化与 SON 之间的关系,并利用温度敏感系数( $Q_{10}$ )来揭示土壤氮素矿化对施肥和温度变化的响应趋势,以期合理施肥及有效调控土壤氮素供应提供理论依据,并为预测气候变化对农田土壤氮素循环的影响提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤样品

大沽河地下水源地位于青岛市的西北部,是青岛市重要水源地之一,地理位置为 120°04'48"~120°21'00" E, 36°18'00"~36°45'45" N,面积为 436.8 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。大沽河流域的气候属于温带季风型大陆性气候;年平均气温 11.7℃,年降水量在 680~700 mm 之间。该研究区有大量农田分布,土壤类型主要为棕壤、沙姜黑土和潮土等,其中棕壤土分布区域最广。

供试土样于 2016 年 10 月在大沽河地下水源地中上游的莱西市店埠镇东庄头村试验田(120°21' E, 36°44' N)采集,沿 S 形路线随机采集 0~20 cm 表层土样,去除混合土样中的活体根系及可见有机物残体后,取部分新鲜土样过 2 mm 筛,4℃ 下保存;剩余混合土样自然风干后,磨细过 2 mm 筛备用。土壤的基本理化性状为:土壤类型为砂质黏壤土(砂粒:粉粒:黏粒=59:17:24),pH 为 5.21,田间持水量为 15%,土壤容重 1.47 g·cm<sup>-3</sup>,总碳 6.40 g·kg<sup>-1</sup>,总氮 677.60 mg·kg<sup>-1</sup>,碳氮比 9.41,铵态氮 3.29 mg·kg<sup>-1</sup>,硝态氮 51.40 mg·kg<sup>-1</sup>。实验所用肥料为尿素和牛粪。选用的牛粪经风干后,粉碎过 1 mm 筛后备用,其中牛粪中总碳和总氮含量分别为 203.9 g·kg<sup>-1</sup>和 15.53 g·kg<sup>-1</sup>,碳氮比为 13.13。

### 1.2 实验设计

本研究采用室内恒温好气培养方法,设置培养温度、土壤含水量和施肥处理这 3 个因素,设 3 个

土壤水分含量水平: 60% WHC (田间水量)、75% WHC 和 90% WHC, 分别记为 M1、M2 和 M3; 3 个温度水平: 15、25 和 35℃, 分别记为 T1、T2 和 T3; 3 个不同施肥处理: ①CK, 不施氮肥; ②Ur, 单施尿素, 施氮量为 120 mg·kg<sup>-1</sup>; ③UM, 尿素配施有机肥, 施氮量为 120 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中 36 mg·kg<sup>-1</sup> 来源于尿素, 84 mg·kg<sup>-1</sup> 来源于牛粪。采用完全随机设计, 共 27 个处理, 每个处理重复 3 次。其中 CK: 总碳 6.40 g·kg<sup>-1</sup>, 总氮 677.60 mg·kg<sup>-1</sup>, 碳氮比 9.41; Ur: 总碳 6.45 g·kg<sup>-1</sup>, 总氮 761.30 mg·kg<sup>-1</sup>, 碳氮比 8.50; UM: 总碳 7.67 g·kg<sup>-1</sup>, 总氮 779.80 mg·kg<sup>-1</sup>, 碳氮比 9.84。

培养实验进行之前, 首先用去离子水将供试土壤含水量调节至 60% WHC, 置于 25℃ 恒温培养箱中预培养 1 周以消除土壤机械搅动的干扰, 并使土壤中的微生物恢复活性。预培养结束后, 实验选用带盖的 150 mL 聚丙烯杯, 称取相当于 50 g 干土的鲜土于聚丙烯杯中, 并按照上述施肥处理, 向土壤中添加肥料并混匀。加入肥料后, 再用去离子水将土壤含水量调节至田间持水量的 60%、75% 和 90%。在杯盖上用针扎几个孔, 将各处理分别放置在 15℃、25℃ 和 35℃ 培养箱中恒温培养。在培养过程中每隔 3 d 用称重法调节和保持土壤含水量的恒定。各处理分别在培养后 0、1、4、7、14、21、35、49 和 84 d 取样, 每次每个处理随机取 3 个平行样, 并测定土壤矿质氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 含量和可溶性有机氮 (SON) 含量。

### 1.3 测定指标和方法

土壤矿质氮和 SON 用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提 (土水比为 1:10), 浸提液经 0.45 μm 滤膜过滤后, 采用靛酚蓝比色法测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 采用紫外分光光度法测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; 采用碱性过硫酸钾氧化法测可溶性总氮<sup>[22]</sup>, 浸提液中的 SON 含量为可溶性总氮与矿质氮之差; 土壤和有机肥的总氮 (TN) 和总碳 (TC) 采用碳氮元素分析仪法测定; 土壤 pH 采用酸度计法测定, 土水比为 1:2.5; 土壤容重和田间持水量采用环刀法测定; 机械组成采用比重法<sup>[23]</sup>。

### 1.4 数据处理与统计方法

累积矿化氮量  $N_{\min}$  = 土壤培养后矿质氮含量 - 土壤培养前初始矿质氮含量

矿化速率  $R$  = (土壤培养后矿质氮含量 - 土壤矿质氮含量) / 培养天数

结合室内培养数据和分析测定的数据, 本研究运用一级动力学方程<sup>[24]</sup>对培养期间土壤累积矿化

氮量的动态变化进行研究。一级动力学方程为:

$$N_{\min}(t) = N_0 \times (1 - e^{-kt})$$

式中,  $N_{\min}(t)$  表示培养时间  $t$  时的累积矿化氮量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $N_0$  表示土壤有机氮矿化势, mg·kg<sup>-1</sup>;  $k$  表示矿化速率常数, d<sup>-1</sup>。

土壤氮矿化速率与温度之间的关系采用 Arrhenius (阿累尼乌斯) 方程指数模型<sup>[4]</sup>拟合:

$$R = a \times e^{bT}$$

式中,  $R$  为不同培养温度和水分下的土壤矿化速率, mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;  $T$  为培养温度, °C;  $b$  为温度反应系数;  $a$  为基质质量指数, mg·(kg·d)<sup>-1</sup>。土壤氮素矿化的温度敏感性 ( $Q_{10}$ ) 的计算方法如下:

$$Q_{10} = e^{10b}$$

本实验数据用 SPSS 19.0 进行相关指标的相关性分析和差异显著性分析, 用 Origin 9.1 统计软件进行拟合分析及绘图。

## 2 结果与分析

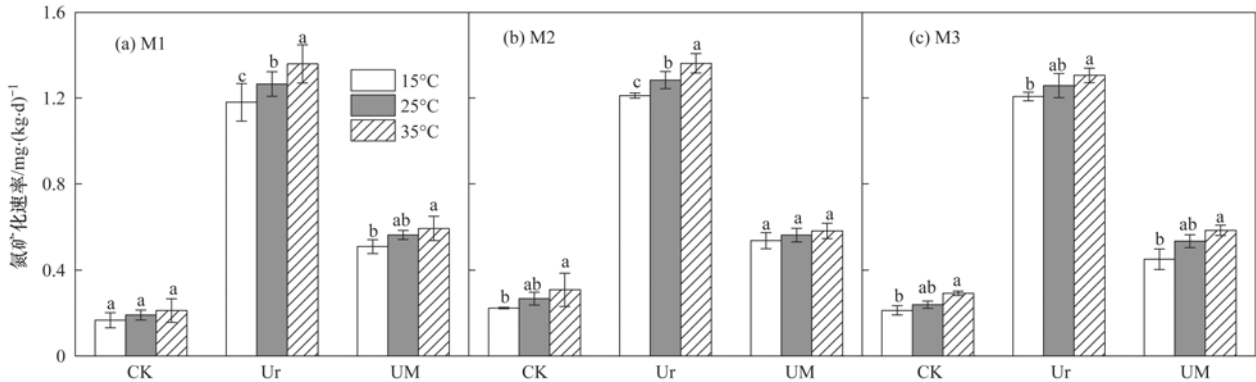
### 2.1 水分和温度对各施肥处理土壤氮素矿化速率的影响

由图 1 可知, 施肥类型和温度对氮矿化速率均具有显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 在同一水分条件下, 各处理土壤的氮矿化速率均随温度升高而呈上升趋势, 各温度梯度之间的矿化速率达到显著差异 ( $P < 0.01$ )。各施肥处理显著增强了土壤氮矿化速率, Ur 和 UM 处理的氮矿化速率是 CK 处理的 1.46 ~ 8.17 倍, 且添加尿素的土壤氮矿化速率始终高于 CK 和 UM。Ur 和 UM 处理的土壤氮矿化速率对温度变化的响应强度存在差异, 在不考虑水分的状况下, Ur 处理的氮矿化速率随温度上升趋势显著高于 UM。对比不同水分处理可知, 各处理土壤氮矿化速率均呈先升高后降低的趋势, 在 75% WHC 下, 土壤氮矿化速率达到最大, 但各水分梯度之间的氮矿化速率未达到显著差异 ( $P = 0.182$ ), 见表 1。

表 1 不同施肥处理、温度和水分对土壤氮矿化速率和累积矿化量影响的方差分析

Table 1 Variance analysis of effects of fertilizer type, soil moisture and temperature on soil cumulative mineralization

因素	and N mineralization rate			
	氮矿化速率		84 d 累积矿化量	
	F	P	F	P
施肥类型 (N)	1 546.82	< 0.001	48 826.78	< 0.001
温度 (T)	13.81	< 0.001	434.92	< 0.001
水分 (M)	1.76	0.182	35.87	< 0.001
T × M	0.02	0.987	3.46	< 0.05



M1、M2 和 M3 分别代表 60% 田间持水量(WHC)、75% WHC 和 90% WHC, CK、Ur 和 UM 分别代表不施肥对照、单施尿素和尿素配施有机肥处理, 不同小写字母表示在同一施肥处理内差异达到显著水平( $P < 0.05$ )

图 1 不同温度和水分条件下各施肥处理土壤氮矿化速率

Fig. 1 Soil N mineralization rate under different fertilizer addition, soil temperature and moisture conditions

## 2.2 土壤氮素矿化累积量动态变化

图 2 为不同水热条件添加不同氮肥后土壤氮累积矿化量随培养时间的动态变化. 随着培养周期的延长, 不同水热条件各施肥处理土壤氮累积矿化量均呈明显增加的趋势, 并在培养后期相对稳定. 培养前期(0~14 d)土壤的累积矿化量可占整个培养周期总累积矿化量的 55.28%~95.32%. 在不同水热条件下, 不同施肥处理土壤的累积矿化量比较表明, Ur 处理的累积矿化量显著高于 CK 和 UM 处理, 其中 Ur 处理最大, 为  $114.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其次是 UM 处理, 为  $50.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , CK 处理最小, 仅为  $25.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 可见, 各施肥处理显著提高了土壤氮累积矿化量. 在等氮投加的情况下, Ur 处理累积矿化量显著高于 UM 处理, Ur 处理累积矿化量较 UM 处理提高了 228.48%. 在同一水分条件下, 各温度处理的土壤累积矿化量间的差异均达到显著水平( $P < 0.01$ ), 其大小顺序为:  $35^\circ\text{C} > 25^\circ\text{C} > 15^\circ\text{C}$ . 对比不同水分处理可知, 在  $25^\circ\text{C}$  和  $35^\circ\text{C}$ , 75%

WHC 下的累积矿化氮量要显著高于 60% WHC 和 90% WHC 下的( $P < 0.05$ ). 而在  $15^\circ\text{C}$  时, 各施肥处理的土壤的累积矿化量在各水分之间均未达到显著差异( $P > 0.05$ ). 对土壤氮矿化累积量进行方差分析, 结果表明, 施肥类型、温度和水分均能显著影响土壤氮矿化累积量, 且温度和水分间存在显著的交互效应(表 1).

## 2.3 土壤可溶性有机氮含量动态变化

### 2.3.1 温度对可溶性有机氮含量的影响

图 3 为土壤含水量为 75% WHC 时, 不同温度条件下添加不同氮肥后土壤可溶性有机氮(SON)随培养时间的动态变化. 从中可以看出, 添加不同外源氮肥后, 土壤中 SON 含量的变化比较复杂, 总体趋势为培养初期 SON 含量均显著降低, 随后又有所增加, 但是增加幅度有限, 最后在培养后期相对稳定, 回归到土壤背景值左右. 在培养前期, Ur 处理的土壤 SON 含量最高( $152.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 其次是尿素配施有机肥土壤( $90.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 而不施

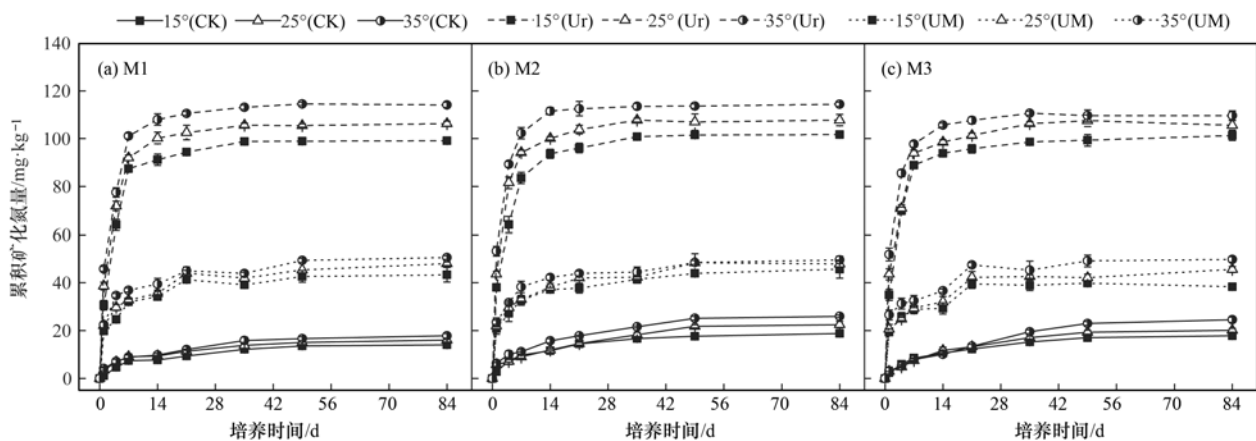


图 2 不同温度和水分条件下各施肥处理土壤有机氮累积矿化量

Fig. 2 Soil cumulative mineralization under different fertilizer addition, soil temperature and moisture conditions

肥处理土壤 SON 含量最低 ( $72.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 且各处理间 SON 含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 施加不同氮肥均能显著提高土壤可溶性有机氮含量. 随着培养时间的延长各处理间可溶性有机氮差异逐渐减小, 培养结束时, 土壤可溶性有机氮含量介于  $65.79 \sim 47.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 且 CK 处理的 SON 含量 ( $65.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 显著高于 Ur ( $47.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和

UM ( $51.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ( $P < 0.05$ ). 由图 3 可知, 温度对 Ur 和 UM 处理中 SON 含量有显著影响, 其大小表现为  $15^\circ\text{C} > 25^\circ\text{C} > 35^\circ\text{C}$ , 且  $15^\circ\text{C}$  下的 SON 含量显著高于  $25^\circ\text{C}$  和  $35^\circ\text{C}$  下的 ( $P < 0.05$ ). 提高温度可以显著提高各施肥处理土壤中 SON 的转化效率, 与  $15^\circ\text{C}$  处理相比,  $25^\circ\text{C}$  和  $35^\circ\text{C}$  处理的土壤中 SON 的转化率值提高了  $5.6\% \sim 15.7\%$ .

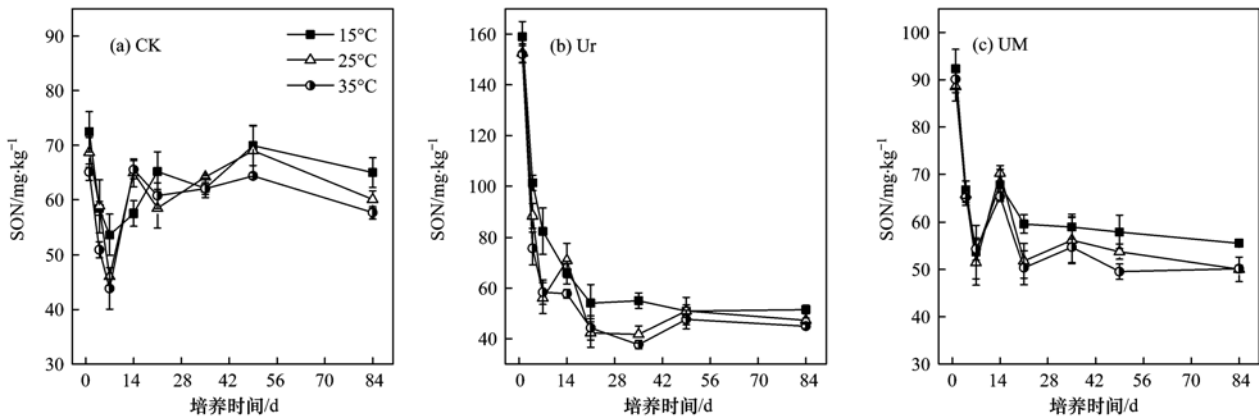


图 3 不同温度条件对各施肥处理土壤 SON 的影响

Fig. 3 Effect of temperature on the concentration of soil SON with different fertilizer additions

### 2.3.2 水分对可溶性有机氮含量的影响

图 4 为培养温度为  $25^\circ\text{C}$  时, 不同水分条件下添加不同氮肥后土壤中 SON 含量随培养时间的动态变化. 从中可知, 各施肥处理土壤在不同水分处理下 SON 随培养时间的变化规律与在各温度处理下的变化规律一致. 培养前期 ( $0 \sim 35 \text{ d}$ ), 不同施肥处理土壤中 SON 含量对水分的响应强度不同, 单施尿素 (Ur) 处理土壤中 SON 含量表现为  $75\% \text{ WHC}$  和  $90\% \text{ WHC}$  下的 SON 显著高于  $60\% \text{ WHC}$  下的 ( $P < 0.05$ ), 但 CK 和 UM 处理在各水分处理之间的差异性均未达到显著水平. 培养后期, 不同施肥处理土壤中 SON 含量在各水分处理

间无显著差异.

### 2.3.3 土壤累积矿化氮量与可溶性有机氮 (SON) 相关性分析

图 5 为当含水量为  $75\% \text{ WHC}$  时, 不同温度条件下各施肥处理土壤累积矿化氮量与 SON 含量相关性分析. 结果表明, 添加不同氮肥均能提高土壤中可溶性有机氮的含量, 在培养过程中, 土壤累积矿化氮量与 SON 含量在 Ur ( $r = -0.968$ ,  $P < 0.01$ ) 和 UM ( $r = -0.887$ ,  $P < 0.01$ ) 施肥处理中呈显著负相关, 施肥处理土壤中 SON 含量随着累积矿化氮量  $N_{\text{min}}$  的增加而降低, 但在 CK ( $r = -0.118$ ) 处理中无显著相关性.

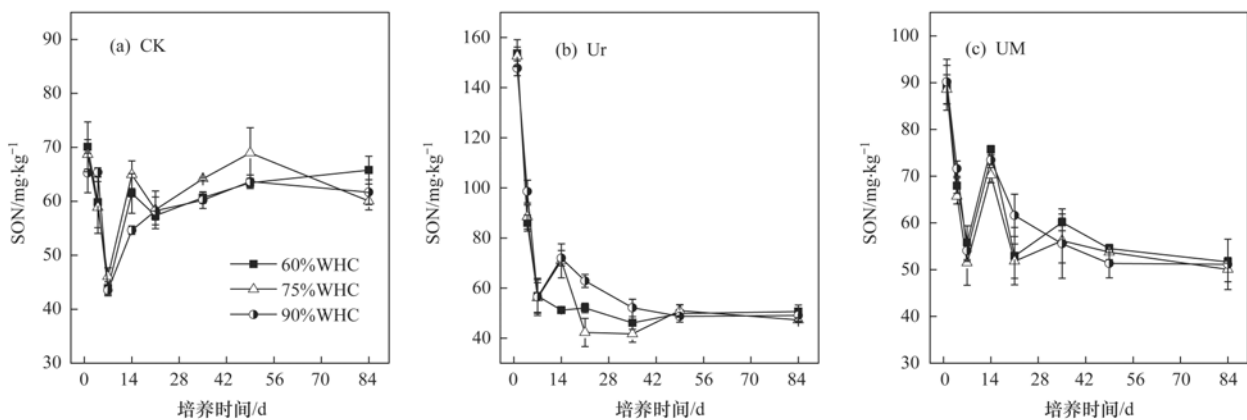


图 4 不同水分条件对各施肥处理土壤 SON 的影响

Fig. 4 Effect of soil moisture on the concentration of soil SON with different fertilizer additions

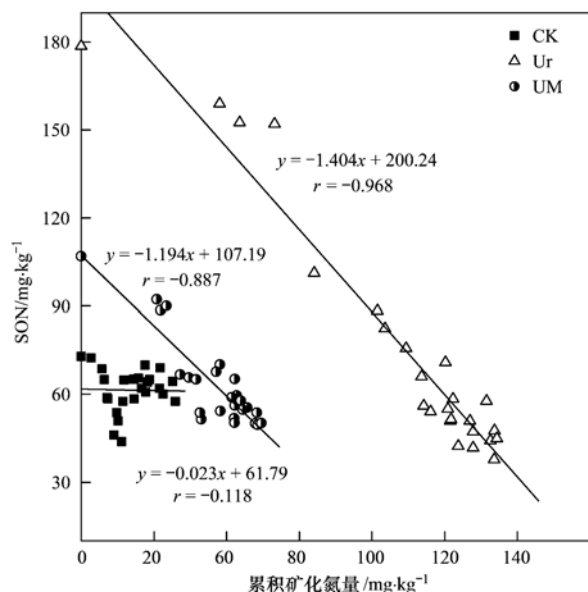


图5 土壤累积矿化氮量与 SON 相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between cumulative mineralization and SON during incubation

#### 2.4 土壤氮素矿化的动力学特征

由表2可以看出,一级动力学方程能很好地描述各处理土壤氮素的矿化动态,方程拟合的相关系数均达到显著水平( $P < 0.05$ ).与CK比较,添加

氮肥能显著提高土壤中潜在矿化势( $N_0$ ),并且土壤潜在矿化势随温度的升高而增加.在温度为35℃时Ur处理土壤的潜在矿化势最高,为111.49  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,CK土壤最低,为25.58  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .CK处理中矿化速率常数 $k$ 值的变化范围为0.0408~0.1124  $\text{d}^{-1}$ ,Ur处理中 $k$ 值的变化范围为0.3001~0.5201  $\text{d}^{-1}$ ,UM处理中 $k$ 值的变化范围为0.6283~0.2373  $\text{d}^{-1}$ .Ur和UM处理中矿化速率常数 $k$ 值在各温度间差异显著( $P < 0.05$ ),即当在35℃时,土壤氮素的矿化最快,15℃时最慢,这与土壤累积矿化量的变化规律相似.

#### 2.5 施肥和水分对土壤氮矿化温度敏感性( $Q_{10}$ )的影响

利用一级指数模型: $R = a \times e^{(bt)}$ ,计算各处理土壤氮素矿化温度敏感性系数 $Q_{10}$ 值(表3).结果显示,指数模型能显著地描述土壤氮素矿化速率与温度之间的关系( $R^2 > 0.87$ ,  $P < 0.05$ ).不同处理间 $Q_{10}$ 的变化范围在1.01~1.27之间.施肥能显著影响温度敏感系数 $Q_{10}$ 值( $F = 83.62$ ,  $P < 0.001$ ),CK的平均 $Q_{10}$ 值(1.20)显著高于Ur(1.06)和UM(1.02)的.与CK处理相比,施肥处理的 $Q_{10}$ 值降低

表2 不同温度和水分条件下土壤氮素矿化的一级动力学拟合结果<sup>1)</sup>

Table 2 First-order kinetic for describing N mineralization dynamics under different soil temperature and moisture conditions

水分	温度 /℃	潜在矿化势( $N_0$ )/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			矿化速率常数 $k/\text{d}^{-1}$			$R^2$		
		CK	Ur	UM	CK	Ur	UM	CK	Ur	UM
60% WHC <sup>2)</sup>	15	13.41d	96.91d	39.89c	0.0762c	0.3024d	0.2937f	0.92**	0.97**	0.73*
	25	14.49cd	103.74b	42.01ab	0.1124a	0.3352c	0.3717de	0.77*	0.96**	0.65
	35	16.66c	111.49a	44.38a	0.0856b	0.3613b	0.4802b	0.80*	0.96**	0.71*
75% WHC	15	17.01c	97.67d	36.33d	0.0776c	0.3502bc	0.3870d	0.95**	0.98**	0.85*
	25	19.90b	103.33b	41.13bc	0.0610cd	0.3606b	0.2373g	0.88*	0.94**	0.73*
	35	25.58a	106.76ab	42.85ab	0.0408e	0.5201a	0.6283a	0.90**	0.93**	0.40
90% WHC	15	17.57c	98.56cd	40.47bc	0.0994ab	0.3001d	0.3512e	0.94**	0.96**	0.73*
	25	21.88b	104.25b	42.97ab	0.0630cd	0.4296ab	0.3403ef	0.87*	0.90*	0.84*
	35	24.44a	111.33a	44.70a	0.0826b	0.5128a	0.4269c	0.96**	0.88*	0.79*

1) \*表示 $P < 0.05$ , \*\*表示 $P < 0.01$ ; 同列数据中的不同小写字母表示有显著差异( $P < 0.05$ ); 2) WHC表示田间持水量,下同

表3 土壤氮矿化速率的一级指数模型参数<sup>1)</sup>

Table 3 Model parameters of the exponential function for N mineralization rates

处理	水分	$a/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	$b$	$R^2$	$Q_{10}$
CK	60% WHC	0.2760 ± 0.0008	0.0133 ± 0.0003	0.99**	1.24 ± 0.02
	75% WHC	0.3311 ± 0.0880	0.0234 ± 0.0001	0.95*	1.27 ± 0.04
	90% WHC	0.3343 ± 0.0554	0.0148 ± 0.0021	0.97*	1.20 ± 0.01
Ur	60% WHC	0.9193 ± 0.0016	0.0063 ± 0.0001	0.99**	1.07 ± 0.02
	75% WHC	0.9516 ± 0.0120	0.0055 ± 0.0120	0.98*	1.06 ± 0.03
	90% WHC	0.9345 ± 0.0263	0.0054 ± 0.0148	0.90*	1.05 ± 0.02
UM	60% WHC	1.0002 ± 0.0170	0.0058 ± 0.0006	0.93*	1.01 ± 0.01
	75% WHC	1.0840 ± 0.0217	0.0036 ± 0.0006	0.98*	1.03 ± 0.04
	90% WHC	0.9697 ± 0.0210	0.0144 ± 0.0008	0.87*	1.01 ± 0.01

1) \*表示 $P < 0.05$ , \*\*表示 $P < 0.01$



了 5.3% ~ 18.1%, 与 UM 处理相比, 单施尿素显著提升了土壤氮素矿化温度敏感性.  $Q_{10}$  值在各水分处理之间或者施肥和水分交互作用之间的差异性均未达到显著水平 ( $P=0.062$ ). 对基质质量指数  $a$  和 SON 与  $Q_{10}$  进行相关性分析, 结果表明  $Q_{10}$  与基质质量指数  $a$  具有极显著的负相关关系, 相关系数  $r$  为  $-0.84$  ( $P<0.01$ ), 而  $Q_{10}$  与 SON 无显著相关关系 ( $r = -0.343$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 温度和水分对添加不同施肥土壤氮素矿化特征的影响

土壤有机氮首先通过氨化作用转化成铵态氮, 再进一步通过硝化作用转化为硝态氮, 而土壤氮素转化所包含的一系列生物化学过程都受到温度的影响<sup>[4]</sup>. 在全球气候变暖的背景下, 全球平均表面温度不断增加, 研究报告指出, 近 50 年来, 我国年平均气温增加了  $1.1^{\circ}\text{C}$ <sup>[25]</sup>, 温度变化无疑将会改变生态系统氮循环的功能过程. 因此, 研究温度对农田土壤氮素矿化过程的影响具有重要的生态意义. 本研究发现在整个培养期内, 各处理土壤的矿化速率和累积矿化氮量均随着温度升高而呈上升趋势, 并且各温度梯度之间差异达到显著水平, 这与其他学者所得到的研究结果相似<sup>[26,27]</sup>. 这主要是因为温度上升会促使土壤中微生物和酶的活性增强, 进而对土壤中有机氮的分解和矿化的速率产生影响, 且微生物的生长繁殖在高温条件 ( $35^{\circ}\text{C}$ ) 下更快, 这更有利于土壤氮矿化作用的进行. 另外, 土壤微生物通过胞外酶的分解作用将大部分的有机质解聚成自由的单体 (如糖类和氨基酸等)<sup>[28]</sup>, 而参与有机质分解催化作用的主要酶 (如纤维素酶, 蛋白酶) 的活性在  $25 \sim 50^{\circ}\text{C}$  时, 随温度的升高而增强<sup>[29]</sup>. 因此,  $35^{\circ}\text{C}$  时土壤氮矿化作用强度要显著高于  $15^{\circ}\text{C}$  下的 ( $P<0.01$ ). 在农田系统中, 施肥是调节土壤供氮状况的重要措施. 研究表明施肥处理 ( $U_r$  和 UM) 显著提高各温度下土壤的矿化速率、矿化累积量及氮矿化势, 提高了土壤的供氮容量, 这与李文军等<sup>[30]</sup> 的研究结果一致. 不同施肥处理间氮素矿化速率的差异可能与外源氮肥的 C/N 及全氮含量的差异有关<sup>[31]</sup>. 本研究中, UM 的 C/N 和有机碳较  $U_r$  处理高, 而 UM 处理的氮矿化速率显著低于  $U_r$  处理证实了上述结果. 一方面, 施加氮肥本身带入大量活性氮素, 尿素作为小分子的有机氮被优先分解矿化, 显著提高了土壤的氮矿化速率; 另一方面, 施

加较高 C/N 的有机肥显著增加了土壤中有机质和有机碳含量, 而有机碳是土壤微生物的重要碳源, 土壤中的矿质氮被微生物吸收固定, 进而提高土壤的固氮能力, 减缓土壤氮素矿化速率<sup>[9,30]</sup>. 随着时间的延长, 易被分解的有机氮被逐渐矿化, 碳源逐渐成为限制微生物活动的关键因素, 导致微生物活性降低. 随着培养时间的延长, 温度对土壤有机氮矿化的影响愈来愈小. 因此, 配施有机肥能够有效提高土壤 C/N, 减缓土壤氮素矿化速率, 降低地下水氮素污染风险, 且补充的速效氮肥 (尿素) 能够防止有机肥分解过程中微生物与作物争夺有效态氮引起的土壤养分短期供应不足的问题.

随着全球气候变化的日益加剧, 除导致温度发生变化之外, 降水格局也随之发生巨大变化<sup>[25]</sup>, 引起农业生态系统土壤含水量的变化, 进而影响土壤微生物的活性和土壤养分的迁移转化, 并对农田土壤氮素矿化作用产生影响. 本研究中, 水分对土壤氮素矿化也有着显著的影响, 在适宜温度范围内 ( $25 \sim 35^{\circ}\text{C}$ ), 各施肥处理的土壤累积矿化量均随土壤水分含量的增加呈现出先增加后降低的变化趋势, 这与许多学者的研究结果相似<sup>[26]</sup>. 这一现象的原因在于土壤水分可以通过改变土壤有机质底物的有效性、土壤中胞外酶的活性以及土壤微生物的群落组成, 进而影响土壤有机质的分解程度和有机氮的矿化作用<sup>[32]</sup>. 水分含量过高会降低土壤的空隙和氧气含量, 从而抑制土壤微生物生长繁殖和活动能力, 而含水量过低时微生物和酶的活性会降低, 不利于土壤有机氮矿化作用的进行. 赵长胜等<sup>[33]</sup> 认为在适宜的水分范围 (旱地为  $60\% \sim 80\%$  WHC) 内提高含水量有利于有机质的释放, 增加氨氧化细菌的种群数量和活性, 并可促进土壤矿化作用. 而刘杏认等<sup>[34]</sup> 的研究发现 3 种草地类型土壤水分变化量与土壤净氮矿化速率呈正相关关系. 出现这种差异的原因可能是不同土壤类型和土地利用方式造就的微生物群落对环境因子的生态适应性不同. 本研究中, 在相对低温条件下 ( $15^{\circ}\text{C}$ ), 水分对各施肥处理的土壤氮矿化速率和累积矿化量无显著影响; 在适宜温度条件下 ( $25 \sim 35^{\circ}\text{C}$ ), 土壤氮矿化累积量随土壤水分的增加而增加. 这说明温度和水分之间具有明显的交互作用.

#### 3.2 温度和水分对各施肥土壤可溶性有机氮含量的影响

本研究中, 尿素和有机肥的添加均能显著提高土壤 SON 的含量, 这是由于添加的尿素本身就是

小分子量的 SON, 有机肥中也含有一定数量的 SON, 随着培养时间的延长, 各施肥处理的土壤 SON 含量总体均呈现降低的趋势, 且 Ur 和 UM 处理的土壤累积矿化氮量  $N_{\text{min}}$  与 SON 含量呈显著负相关关系, 施肥处理土壤中 SON 含量随着矿质氮的累积而降低. 这与一些学者的研究结果具有一致性<sup>[35]</sup>. 这可能由于尿素作为小分子易分解的 SON, 在土壤中的周转速率迅速, 进入土壤后在脲酶和硝化细菌等作用下快速转化成矿质氮, 而且输入的有机肥在微生物的作用下也分解出部分可溶性有机氮, 这部分 SON 可能参与了一系列的矿化过程. 可见, 土壤氮素的矿化与 SON 的活性部分有着显著关系<sup>[13]</sup>. 培养结束时, CK 处理的 SON 含量显著高于 Ur 和 UM 处理, 说明氮肥的添加可提高土壤微生物的活性和数量, 使得土壤氮素矿化作用增强, 提高了 SON 的转化, 提高了有机氮的利用率.

土壤中可溶性有机氮的矿化分解过程是一个依靠微生物参与的生物降解过程, 该过程要容易受到土壤温度和水分等环境因子的影响<sup>[17,36]</sup>. 本研究表明, 随着温度升高, 土壤中 SON 的矿化速率呈现增大的趋势. 温度从 15℃ 升高到 25℃, 再从 25℃ 升高 35℃ 时, 各处理的土壤中 SON 的含量降低了 5.6% ~ 15.7%. Bregliani 等<sup>[17]</sup> 的研究也发现类似规律: 土壤中 SON 含量随温度升高而降低, 高温下 SON 含量较低. 这可能是因为随着温度的升高, 土壤中微生物的活性也增强, 微生物分解 SON 的能力也相应增强. 另外, 在同一培养温度下, 各水分处理之间的 SON 含量无显著差异, 这与 Guggenberger 等<sup>[37]</sup> 的研究结果一致, 但也有研究指出 SON 与土壤水分呈极显著负相关关系, 而与土壤温度呈极显著正相关关系<sup>[38]</sup>. 造成不同结果的原因可能与不同研究对象和土壤质地等因素有关. 由此可见, 土壤温度、水分及其交互作用对 SON 含量及其矿化的影响较为复杂, 有待进一步的研究.

总之, 在全球变暖的背景下, 土壤中 SON 的矿化分解能力逐渐增强, 矿化速率加快, 导致矿质氮累积量增加, 如果作物不能在短期内完全吸收利用累积的矿质氮, 过量的矿质氮尤其是  $\text{NO}_3^-$ -N 会随水分向土壤运移淋溶, 增加向地下水淋失的风险. 因此, 有必要在全球变暖的背景下, 进一步研究不同环境条件下农田土壤中可溶性有机氮的矿化特性.

### 3.3 温度和水分对各施肥处理土壤氮矿化动力学参数及 $Q_{10}$ 的影响

采用一级动力学模型拟合结果表明, 温度和水分

都能显著影响潜在矿化势 ( $N_0$ )、矿化速率常数  $k$  值, 其中高温下水分对其影响尤为突出, 且不同培养条件下  $k$  值的变化规律与土壤有机氮累积矿化氮量的变化规律基本一致. 此外, 本研究中在 84 d 培养期间, 土壤潜在矿化势在 35℃ 和 90% WHC 条件下要显著高于其他处理, 表明高温下土壤微生物的活性增强, 在此水分条件下土壤氧含量高有利于氮化和硝化作用, 从而促进有机氮的矿化.

土壤氮素矿化的温度敏感系数 ( $Q_{10}$ ) 是用来表征土壤氮素矿化速率对温度变化的响应. 本研究中, 土壤氮矿化的温度敏感系数  $Q_{10}$  值为 1.01 ~ 1.27, 这与一些报道的研究结果基本相符<sup>[39]</sup>. 高俊琴等<sup>[39]</sup> 的研究表明, 若尔盖湿地沼泽土和泥炭土的净氮矿化  $Q_{10}$  分别在 0.9 ~ 4.5 和 1.0 ~ 4.4 之间, 朱剑兴等<sup>[40]</sup> 对内蒙古不同类型的草地系统研究发现, 3 种草地类型的  $Q_{10}$  为 1.3 ~ 2.7. 研究结果的差异可能是由于土地利用方式和土壤基质差异所引起的, 也可能是土壤微生物群落和结构的差异所导致<sup>[41]</sup>. 本研究中, 施肥能够显著降低土壤氮素矿化的  $Q_{10}$  值, 表明长期施肥能有效降低土壤氮素矿化的温度敏感性, 且尿素配施有机肥 (UM) 较单施尿素 (Ur) 降低  $Q_{10}$  值的效果更好. 增加全氮含量和改善土壤有机质质量可能是施肥后土壤氮素矿化  $Q_{10}$  值显著降低的重要原因<sup>[30]</sup>. 在等氮投入下, 添加有机肥一定程度增加有机碳输入量, 提高了土壤 C/N, 从而减缓土壤氮素矿化速率, 进而提高土壤固氮能力<sup>[31]</sup>. 在全球气候变暖条件下, 配施有机肥有助于降低土壤氮素矿化速率和温度敏感性, 提高土壤氮素利用率, 减少氮素淋溶损失. 本研究中, 基质质量指数  $a$  与  $Q_{10}$  具有极显著的负相关关系, 说明土壤质量越差的土壤氮素矿化温度敏感系数越高, 这与其他研究结果一致<sup>[27]</sup>. 这预示在农业生产实践中应该更加重视化肥与有机肥的配合施用.

## 4 结论

(1) 通过室内好气培养实验发现, 各施肥处理的土壤氮素的矿化速率和累积矿化量均随温度升高而增加, 并在各温度梯度之间达到显著差异 ( $P < 0.05$ ). 水分对各施肥土壤累积矿化量也有显著影响, 且与温度两者间有明显交互效应.

(2) 与未施肥处理相比, 施加不同氮肥 (Ur 和 UM) 均可显著提高土壤氮矿化势和可溶性有机氮含量. 好气培养过程中, Ur 和 UM 处理土壤的 SON 含量总体呈现降低的趋势, 且 SON 含量与矿质氮累

积量之间有显著负相关关系, 这表明 SON 作为一个不可忽视的组分, 参与了土壤氮素矿化过程. 因此, 土壤 SON 含量可作为评价土壤供氮能力的基础指标, 在调节土壤养分和提供可利用氮等方面具有重要作用. 另外, 随着温度的升高, SON 在土壤中的矿化能力增强, 矿化速率加快, 当矿质氮超过作物所能利用吸收的量时, 会增加矿质氮向地下水淋失的风险.

(3) 施肥能够有效降低土壤氮矿化的温度敏感性, 尤其是尿素配施有机肥处理降低土壤氮素矿化温度敏感性的效应更为突出, 表明在高温环境下, 配施有机肥降低了土壤氮素的矿化速率, 可以在短期内减少矿质氮淋溶损失. 因此, 在农田生产实践中应更加重视有机肥与尿素的配合施用.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York: Springer, 2011.
- [ 2 ] 林俊杰, 刘丹, 张帅, 等. 淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 555-562.  
Lin J J, Liu D, Zhang S, *et al.* Effect of coupling-process of wetting-drying cycles and seasonal temperature increasing on sediment nitrogen mineralization in the water level fluctuating zone [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 555-562.
- [ 3 ] 张名豪, 卢吉文, 赵秀兰. 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2291-2297.  
Zhang M H, Lu J W, Zhao X L. Effect of different organic materials on nitrogen mineralization in two purple soils [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2291-2297.
- [ 4 ] Guntinas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, *et al.* Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, **48**: 73-80.
- [ 5 ] Masunga R H, Uzokwe V N, Mlay P D, *et al.* Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used in agriculture[J]. Applied Soil Ecology, 2016, **101**: 185-193.
- [ 6 ] 林俊杰, 张帅, 刘丹, 等. 季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 688-702.  
Lin J J, Zhang S, Liu D, *et al.* Effect of seasonal temperature increasing on nitrogen mineralization in soil of the water level fluctuating zone of Three Gorge tributary during the dry period [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 688-702.
- [ 7 ] Wang C H, Wan S Q, Xing X R, *et al.* Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(5): 1101-1110.
- [ 8 ] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [ 9 ] 石博文, 赖欣, 李洁, 等. 尿素与有机肥配施对棕红壤氮素转化的影响[J]. 核农学报, 2017, **31**(5): 938-945.  
Shi B W, Lai X, Li J, *et al.* Effect of interaction between manure and urea on transformation of nitrogen in brown red soil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, **31**(5): 938-945.
- [ 10 ] 王婷, 王连峰. 5 种前期水分处理下黑土氮素矿化及硝化反硝化率的变化[J]. 大连交通大学学报, 2017, **38**(3): 68-71.  
Wang T, Wang L F. Mineralization, nitrification and denitrification rates in black soils response to the five antecedent water treatments [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, **38**(3): 68-71.
- [ 11 ] 李志杰, 杨万勤, 岳楷, 等. 温度对川西亚高山 3 种森林土壤氮矿化的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(12): 4045-4052.  
Li Z J, Yang W Q, Yue K, *et al.* Effects of temperature on soil nitrogen mineralization in three subalpine forests of western Sichuan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(12): 4045-4052.
- [ 12 ] Liu Y, He N P, Wen X F, *et al.* Patterns and regulating mechanisms of soil nitrogen mineralization and temperature sensitivity in Chinese terrestrial ecosystems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **215**: 40-46.
- [ 13 ] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, *et al.* Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **30**(5-6): 374-387.
- [ 14 ] van Kessel C, Clough T, van Groenigen J W. Dissolved organic nitrogen: an overlooked pathway of nitrogen loss from agricultural systems? [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, **38**(2): 393-401.
- [ 15 ] Kušliene G, Eriksen J, Rasmussen J. Leaching of dissolved organic and inorganic nitrogen from legume-based grasslands [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, **51**(2): 217-230.
- [ 16 ] Carswell A M, Hill P W, Jones D L, *et al.* Short-term biotic removal of dissolved organic nitrogen (DON) compounds from soil solution and subsequent mineralisation in contrasting grassland soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **96**: 82-85.
- [ 17 ] Bregliani M M, Ros G H, Temminghoff E J M, *et al.* Nitrogen mineralization in soils related to initial extractable organic nitrogen: effect of temperature and time[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, **41**(11): 1383-1398.
- [ 18 ] 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 等. 宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3401-3410.  
Ni Y X, Huang Y M, Niu D, *et al.* Characteristics and coupling relationship of soil carbon and nitrogen transformation during *in-situ* mineralization cultivation in forestlands in the mountain area of southern Ningxia [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3401-3410.
- [ 19 ] Liang B, Kang L Y, Ren T, *et al.* The impact of exogenous N supply on soluble organic nitrogen dynamics and nitrogen balance in a greenhouse vegetable system [J]. Journal of Environmental Management, 2015, **154**: 351-357.
- [ 20 ] 张丽, 张磊, 鲁剑巍, 等. 添加尿素和秸秆对三熟制水旱轮作土壤各形态氮素的影响[J]. 土壤, 2017, **49**(1): 13-18.  
Zhang L, Zhang L, Lu J W, *et al.* Effects of urea and straw on soil different nitrogen forms under paddy-upland rotation of triple cropping system [J]. Soils, 2017, **49**(1): 13-18.
- [ 21 ] 张建伟, 徐会珂. 大沽河水源地农肥面源污染及其对策[J].

- 安徽农业科学, 2009, **37**(16): 7632-7633, 7657.
- Zhang J W, Xu H K. Dagu River area-source pollution of agricultural fertilizer and its countermeasure [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, **37**(16): 7632-7633, 7657.
- [22] 杨绒, 赵满兴, 周建斌. 过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量的影响条件研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(12): 107-111.
- Yang R, Zhao M X, Zhou J B. Effects of different conditions on the determination of total nitrogen in solution by persulfate oxidation method[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2005, **33**(12): 107-111.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Methods for chemical analysis of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [24] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, **36**(3): 465-472.
- [25] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, **2**(1): 3-8.
- Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, **2**(1): 3-8.
- [26] 石薇, 王景燕, 魏有波. 水热条件对华西雨屏区柳杉人工林土壤氮矿化的影响[J]. 土壤通报, 2014, **45**(6): 1430-1436.
- Shi W, Wang J Y, Wei Y B. Effects of water and temperature on soil nitrogen mineralization of *Cryptomeria fortunei* plantations in rainy area of Western China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(6): 1430-1436.
- [27] 赵宇, 张洪轩, 王若梦, 等. 放牧对若尔盖高寒草甸土壤氮矿化及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4234-4241.
- Zhao N, Zhang H X, Wang R M, et al. Effect of grazing intensity on temperature sensitivity of soil nitrogen mineralization in Zoigè alpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(15): 4234-4241.
- [28] Schime J P, Bennett J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm[J]. Ecology, 2004, **85**(3): 591-602.
- [29] Trasar-Cepeda C, Gil-Sotres F, Leirós M C. Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils from Galicia, NW Spain [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(1): 311-319.
- [30] 李文军, 杨奇勇, 杨基峰, 等. 长期施肥下洞庭湖水稻土氮素矿化及其温度敏感性研究[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(11): 261-270.
- Li W J, Yang Q Y, Yang J F, et al. Nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity in paddy soils in Dongting Lake Region of China under long-term fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(11): 261-270.
- [31] 江叶枫, 郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3840-3850.
- Jiang Y F, Guo X, Sun K, et al. Spatial variability of C-to-N ratio of farmland soil in Jiangxi province [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3840-3850.
- [32] Morillas L, Durán J, Rodríguez A, et al. Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying-rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange [J]. Glob Chang Biology, 2015, **21**(10): 3854-3863.
- [33] 赵长盛, 胡承孝, 孙学成, 等. 温度和水分对华中地区菜地土壤氮素矿化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(7): 861-866.
- Zhao C S, Hu C X, Sun X C, et al. Influence of temperature and moisture on nitrogen mineralization in vegetable fields of central China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(7): 861-866.
- [34] 刘杏认, 董云社, 齐玉春, 等. 温带典型草地土壤净氮矿化作用研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 633-639.
- Liu X R, Dong Y S, Qi Y C, et al. Soil net nitrogen mineralization in the typical temperate grassland [J]. Environmental Science, 2007, **28**(3): 633-639.
- [35] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils; a review on the influence of land use and management practices [J]. Geoderma, 2003, **113**(3-4): 357-380.
- [36] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 240-246.
- Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, et al. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(1): 240-246.
- [37] Guggenberger G, Zech W, Schulten H R. Formation and mobilization pathways of dissolved organic matter: evidence from chemical structural studies of organic matter fractions in acid forest floor solutions [J]. Organic Geochemistry, 1994, **21**(1): 51-66.
- [38] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤可溶性氮组分季节变化与水热关系[J]. 生态学报, 2018, **38**(2): 689-697.
- Zhao L H, Li C Z, Kang D, et al. Dynamic change in soil soluble nitrogen under farmland converted to forest in the Loess Hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(2): 689-697.
- [39] 高俊琴, 欧阳华, 张峰, 等. 若尔盖高寒湿地土壤氮矿化对温度和湿度的响应[J]. 湿地科学, 2008, **6**(2): 229-234.
- Gao J Q, Ouyang H, Zhang F, et al. The response of soil nitrogen mineralization to soil temperature and soil moisture in Zoige alpine wetland [J]. Wetland Science, 2008, **6**(2): 229-234.
- [40] 朱剑兴, 王秋风, 何念鹏, 等. 内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6320-6327.
- Zhu J X, Wang Q F, He N P, et al. Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(19): 6320-6327.
- [41] Balsler T C, Wixon D L. Investigating biological control over soil carbon temperature sensitivity [J]. Global Change Biology, 2009, **15**(12): 2935-2949.

## CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China .....	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i>	(4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015 .....	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i>	(4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing .....		
.....	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i>	(4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement .....		
.....	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i>	(4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016 .....		
.....	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i>	(4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>1</sub> and Their Carbonaceous Components in Beijing .....	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM <sub>2.5</sub> in the Northern Suburb of Nanjing in Spring .....	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i>	(4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM <sub>2.5</sub> by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS .....	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i>	(4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou .....	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i>	(4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO <sub>x</sub> Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology .....	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology .....	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i>	(4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City .....		
.....	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i>	(4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve .....	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i>	(4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River .....	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i>	(4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland .....	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i>	(4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects .....	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water .....	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River .....	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i>	(4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells .....	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i>	(4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using <sup>15</sup> N and <sup>18</sup> O Isotope Technique .....	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i>	(4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater .....	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i>	(4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment .....	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis .....	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i>	(4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments .....		
.....	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i>	(4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants .....	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater .....	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i>	(4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater .....		
.....	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i>	(4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A <sup>2</sup> /O-BAF at Low Temperatures .....	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i>	(4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O <sub>3</sub> -BAC and Analysis of Consortium Structure .....	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i>	(4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges .....	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i>	(4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes .....		
.....	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge .....	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i>	(4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis .....	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i>	(4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China .....		
.....	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i>	(4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas .....	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i>	(4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field .....	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i>	(4694)
Emission of NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers .....	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i>	(4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil .....		
.....	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i>	(4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria( <i>Comammox Nitrospira</i> ) in a Neutral Paddy Soil .....		
.....	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i>	(4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis .....	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil .....	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters .....	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i>	(4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization .....	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i>	(4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water .....	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i>	(4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria .....	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i>	(4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China; Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition .....	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i>	(4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307 .....		
.....	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i>	(4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17β-estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915 .....	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i>	(4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland .....	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i>	(4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Composting of Lincomycin Mycelia Dreg with Manure .....	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i>	(4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms .....	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i>	(4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash .....	LI Jian-tao, ZENG Ming	(4834)