

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	吴菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨珺,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素

罗由林, 李启权*, 王昌全, 李冰, 张新, 冯文颖, 翁倩, 吴冕

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要: 根据四川仁寿县 555 个表层土壤样点数据, 采用地统计学和回归分析方法, 对该区土壤全氮和碱解氮的空间变异特征进行分析, 并探讨了不同因素对其空间变异的影响程度。结果表明, 研究区土壤全氮 (TN) 含量在 $0.34 \sim 2.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 处于中等水平; 碱解氮 (AN) 含量在 $25.86 \sim 184.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 平均值为 $74.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 处于较缺乏水平。土壤 TN 和 AN 的块金效应分别为 0.608 和 0.790, TN 具有中等空间相关性, 受结构因素与随机因素共同影响, 而 AN 则主要受随机因素影响。空间上, TN 和碱解氮均表现出北高南低趋势。成土母质可独立解释 6.3% 和 1.0% 的 TN 和 AN 空间变异; 土壤类型对研究区 TN 和 AN 的空间变异的独立解释能力分别在 26.5% ~ 36.1% 和 27.7% ~ 28.7% 之间; 地形条件对 TN、AN 空间变异的独立解释能力分别为 5.5%、6.1%; 土地利用方式对 TN、AN 空间变异的独立解释能力分别为 37.7%、40.0%。土地利用方式对氮素空间变异的独立解释能力最高, 是引起研究区土壤氮素空间变异最主要的因素。

关键词: 土壤氮素; 空间变异; 影响因素; 定量分析; 川中丘陵

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0652-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.037

Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin

LUO You-lin, LI Qi-quan*, WANG Chang-quan, LI Bin, ZHANG Xin, FENG Wen-ying, WENG Qian, WU Mian

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Spatial distribution characteristics of soil total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) were analyzed by using geostatistical methods and the effects of the influencing factors were quantified by regression analysis based on 555 soil samples collected in RenShou county. The results showed that the contents of soil TN ranged from $0.34 \sim 2.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with a mean value of $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which indicated the TN of the study area was at a medium level, and AN ranged from $25.86 \sim 184.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ with a mean value of $74.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which indicated the AN of the study area was low. The values of the nugget to sill ratio were 0.608 and 0.790 respectively, which suggested TN had moderate spatial dependence, which was determined by the co-effects of structural and random factors, while AN was mainly affected by random factors. The contents of TN and AN in north area were much higher than those of south area and distribution of Patchy. The soil parent materials were able to explain 6.3% and 1.0% of TN and AN spatial variability. Soil types explained 26.5% - 36.1% of TN variability and 27.7% - 28.7% of AN variability. Topographical factors explained 5.5% of TN variability and 6.1% of AN variability, the structural factors of soil types reflected spatial variability of nitrogen in the study area. The randomness factors of land use types explained 37.7% of TN variability and 40.0% of AN variability that were much larger than the other factors, which suggested land use had the highest independent explaining capacity for nitrogen spatial variability among those influence factors and land use type was the main factor to accurately predict the spatial distribution of soil nitrogen in the hilly area of Middle Sichuan Basin.

Key words: soil nitrogen; spatial variability; influencing factors; quantitative analysis; hilly area of Middle Sichuan Basin

氮素是植物生长发育过程中最重要的元素之一, 其迁移不仅影响区域大气和水体环境, 也影响着各种生态过程^[1~3], 在生态系统中有着极其重要的作用^[4~6]。目前, 土壤氮素研究的指导思想已从围绕提高粮食单产发展到提高单产与环境保护相协调的思路上来^[7]。区域尺度上, 由于地表环境及人为活动差异, 土壤氮素存在着明显的空间异质性。这种异质性不仅是农田精确施肥管理的基础, 也是引起区域氮素迁移转化不确定性的一个重要因素^[8,9]。因而, 研究区域土壤氮素空间变异特征及其

影响因素对农业生产及环境保护均具有重要意义。

近年来, 许多学者对不同区域土壤氮素的空间分布特征进行了研究, 如利用地统计学方法揭示平原区^[10,11]、黄土高原^[12]、南方红壤丘陵区^[8]、典型湿地^[13,14]、荒漠草原^[15]及不同流域^[16,17]等不同环

收稿日期: 2014-07-09; 修订日期: 2014-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(4120124); 四川省科技支撑计划项目(四川省-中国科学院合作项目 2012JZ0003)

作者简介: 罗由林(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤资源环境, E-mail: S20132717@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liqq@lreis.ac.cn

境背景下土壤氮素的空间变异特征。这些研究表明,不同区域内土壤氮素表现出明显不同的空间变异特征^[10~14],成土母质、土壤类型、地形条件、土地利用方式以及人类耕作施肥等结构因素和随机因素均会在不同程度上影响土壤氮素的空间变异^[10~21]。但较少有研究定量分析不同因素对土壤氮素空间变异的影响程度。量化不同因素对区域土壤氮素空间变异的影响程度,有利于理解区域土壤氮素空间分布格局形成,为区域氮肥管理和环境保护提供更准确的依据。

川中丘陵区地处四川盆地西南部,是四川省粮、棉、油等重要粮经作物的生产基地,同时也是长江上游水土流失重要防治区。虽然已有该区域土壤氮素研究的相关报道^[22,23],但其研究区域较为分散或集中在小流域尺度,而针对该区域较大尺度上土壤氮素的空间分布特征以及其影响因素的定量研究鲜见报道。本研究以川中丘陵第一大县仁寿县为案例区,分析该区域县域尺度上土壤氮素的空间变异特征,并采用定量分析方法揭示成土母质、土壤类型、土地利用方式及地形等因素对其空间变异的影响,以期为区域农业生产管理和生态环境保护提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(仁寿县)位于四川盆地西南部,地处岷江、沱江分水脊地段,地理坐标介于 $N29^{\circ}37' \sim 30^{\circ}20'$ 和 $E103^{\circ}54' \sim 104^{\circ}29'$ 之间,面积 $2\,606\text{ km}^2$,人口 162 万,为四川省第一大县。地势西北高东南低,地形以丘陵为主,有部分低山区域(图 1)。县域处于亚热带季风湿润气候区,四季分明,温暖湿润;年均气温 17.4°C ,年均降雨 $1\,009.4\text{ mm}$,年均日照时数 $1\,196.6\text{ h}$,无霜期 312 d;自然植被均为次生天然林和人工林,植被种类丰富。成土母质以蓬莱镇组泥砂岩和沙溪庙组泥砂岩风化物为主,有少量第四系老冲洪积物,含 8 个出露地层的 11 种母质类型。全县主要有紫色土、水稻土和黄壤这 3 种土类,含 5 个亚类、16 个土属。土地利用类型以耕地为主,兼有林地、园地、草地等。其中耕地以水田、旱地和水旱轮作 3 种利用方式为主,林地多为针、阔混交林,园地以果园为主,草地多为荒草地。该区域土地垦殖指数高,是长江上游人口最为密集的典型农业区;农作物主要以种植水稻、玉米、油菜、花生等粮油作物为主,农业管理和氮素投入水平较高。

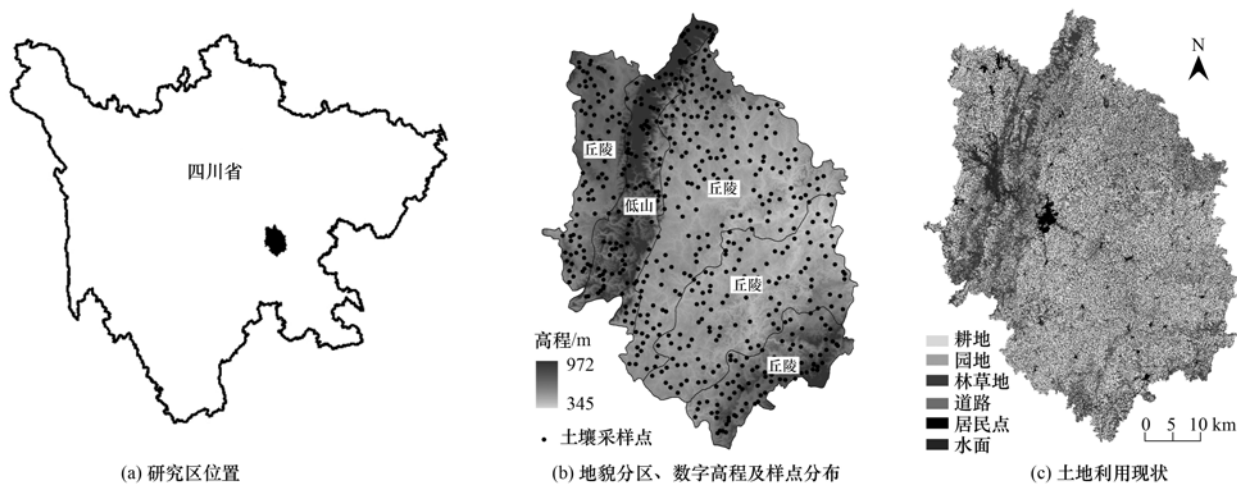


图1 研究区基础信息及土壤采样点分布示意

Fig. 1 Basic geographic information of study area and spatial distribution of soil sampling sites

1.2 数据来源与样品采集

于 2012 年 11 ~ 12 月,根据研究区土地利用方式、成土母质、土壤类型以及地形地貌等因素,在兼顾均匀性的基础上进行布点采样。每个采样点位采用混合取样的方法,用 GPS 对每个样点地理坐标进行定位,同时详细记录其土地利用方式及周边环境状况,共计采集表层土壤(0 ~ 20 cm)样品 558 个

[图 1(b)]。土壤样品带回实验室经自然风干、去除杂物、研磨后,分别过 2 mm 和 0.149 mm 尼龙筛。全氮(TN)含量采用凯氏滴定法通过 Foss Kjelttec8400 全自动凯氏定氮仪进行测定;碱解氮(AN)含量利用碱解扩散法进行测定^[24]。研究区行政界线图和土地利用现状图由国土部门提供,农业基本信息由农业部门提供。

1.3 数据分析与处理

采用域法识别并剔除 3 个异常样点后^[25],利用剩余 555 个土壤数据进行本文相关内容的研究. 土壤样点数据及所有基础图件均统一到相同的平面投影坐标系统. 基于研究区 30 m 分辨率的 DEM 数据,在 ArcGIS 9.3 软件中提取生成高程(DEM)、坡度(S)、平面曲率、剖面曲率,地形湿度指数(TI , $TI = \ln(CA/S)$, CA 表示汇流面积);其中坡向采用其余弦值用以表达其坡向的南北变化.

常规统计分析、相关分析、方差分析及回归分析均在 SPSS 20 软件中完成. 其中相关分析用以揭示定量因子(高程、坡度、坡向、地形指数)与土壤 TN、AN 的相关性;方差分析用于揭示不同因素对土壤 TN、AN 的影响是否存在显著的差异,回归分析用以定量表达各影响因素对土壤全氮和碱解氮空间变异的影响程度;其中,对定性分类变量(成土母质、土壤类型、土地利用方式)采用哑变量^[26]对其进行赋值后再进行回归分析,地形因子根据相关分析结果(TN,坡向、地形指数;AN,坡向、地形指数、坡度)采用逐步线性回归进行分析. 地统计分析则首先采用 GS + 7.0 软件进行半方差分析,以获取 2 个土壤氮素指标的最优理论半方差模型和参数,在半方差拟合模型的基础上利用 ArcGIS 9.3 软件的地统计模块进行空间插值,得到研究区 TN 和 AN 的空间分布图.

2 结果与讨论

2.1 一般统计分析

根据研究区 555 个土样数据的统计结果(表 1),土壤全氮(TN)含量处于 $0.34 \sim 2.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于全国平均水平^[27];碱解氮(AN)含量在 $25.86 \sim 184.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,平均值为 $74.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 按照全国二次土壤普查土壤肥力分级标准^[28],TN 处于中等水平,而 AN 处于较缺乏水平. 从变异系数来看,研究区 TN、AN 的变异系数分别为 38.75%、39.82%,均属于中等程度的空间变异. 从不同地貌区来看,2 种地貌条件下土壤氮素含量差异不显著($TN:P=0.993$; $AN:P=0.240$). 其中,土壤 TN 含量丘陵区 and 低山区均为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤 AN 含量丘陵区 and 低山区分别为 $75.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $71.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 从变异程度来看,低山区土壤氮素的变异系数略高于丘陵区,表明低山区土壤氮素的空间变异程度高于丘陵区.

数据正态性分析表明(表 1 和图 2),研究区土壤 TN 和 AN 含量呈偏态分布(K-S 检验, $TN:P=8.001\text{E-}04$; $AN:P=8.609\text{E-}04$),由于方差分析和回归分析要求因变量为正态分布,研究过程中采用 TN、AN 含量值的对数转换值(K-S 检验, $TN:P=0.325$; $AN:P=0.451$)进行分析.

表 1 研究区土壤全氮、碱解氮含量统计特征

Table 1 Descriptive statistics characteristics of TN and AN contents in the study area

地貌	指标	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度系数	峰度系数	分布类型
丘陵	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	426	0.43	2.57	1.12	0.43	38.31	0.78	0.17	对数正态
	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	426	25.86	168.22	75.17	29.16	38.80	0.77	0.15	对数正态
低山	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	129	0.34	2.36	1.12	0.45	40.31	0.80	-0.05	对数正态
	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	129	28.21	184.17	71.67	30.99	43.24	1.15	1.51	对数正态
合计	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	555	0.34	2.57	1.12	0.44	38.75	0.78	0.10	对数正态
	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	555	25.86	184.17	74.35	29.61	39.82	0.46	0.86	对数正态

2.2 半方差分析

半方差分析能较好地刻画土壤氮素的空间分布的随机性和结构性等,因而在常规统计分析的基础上进一步采用半方差对其空间结构进行分析^[29]. 半方差拟合结果的参数中,变程可以反映空间变量自相关范围的大小;决定系数可以反映模型拟合效果;块金效应则可以揭示土壤属性的空间自相关程度. 空间自相关程度会受到结构性因素和随机性因素的影响,其中,结构性因素主要是指土壤在形成过程中的母质、土壤类型、地形因子等,随机性因素

则是指诸如土地利用方式等能在一定程度上反映耕作活动、种植制度、投入管理水平差异的人为活动因素;结构性因素使得土壤属性具有空间自相关性,而随机性因素则会减弱土壤属性的空间自相关性,增大其异质性. 从半方差拟合结果来看(表 2 和图 3),研究区土壤 TN 和 AN 符合指数模型,决定系数 R^2 分别为 0.791、0.691,拟合程度较高. TN 和 AN 的块金值 C_0 分别为 0.090、0.124,说明在当前采样密度下存在着由实验误差、采样误差、采样间距的变异及耕作施肥等随机因素共同引起的不同程

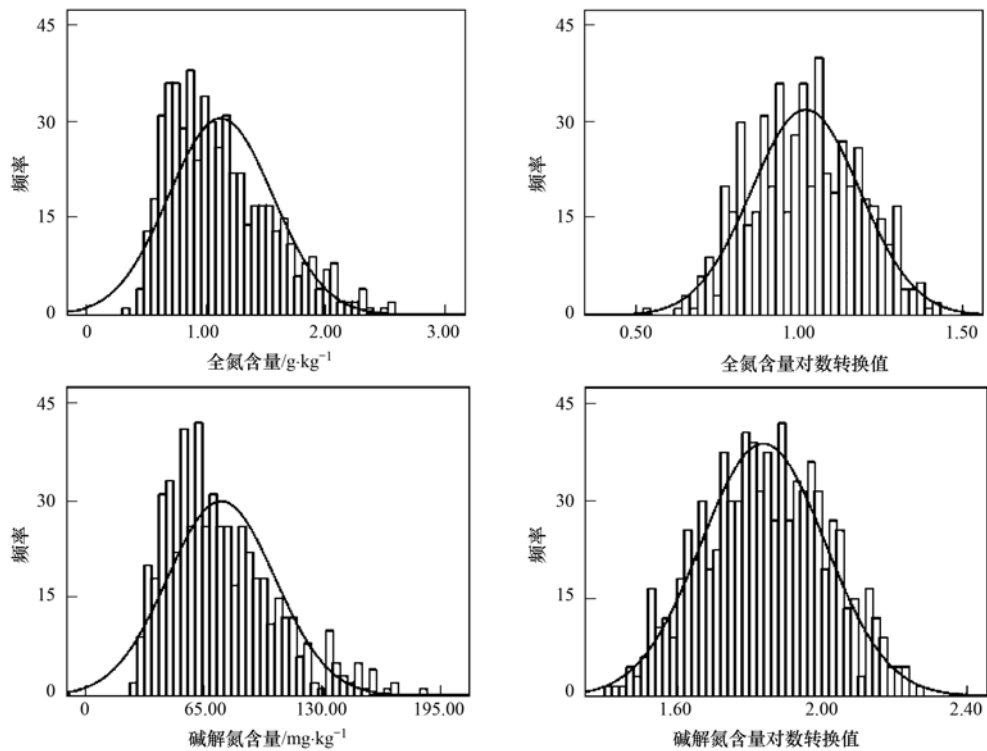


图2 研究区土壤全氮、碱解氮含量及其对数转换值的频率分布

Fig. 2 Histograms of TN and AN contents and their log-transformed values in the study area

表2 研究区土壤有机碳、全氮半方差函数模型参数

Table 2 Theoretical semivariogram models for TN and AN contents and their parameter values							
指标	理论模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	块金效应 $[C_0 / (C_0 + C)] / \%$	变程/km	决定系数 (R^2)	残差 (RSS)
全氮	指数	0.090	0.148	60.8	9.5	0.791	6.686E-04
碱解氮	指数	0.124	0.157	79.0	9.0	0.691	3.278E-04

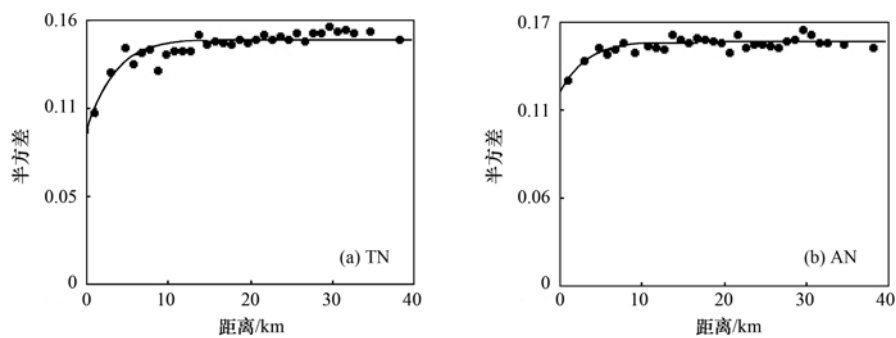


图3 研究区土壤全氮、碱解氮半方差函数

Fig. 3 Isotropic semivariogram of TN and AN in the study area

度的变异. 从块金效应 $C_0 / (C_0 + C)$ 来看, 研究区 TN 的块金效应 $C_0 / (C_0 + C)$ 为 60.8%, 属于中等程度的空间变异性, 表明其空间变异受到结构性因素和随机性因素的共同影响; 而 AN 块金效应 $C_0 / (C_0 + C)$ 为 79.0%, 其空间变异主要受到随机性因素的影响. 从变程来看, TN、AN 的距离分别为 9.5 km、

9.0 km, 空间自相关范围较小, 与川中丘陵其他县域尺度上氮素的空间自相关范围接近^[30].

2.3 空间分布

为直观反映研究区土壤氮素的空间分布格局, 运用半方差模型结果在 ArcGIS 软件平台进行空间插值, 分别得到仁寿县 TN、AN 的空间分布图(图

4). 从图 4 中可以看出,研究区 TN 和 AN 在空间分布上表现出一定的相似性,二者总体上显示出北高南低趋势,且多呈斑块状分布. TN 由北向南降低趋势较为明显,高值区相对集中,低值区主要集中分布在南部及西部部分地区, TN 含量在 0.75 ~ 1.20

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间所占范围较大,与统计结果一致. AN 高值区相对分散,低值区主要呈版块状分布在中南部,空间分布随机性较强,与半方差分析结果基本一致,大部分区域 AN 含量在 65.00 ~ 80.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,总体处于较低水平.

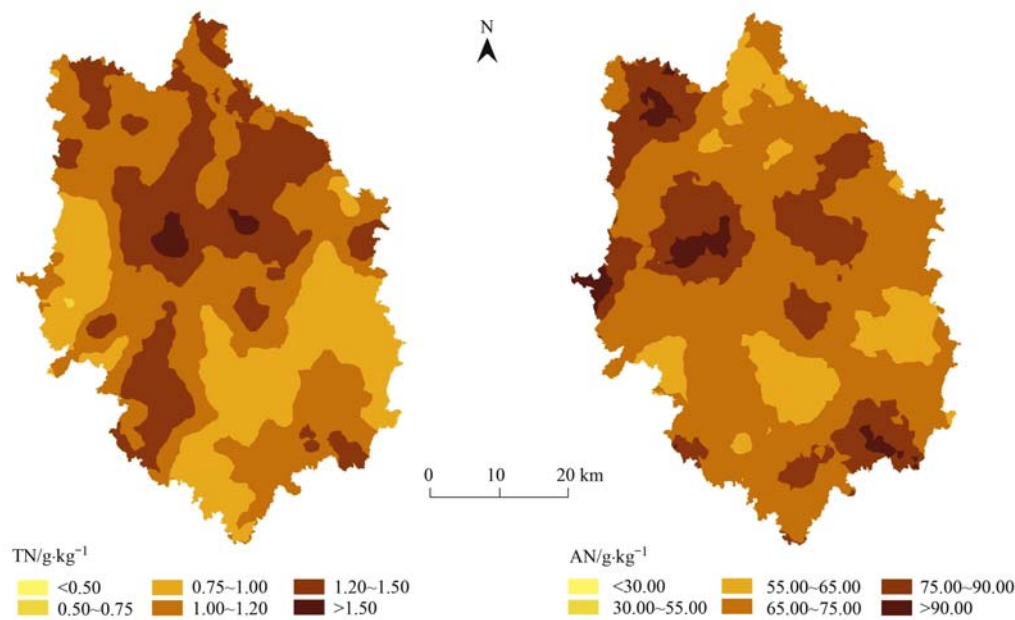


图 4 研究区土壤全氮、碱解氮空间分布

Fig. 4 Spatial distribution maps of TN and AN contents in the study area

2.4 影响因素

2.4.1 成土母质

成土母质对 TN 含量有一定影响 ($P < 0.05$). 从不同母质类型来看(表 3),TN 以须家河组发育而来的土壤最高,平均为 1.27 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,夹关组发育的土壤最低 (0.79 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),均值差异达 0.48

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各母质类型下 AN 含量均值在 70.33 ~ 83.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值差异不显著 ($P > 0.05$). 从变异系数来看,各成土母质发育的土壤 TN 变异系数在 23.84% ~ 48.88% 范围内,AN 变异系数在 22.04% ~ 47.09% 之间,均表现为中等程度的变异性.

表 3 不同母质类型土壤全氮、碱解氮含量统计特征

Table 3 Descriptive statistics characteristics of TN and AN contents under different soil parent materials

成土母质	样点数	全氮			碱解氮		
		均值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%	均值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%
第四系老冲洪物	12	0.92	0.33	35.48	74.81	24.48	32.73
灌口组泥砂岩	135	1.05	0.46	43.51	71.73	32.44	45.22
夹关组砂岩	17	0.79	0.27	33.71	66.09	18.23	27.58
蓬莱镇组泥砂岩	35	1.17	0.46	39.73	72.32	28.66	39.62
沙溪庙组泥砂岩	16	1.04	0.51	48.88	83.74	33.13	39.56
沙溪庙组砂岩	44	1.09	0.26	23.84	82.1	19.88	24.22
遂宁组泥砂岩	12	0.9	0.23	25.12	70.46	15.53	22.04
天马山组砂泥岩	15	1.04	0.42	40.48	70.33	33.12	47.09
须家河组砂岩	135	1.27	0.47	36.61	76.45	30.96	40.50
自流井组泥灰岩	95	1.18	0.42	35.48	71.11	30.62	43.06
自流井组泥砂岩	39	1.06	0.34	32.41	79.54	26.86	33.77

2.4.2 土壤类型

土壤类型对土壤 TN 和 AN 含量均有极显著的影响($P < 0.01$). 3 个土类中(表 4), 水稻土 TN 含量明显大于紫色土和黄壤; AN 含量则表现为水稻土 > 黄壤 > 紫色土. 紫色土的 3 个亚类中, 土壤 TN、AN 含量均以石灰性紫色土最高, 酸性紫色土

TN 含量最低而中性紫色土 AN 含量最低. 从土属来看, 水稻土中紫泥田、钙质紫泥田等土属 TN、AN 含量均较高; 黄壤的砂黄泥土及紫色土的红紫泥土、酸紫泥土 TN 含量较低, 紫色土各土属 AN 含量普遍较低. 各级土壤分类下土壤 TN 和 AN 均表现为中等程度的变异性.

表 4 不同土壤类型土壤全氮、碱解氮含量统计特征

Table 4 Descriptive statistics characteristics of TN and AN contents under different soil types									
土类	亚类	土属	样点数	全氮			碱解氮		
				均值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%	均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%
黄壤	黄壤	土类合计	59	0.89	0.25	28.55	69.19	21.25	30.7
		矿子黄泥土	7	0.82	0.14	16.63	66.38	12.21	18.39
		冲积黄泥土	23	0.96	0.20	20.72	72.24	18.38	25.44
		冷砂黄泥土	20	0.87	0.34	38.94	68.02	26.94	39.6
		砂黄泥土	9	0.78	0.18	23.71	66.21	21.49	32.45
水稻土	渗育水稻土	土类合计	203	1.40	0.37	26.23	93.48	25.16	26.91
		钙质紫泥田	77	1.50	0.36	24.09	91.88	25.94	28.23
		黄泥田	48	1.22	0.25	20.37	91.15	18.59	20.39
		酸紫泥田	11	1.11	0.31	27.88	88.26	19.52	22.12
		紫泥田	67	1.46	0.39	26.61	97.83	28.77	29.41
紫色土	石灰性紫色土	土类合计	293	0.98	0.41	41.74	62.15	26.95	43.37
		亚类合计	162	1.11	0.44	39.4	65.91	29.91	45.38
		钙质紫泥土	8	1.16	0.57	49.22	68.69	33.86	49.3
		红棕紫泥土	69	1.11	0.42	37.98	63.38	27.45	43.31
		棕紫泥土	85	1.1	0.44	39.99	67.69	31.61	46.7
	中性紫色土	亚类合计	109	0.84	0.31	36.58	56.6	22.61	39.94
		暗紫泥土	10	0.92	0.41	44.69	59.36	32.19	54.24
		灰棕紫泥土	80	0.82	0.29	35.53	55.13	20.42	37.04
		脱钙紫泥土	19	0.87	0.32	36.38	61.31	26.09	42.55
	酸性紫色土	亚类合计	22	0.71	0.26	37.00	61.96	18.66	30.12
		红紫泥土	11	0.71	0.26	35.72	62.29	19.04	30.57
		酸紫泥土	11	0.71	0.28	40.02	61.63	19.20	31.15

2.4.3 地形

地形条件通过影响水热条件和成土物质的再分配来影响土壤氮素分布. 研究区 TN 和 AN 与坡向、地形指数的相关系数分别为 0.153、0.226 和 0.187、0.223, 呈极显著正相关关系(表 5, $P < 0.01$). 这表明, 随着坡向转北(阴坡), 地势越低洼, TN 含量和 AN 含量越高. 这主要是因为, 阴坡水分条件较好, 温度相对较低, 植被的覆盖度较高,

有机碳易积累, 而有机碳与氮素之间存在着较好的相关性^[31]. 而地势低洼处地表物质容易积聚, 导致地势低洼处 TN 和 AN 含量较高. 此外, AN 与坡度的相关性也达到显著, 存在着显著的负相关关系. 这主要是因为, 研究区坡度越大的区域土壤受到的冲刷侵蚀越严重, AN 易随水流失. 总体而言, 坡向和地形指数是影响该区氮素空间变异的主要地形因子.

表 5 土壤全氮、碱解氮含量与地形条件的相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation analysis between TN, AN and topography factors						
指标	高程	坡度	坡向	地形指数	平面曲率	剖面曲率
TN	0.009	-0.070	0.153 **	0.226 **	0.004	-0.033
AN	-0.014	-0.095 *	0.187 **	0.223 **	-0.020	-0.090 *

1) *, ** 分别表示显著水平为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$

2.4.4 土地利用方式

土地利用方式对研究区土壤氮素水平有极显著影响($P < 0.01$), 耕作土壤总体氮素水平高于自然

土壤(表 6). 耕作土壤中, TN、AN 含量均以水田最高, 旱地最低, 具体表现为: 水田 > 水旱轮作 > 园地 > 旱地; 这主要与氮肥的投入和管理水平有关. 水

田以种植水稻作物为主,氮肥投入水平较高;水旱轮作条件下,土壤干湿交替会促进土壤氮素矿化,增加硝化量和反硝化量,加速氮素分解和损失^[32],从而导致水旱轮作方式下氮素含量低于水田;旱地的熟制多为一年两熟或三熟,园地主要为果园,氮肥投入虽较多,但旱地和果园通气条件较好,耕层有机质分解较快,氮素流失相对容易,使其土壤氮素含量处于较低水平. 自然土壤中,林地土壤 TN、AN 含

量均高于草地,主要与该区林地多为针、阔混交林,草地多为荒草地,林地枯落物归还量大而草地归还量小有关. 从变异系数来看,不同土地利用 TN、AN 的变异系数分别在 22.74% ~ 41.48%、23.86% ~ 41.37% 之间;其中,自然土壤 TN、AN 的变异系数总体高于耕作土壤,有关研究也表明该区土地利用综合指数高^[33],这反映出人为耕作活动在一定程度上降低了土壤氮素的空间变异程度.

表 6 不同土地利用方式土壤全氮、碱解氮含量统计特征

Table 6 Descriptive statistics characteristics of TN, AN contents under different land use types

土地利用方式	样点数	全氮			碱解氮		
		均值/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数/%
耕地-水田	69	1.56	0.35	22.74	103.96	29.11	28.00
耕地-水旱轮作	134	1.32	0.35	26.46	88.08	21.02	23.86
耕地-旱地	154	0.79	0.20	25.55	52.09	13.30	25.54
林地	124	1.18	0.49	41.48	79.69	32.97	41.37
园地	60	0.96	0.32	32.91	61.58	18.85	30.60
草地	14	0.93	0.30	31.83	49.50	16.38	33.09

2.5 各因素影响程度

为定量揭示不同因素对区域土壤全氮和碱解氮空间变异的影响程度,对成土母质、土壤类型、地形因子(地形指数、坡向、坡度)和土地利用方式进行回归分析(表 7). 结果显示,成土母质对 TN 含量的影响达到显著性水平($P < 0.05$)而对 AN 含量没有影响($P = 0.115$);土壤类型、土地利用和地形条件的回归方程均达到极显著水平($P < 0.01$),表明研究中所选因素对研究区土壤 TN 和 AN 含量有着不同程度的影响.

成土母质对 TN、AN 空间变异的独立解释能力分别为 6.3%、1.0%,成土母质对土壤 TN、AN 空间变异影响极小,这与相关研究结果不同^[19,23]. 因为研究区土壤母质来源主要为侏罗系、白垩系和三叠系的紫色岩层,该岩层多为砂岩和泥(页)岩互层,不同岩组主要是砂岩和泥岩所占比例有所差异^[28],岩性总体上较为相似,导致该母岩背景下土壤机械组成相近;而成土母质主要通过影响土壤机械组成来影响土壤氮素含量^[22],因而研究区成土母质对土壤 TN、AN 含量空间分布的作用有限.

土类、亚类、土属对 TN、AN 的独立解释能力分别为 26.5%、34.5%、36.1% 和 27.7%、28.7%、27.9%,土壤类型对 TN 空间变异的影响表现为随着土壤分类级别越低而独立解释能力越高. 主要是 TN 空间变异受随机性因素和结构性因素共同影响,土壤分类级别越低,所反映的环境背景信息也越多,故而土壤类型对 TN 空间变异的独立解释

能力表现为土属 > 亚类 > 土类. 不同土壤分类级别对 AN 空间变异的独立解释能力则无明显差异,这与 AN 空间变异主要受随机性因素影响有关.

地形因子主要通过影响水热状况和成土物质的再分配进而影响土壤氮素含量,研究区地形因子对 TN、AN 空间变异的独立解释能力分别为 5.5%、6.1%,其中 AN 受地形因子的影响程度略高于 TN,与相关分析的结果一致.

土地利用方式主要通过土壤养分输入以及控制土壤氮素积累和释放速度来影响其含量. 研究区土地利用对 TN、AN 空间变异的独立解释能力均达到最高,分别为 37.7%、40.0%,为最主要的影响因素. 反映出人为耕作活动对土壤 TN、AN 空间变异的影响程度正日益加大. 土地利用方式对 TN 空间变异的独立解释能力略高于土壤类型,对 AN 空间变异的独立解释能力则远高于土壤类型,与半方差分析中土壤 TN 空间变异受结构性因素和随机性因素共同影响,AN 空间变异主要受随机性因素影响的结论基本一致.

有研究表明,土地利用的变化和施肥强度的增加会导致农业面源氮污染加重^[34]. 针对研究区土壤 TN 含量处于中等水平,而 AN 含量处于较缺乏水平的现状,氮素调控重点应是有针对性地提高氮素利用率而非加大氮素投入. 结合区域特点,一方面,应合理调节土地利用方式,可考虑将坡度较大或不宜耕的旱地、水旱轮作地转变为林地、园地,以减少由氮素流失带来的一系列环境问题. 另一方面,

表 7 不同因素对土壤全氮、碱解氮的回归分析结果
Table 7 Regression analysis of TN and AN with different factors

影响因素	全氮				碱解氮			
	F 值	决定系数(R^2)	校正决定系数(R^2_{Adj})	Sig.	F 值	决定系数(R^2)	校正决定系数(R^2_{Adj})	Sig.
成土母质	4.75	0.08	0.063	<0.05	1.56	0.028	0.010	0.115
土类	100.81	0.268	0.265	<0.01	107.31	0.280	0.277	<0.01
亚类	73.90	0.350	0.345	<0.01	56.82	0.292	0.287	<0.01
土属	21.88	0.378	0.361	<0.01	15.3	0.299	0.279	<0.01
地形因子	17.22	0.059	0.055	<0.01	19.14	0.065	0.061	<0.01
土地利用方式	68.00	0.382	0.377	<0.01	74.91	0.406	0.400	<0.01

考虑速效氮肥与缓控释氮肥配施,提高氮肥利用率。二者相结合,以实现健康的土壤环境和良好生态环境效益。

3 结论

(1) 研究区土壤 TN 处于中等水平而 AN 处于较低水平,丘陵和低山 2 种地貌区土壤氮素含量差异不明显。从变异程度来看,TN、AN 均为中等程度的空间变异性,且 AN 的空间变异程度均大于 TN。

(2) 土壤 TN、AN 的空间自相关均范围较小,其空间变异均更趋向于受到随机性因素影响。空间分布上,TN、AN 总体上多呈斑块状分布,显示出北高南低趋势,但两者高、低值区的分布范围有所差异,因而,对整个区域内的氮素调控应有针对性地分区进行。

(3) 各因素对土壤 TN、AN 的影响程度有所不同。结构性因素中,土壤类型对氮素空间变异的影响较大,其中土壤类型对 TN 空间变异的影响程度与土壤分类级别有关,AN 与土壤分类级别无关;地形因子对 AN 空间变异的影响程度略高于 TN。土地利用方式对 TN、AN 空间变异的独立解释能力均最高,是研究区土壤氮素空间变异的主控因素。

参考文献:

[1] Lutze J L, Gifford R M. Nitrogen accumulation and distribution in *Danthonia richardsonii* swards in response to CO₂ and nitrogen supply over four years of growth[J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(1): 1-12.

[2] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. *地理学报*, 2012, **67**(11): 1547-1555.

[3] 范荣桂,王长春,陈书琴,等. 巢湖周边地区表层土壤总氮、有机质空间分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(5): 117-120.

[4] Oren R, Ellsworth D S, Johnsen K H, et al. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere[J]. *Nature*, 2001, **411**(6836): 469-472.

[5] Hu S, Chapin F S III, Firestone M K, et al. Nitrogen limitation of microbial decomposition in grassland under elevated CO₂[J]. *Nature*, 2001, **409**(6817): 188-191.

[6] 赵钰,单保庆,张文强,等. 子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 143-149.

[7] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(4): 778-783.

[8] 张世熔,孙波,赵其国,等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(5): 885-892.

[9] Dharmakeerthi R S, Kay B D, Beauchamp E G. Factors contributing to changes in plant available nitrogen across a variable landscape[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**(2): 453-462.

[10] 张春华,王宗明,居为民,等. 松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局[J]. *生态学报*, 2012, **32**(4): 1220-1229.

[11] 陈肖,张世熔,黄丽琴,等. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, **13**(1): 1-7.

[12] 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮空间变异性[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(6): 89-96.

[13] 牟晓杰,孙志高,刘兴土. 黄河口滨岸滩涂湿地土壤碳、氮的空间分异特征[J]. *地理科学*, 2012, **32**(12): 1521-1529.

[14] 王青,袁勇,李传哲,等. 白洋淀湿地土壤氮素空间分布特征研究[J]. *环境保护科学*, 2013, **39**(4): 1-6.

[15] 刘红梅,卫智军,杨静,等. 不同放牧制度对荒漠草原表层土壤氮素空间异质性的影响[J]. *中国草业学报*, 2011, **33**(2): 51-57.

[16] 李艳利,徐宗学,刘星才. 浑太河流域氮磷空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(7): 770-777.

[17] 杨小林,李义玲,朱波,等. 紫色土小流域不同土地利用类型的土壤氮素时空分异特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(10): 2807-2813.

[18] 李启权,王昌全,张文江,等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(2): 459-466.

[19] 庞凤,李廷轩,王永东,等. 县域农田土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(6): 1497-1503.

[20] 陆海燕,胡正义,张瑞杰,等. 滇池北岸居民-农田混合区域农田土壤氮素空间分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(8): 1618-1623.

[21] 殷燕,吴志旭,刘明亮,等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2539-

- 2546.
- [22] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区城墙岩群和蓬莱镇组紫色岩上土壤性质研究[J]. 土壤通报, 2007, **38**(6): 1076-1080.
- [23] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(3): 70-81.
- [24] 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.
- [25] 王丹丹, 史学正, 于东升, 等. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 1049-1053.
- [26] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2006, **19**(1): 51-53.
- [27] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析[J]. 地理研究, 2010, **29**(11): 1981-1991.
- [28] 四川省农业厅. 四川土壤[M]. 成都: 四川科技出版社, 1995.
- [29] 黄海波, 张进忠, 高扬, 等. 都市农业区域村级果园土壤氮素的空间分布特征——以上海南汇新场镇果园村为例[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(4): 832-838.
- [30] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. 资源科学, 2013, **35**(12): 2434-2443.
- [31] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- [32] 张威, 张旭东, 何红波, 等. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(4): 783-789.
- [33] 李启权, 张新, 高雪松, 等. 川中丘陵县域土地利用程度与效益耦合协调格局分析[J]. 农业现代化研究, 2014, **35**(1): 97-102.
- [34] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2411-2418.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行