

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究

王淑芳, 王效科*, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 为揭示影响密云水库上游流域土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(total nitrogen, TN)密度的主要因子, 采用野外采样、实验室分析和数理统计分析相结合的方法, 研究了气候(温度和降水)、地形(海拔和坡度)、土壤理化性质(土壤容重、含水量、pH值和黏粒含量)以及土地利用方式等因素对SOC和TN密度的影响。结果表明, 密云水库上游流域森林、草地、农田这3种土地利用类型表层(0~20 cm)SOC密度分别为4.77、6.79和2.90 kg·m⁻², TN密度分别为0.41、0.69和0.30 kg·m⁻², 3种土地利用类型之间SOC和TN密度差异显著($P < 0.05$); 土壤含水量、土地利用方式、坡度、土壤pH值和黏粒含量是影响SOC密度的主要因子, 土地利用方式、土壤黏粒含量和含水量则是影响TN密度的主要因子; 气候、地形、土壤理化性质等区域环境因子共同解释了SOC和TN密度变异性的63.6%和53.4%, 而环境因子和土地利用方式对SOC和TN密度变异性的综合解释程度分别为67.6%和57.8%。土地利用对SOC和TN密度变异性的贡献相对于环境因子而言较小, 因此, 建立高空间分辨率的区域环境因子数据库将是精确估算区域土壤碳氮贮量的关键环节。

关键词: 密云水库上游流域; 土壤有机碳密度; 土壤全氮密度; 环境因子; 土地利用方式; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0946-06

Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China

WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Effects of climate (temperature and precipitation), topography (elevation and slope), soil properties (soil bulk density, pH, water and clay contents) and land use on soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) densities were investigated in the study to identify dominant factors controlling SOC and TN densities in the upstream watershed of Miyun Reservoir of North China by soil sampling, laboratory analysis and statistical analysis. Results showed that SOC and TN densities in the 0-20 cm soil layer were 4.77 kg·m⁻² and 0.41 kg·m⁻² in forestland, 6.79 kg·m⁻² and 0.69 kg·m⁻² in grassland, 2.90 kg·m⁻² and 0.30 kg·m⁻² in cropland, respectively. Significant differences in SOC and TN densities were observed among the three land uses. Soil water content, land use, slope, soil pH and clay content were the most significant factors controlling SOC density, while land use, soil clay and water contents were the most significant determinants of TN density. Climate, topography and soil properties jointly explained 63.6% and 53.4% of SOC and TN densities variability, respectively, while environmental factors and land use together explained 67.6% and 57.8% of variations in SOC and TN densities, respectively. Clearly, environmental variables were more important for SOC and TN densities variability than land use in the study area. Therefore, establishing a high-spatial-resolution database of environmental factors is a key to more accurate assessments of SOC and TN stocks on a regional scale.

Key words: upstream watershed of Miyun Reservoir; soil organic carbon density; soil total nitrogen density; environmental factor; land use; influencing factor

土壤是全球重要的碳库和氮库, 在全球碳氮循环中具有重要地位, 直接影响着陆地生态系统的温室气体排放和全球气候变化。在全球变化的背景下, 在区域尺度上研究和揭示影响土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(total nitrogen, TN)密度的主要控制因素, 对于建立和评价碳氮循环过程模型, 精确估算温室气体排放和土壤碳氮截存能力具有重要的理论与实践意义。SOC和TN密度受气候、地形、植被、成土母质、土壤理化性质等自然条件以及土地利用、耕作管理等人类活动综合作用的影

响^[1,2], 并存在各种因子间的相互作用^[3]。已有研究表明, 气温和降水等气候因子^[4~7], 海拔、坡度、坡向等地形因子^[8~10], 土壤质地、土壤容重、含水量、pH值等土壤理化性质^[2,11,12]是影响SOC和TN密度的重要环境因素; 而人类活动(如土地利用方式的变

收稿日期: 2011-05-03; 修订日期: 2011-09-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403402); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050602-3); 国家自然科学基金项目(71003092)

作者简介: 王淑芳(1981~), 女, 博士, 主要研究方向为陆地生态系统碳氮循环, E-mail: fangfang_6281@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

化)对 SOC 和 TN 密度的影响在一定范围内可能会远远超过自然变化影响的速率和程度^[13,14],是影响 SOC 和 TN 密度的重要人为因素.上述因子也是多数研究中经常考虑的影响因素^[15~17],但一般仅就某一方面或某几个因子进行研究,综合考虑环境因子和人为因素共同影响的研究相对较少.

密云水库位于京郊密云县城北山区,是华北地区最大的水库,也是北京市最重要的地表水源地.其上游流域山地广布,地形复杂,气候变化明显,土壤类型和植被类型多样,影响 SOC 和 TN 密度的因素具有较强的变异性.因此,本研究选择在具有重要生态功能的密云水库上游流域,采用野外采样、实验室分析和数理统计分析相结合的方法,在区域尺度上综合考虑气候(温度和降水)、地形(海拔和坡度)、土壤理化性质(土壤容重、含水量、pH 值和黏粒含量)以及土地利用方式等对 SOC 和 TN 密度的影响,探求影响区域 SOC 和 TN 密度的主要因子,以期估算区域土壤碳氮储量以及模拟预测气候变化和土地利用变化对土壤碳氮的影响提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

密云水库上游流域(即密云水库以上潮白河流域)地处 40°19′~41°31′ N、115°25′~117°33′ E 之间,由注入密云水库的潮河和白河两大水系组成,总流域面积 15 788 km²,约占潮白河流域总面积的 88%.流域辖区主要涉及河北省的赤城县、沽源县、丰宁满族自治县、滦平县以及北京市的密云县、怀柔区、延庆县等区县,流域面积的 2/3 在河北省境内,1/3 在北京市境内.流域处于内蒙古地轴东段和燕山台褶带上,地势西北高、东南低,西北部以海拔 1 000~2 290 m 的中山为主,东南部大多为低山、丘陵和部分平原.流域内气候垂直分布明显,以马营、独石口为界划分为 2 个气候带,即北部的中温带半干旱森林草原气候带和南部的暖温带半湿润山地气候带,多年平均降水量为 488.9 mm,降水分布从东南向西北递减.土壤类型以淋溶褐土(28%)、棕壤(26%)、褐土性土(18%)和石灰性褐土(12%)为主.植被覆盖较好,森林占流域面积的 49%,草地占 27%,农田占 21%.

1.2 土壤样品采集与分析

土壤样品采集于 2009 年 8~9 月进行.根据研究区域土地利用类型的分布和面积比例,同时考虑气候、地形、土壤等自然条件的特点,按森林、草地、

农田这 3 种土地利用类型选择代表性样方,在各样方内按照 S 型布点方式布设 3 个采样点,每个样点采用挖取土壤剖面的方法采集表层(0~20 cm)土壤,3 个样点混合为一个土壤样品,共计 149 个样品,其中森林样品 74 个,草地样品 30 个,农田样品 45 个.另外采用环刀(容积 100 cm³)取土测量土壤容重,3 个重复.

土样带回实验室,置于通风、阴凉、干燥的室内风干,过 2 mm 筛,移出砾石和根系.过 2 mm 筛的土样一部分用于测定土壤 pH 值和粒径分布,另一部分继续过 100 目筛,用于测定 SOC 和 TN 含量等.

SOC 含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;TN 含量采用德国 Elementar 公司生产的 Vario EL III 型元素分析仪测定;土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 值采用电位法(水土比 2.5:1)测定;土壤粒径分布采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,粒径分别设定 <0.002 mm、0.002~0.05 mm、0.05~0.1 mm、0.1~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm 这 7 级,根据美国制土壤质地分类标准分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(0.05~2 mm).

1.3 SOC 和 TN 密度的计算

SOC 和 TN 密度是反映土壤特性的重要指标,也是估算 SOC 和 TN 储量的主要参数,通常指单位面积上一定深度的土体中所含的 SOC 和 TN 质量,一般由 SOC 含量或 TN 含量、>2 mm 砾石含量和土壤容重共同决定,计算公式分别为^[18]:

$$\text{SOC}_d = \text{SOC} \times B \times D(1 - \delta)/100 \quad (1)$$

$$\text{TN}_d = \text{TN} \times B \times D(1 - \delta)/100 \quad (2)$$

式中, SOC_d 为 SOC 密度(kg·m⁻²),SOC 为 SOC 含量(g·kg⁻¹), TN_d 为 TN 密度(kg·m⁻²),TN 为 TN 含量(g·kg⁻¹), B 为土壤容重(g·cm⁻³), D 为土层厚度(cm), δ 为土壤中 >2 mm 的砾石体积分数.

1.4 气象数据的收集与计算

根据密云水库上游流域及其周边地区 10 个气象站点的年平均温度和年降水量数据,在 ArcGIS 9.2 软件中采用 Kriging 空间插值法计算各采样点的年平均温度和年降水量.

1.5 数据分析

统计分析在 SPSS 16.0 软件中完成.利用单因素方差分析方法研究 SOC 和 TN 密度在不同土地利用类型间的差异显著性;利用相关分析方法研究环境因子(气候、地形和土壤理化性质)与 SOC 和 TN

密度之间的相关性;利用逐步回归分析方法研究环境因子和土地利用方式对 SOC 和 TN 密度的影响,其中,土地利用方式为多分类变量 (categorical variable),在进行回归分析时采用哑变量 (dummy variable) 方法为其赋值^[19].

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型 0~20 cm 土层 SOC 和 TN 密度

SOC 含量和土壤容重是决定 SOC 密度大小的 2 个重要参数.在不同土地利用方式下,植被类型、植物根系分布、凋落物分解程度以及人为干扰等因素不同,致使 SOC 含量和土壤容重随之发生变化,因而 SOC 密度也随之出现差异.由表 1 可知,0~20 cm 土层中,草地平均 SOC 密度最大,为 6.79 kg·m⁻²;其次为森林;农田最小,仅为 2.90 kg·m⁻²,不到草地的一半;3 种土地利用类型 SOC 密度差异显著($P<0.05$).各土地利用类型 TN 密度的大小关系也表现为:草地>森林>农田,并且差异显著($P<0.05$).草地和森林的 SOC 和 TN 密度显著高于农田,表明研究区域内草地和森林土壤更有利于碳氮的固存和积累.

表 1 不同土地利用类型 0~20 cm 土层 SOC 和 TN 密度¹⁾

Table 1 SOC and TN densities of different land uses in the 0-20 cm soil layer

土地利用类型	样品数	SOC 密度 /kg·m ⁻²	TN 密度 /kg·m ⁻²
森林	74	4.77 ± 0.28a	0.41 ± 0.03a
草地	30	6.79 ± 0.25b	0.69 ± 0.01b
农田	45	2.90 ± 0.13c	0.30 ± 0.01c

1) 表中数据为平均值 ± 标准误,每列中不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著 ($P<0.05$)

2.2 环境因子与 SOC 和 TN 密度之间的相关性

在自然条件下,SOC 和 TN 密度主要受气候、地形、土壤理化性质等环境因素的影响.对密云水库上游流域 0~20 cm 土层 SOC 和 TN 密度与气候(温度和降水)、地形(海拔和坡度)、土壤理化性质(土壤容重、含水量、pH 值和黏粒含量)等自然环境因子进行相关分析,结果如表 2 所示.

SOC 和 TN 密度均与温度和降水之间存在极显著的负相关($P<0.001$),但相关系数较小,表明在区域尺度上 SOC 和 TN 密度与气候因子之间的相关性较弱,从而将使得通过气候因子对区域 SOC 和 TN 密度进行预测变得十分困难,这与 Kern 等^[20]的观点一致.相关分析结果也表明 SOC 和

TN 密度随温度降低而增加,这与前人研究结果^[6,7]一致,但 SOC 和 TN 密度随降水增加而减少的变化趋势却与大多数研究结果^[6,7]相反,这可能与研究区域内的气候类型和土地利用类型分布有关.流域内气候分布明显,从南到北跨越 2 个气候带,南部处于暖湿带半湿润山地气候带,降水较多,土地利用类型主要为人工林和农田,SOC 和 TN 含量相对较低,密度较小;而北部处于中湿带半干旱森林草原气候带,降水较少,但土地利用类型主要为天然次生林和草地,SOC 和 TN 含量较高,密度较大.由此可见,从南到北,降水呈减少的趋势,而 SOC 和 TN 含量呈增加的趋势,两者的变化趋势相反,从而在区域尺度上表现出 SOC 和 TN 密度随降水增加而减少的变化规律.因此,区别于多数研究中相关区域内温度因子对 SOC 和 TN 积累产生负效应而降水因子促进 SOC 和 TN 增加的情况,温度和降水因子对密云水库上游流域 SOC 和 TN 的积累均具有负效应.

SOC 和 TN 密度与海拔之间均存在极显著的正相关($P<0.001$),表明 SOC 和 TN 密度随海拔升高表现为增加的趋势,这与前人研究结果^[11,12]一致. SOC 和 TN 密度随坡度增加而增加,这与 Hontoria 等^[19]的研究结果相似,可能是由不同坡度对土地利用和植被分布的影响决定的.本研究区域地形复杂,植被垂直分布明显.坡度较大的中高山区主要分布着天然林、草地和人工林,人为干扰少,植被保存较好,林下土层较厚,积累的 SOC 和 TN 较多;而坡度较缓的平原区和低山区基本为农田和牧草地,人为影响大,植被破坏和水土流失比较严重,SOC 和 TN 含量相对较少.因此,总体上表现为坡度越大,SOC 和 TN 密度越高.

在土壤理化性质因子中,SOC 和 TN 密度与土壤含水量和黏粒含量之间存在极显著的正相关($P<0.001$),而与土壤容重和 pH 值之间存在极显著的负相关($P<0.001$),这与多数研究结果^[2,21~23]一致,表明 SOC 和 TN 密度随土壤含水量和黏粒含量增加而增加,随土壤容重和 pH 值升高而减少,因此土壤越湿润,结构越松弛,质地越细腻,则越有利于 SOC 和 TN 的积累.

2.3 各环境因子和土地利用方式对 SOC 和 TN 密度的影响大小

为定量说明各环境因子和土地利用方式对 SOC 和 TN 密度影响的大小程度,分别以温度、降水、海拔、坡度、土壤容重、含水量、pH 值、黏粒含量和土地

表 2 SOC 和 TN 密度与环境因子的相关系数¹⁾

	Table 2 Correlation coefficients of SOC and TN densities with climatic, topographic and soil properties									
	SOC 密度	TN 密度	温度	降水	海拔	坡度	土壤容重	土壤含水量	土壤 pH 值	土壤黏粒含量
SOC 密度	1.000									
TN 密度	0.95 ***	1.000								
温度	-0.311 ***	-0.345 ***	1.000							
降水	-0.295 ***	-0.334 ***	0.684 ***	1.000						
海拔	0.535 ***	0.529 ***	-0.890 ***	-0.741 ***	1.000					
坡度	0.311 ***	0.173 *	0.294 ***	0.332 ***	-0.058	1.000				
土壤容重	-0.648 ***	-0.533 ***	0.053	0.246 **	-0.368 ***	-0.444 ***	1.000			
土壤含水量	0.603 ***	0.572 ***	-0.170 *	-0.247 **	0.326 ***	-0.017	-0.641 ***	1.000		
土壤 pH 值	-0.421 ***	-0.323 ***	-0.232 **	-0.299 ***	-0.061	-0.712 ***	0.475 ***	-0.135 *	1.000	
土壤黏粒含量	0.459 ***	0.433 ***	-0.100	-0.198 **	0.240 **	0.200 **	-0.393 ***	0.331 ***	-0.180 *	1.000

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$,下同

利用方式为自变量,以 SOC 和 TN 密度为因变量进行一元回归分析,通过比较各回归方程的调整判定系数,确定各环境因子和土地利用方式对 SOC 和 TN 密度变异程度的独立解释能力,结果见表 3.

在影响 SOC 密度的各因子中,土壤容重的独立解释能力最强,能够解释 SOC 密度变异性的 42.0%;其次是土壤含水量,对 SOC 密度变异性的解释程度达到 36.3%;再次分别为海拔、土地利用方式和土壤黏粒含量,解释能力均在 20% 以上;而温度、降水和坡度对 SOC 密度变异的解释程度均较

小,不到 10%,其中降水的解释能力最小,仅为 8.7%.而在影响 TN 密度的各因子中,土壤含水量的独立解释能力最强,能够解释 TN 密度变异性的 32.7%;其次分别为土壤容重、海拔和土地利用方式,解释能力均在 20% 以上;再次为土壤黏粒含量,其解释程度接近 20%;温度和降水的解释能力均大于土壤 pH 值;坡度的解释能力最小,仅为 3.0%.此外,在各因子中,除温度和降水外,其它 7 个因子对 SOC 密度变异性的解释程度均大于对 TN 密度变异的解释.

表 3 各影响因子独立解释 SOC 和 TN 密度变异性的百分数/%

Table 3 Contributions of each variable alone to the variability of SOC and TN densities/%									
项目	温度	降水	海拔	坡度	土壤容重	土壤含水量	土壤 pH 值	土壤黏粒含量	土地利用方式
SOC 密度	9.7 ***	8.7 ***	28.6 ***	9.7 ***	42.0 ***	36.3 ***	17.7 ***	21.0 ***	23.6 **
TN 密度	11.9 ***	11.2 ***	28.0 ***	3.0 *	28.4 ***	32.7 ***	10.4 ***	18.8 ***	22.3 **

2.4 各环境因子和土地利用方式对 SOC 和 TN 密度影响的重要性

采用逐步回归分析方法能够了解各因子对 SOC 和 TN 密度影响的相对重要性以及所有因子对 SOC 和 TN 密度变异性的综合解释能力,分析结果见表 4.表中 R^2 '为除该变量外其它 8 个变量与 SOC 和 TN 密度逐步回归方程的判定系数; ΔR^2 为在其它变量的基础上增加该变量时,回归方程判定系数的增量, ΔR^2 越大,说明该变量在回归方程中越重要; $R^2_{\text{偏}}$ 为偏判定系数,是指新加入回归方程的变量所解释部分占缺少该变量时回归方程未能解释部分的比例大小,也是判断自变量重要性的指标之一; R^2_{adj} 为调整判定系数,是回归方程中的所有自变量对因变量变异性的解释程度.

由表 4 可知,土壤含水量对 SOC 密度的影响最大;其次为土地利用方式;再次分别为坡度、土壤

pH 值和黏粒含量,三者对 SOC 密度的影响相当;土壤容重和海拔次之,二者的影响也相当;而温度和降水对 SOC 密度的影响最小,在逐步回归中均未进入方程.8 个环境因子共同解释了 SOC 密度变异性的 63.6%,而将土地利用方式因素加入回归分析中后,环境因子和土地利用方式对 SOC 密度变异的综合解释程度达到 67.6%.

对 TN 密度影响最大的因子是土地利用方式和土壤黏粒含量,二者的影响程度相同;其次是土壤含水量;再次为土壤 pH 值和海拔,二者的影响程度均相对较小;而影响最小的是温度、降水、坡度和土壤容重,它们在逐步回归中均未进入方程.8 个环境因子共同解释了 TN 密度变异性的 53.4%,而将土地利用方式因素加入回归分析中后,环境因子和土地利用方式对 TN 密度变异的综合解释程度达到 57.8%.

表 4 SOC 和 TN 密度与影响因子逐步回归分析结果¹⁾

影响因子	SOC 密度				TN 密度			
	$R^{2'}$	ΔR^2	$R^2_{\text{偏}}$	R^2_{adj}	$R^{2'}$	ΔR^2	$R^2_{\text{偏}}$	R^2_{adj}
环境因子				0.636				0.534
温度	—	—	—		—	—	—	
降水	—	—	—		—	—	—	
海拔	0.680	0.014	0.044		0.591	0.001	0.002	
坡度	0.666	0.028	0.084		—	—	—	
土壤容重	0.679	0.015	0.047		—	—	—	
土壤含水量	0.642	0.052	0.145		0.562	0.030	0.068	
土壤 pH 值	0.668	0.026	0.078		0.586	0.006	0.014	
土壤黏粒含量	0.672	0.022	0.067		0.547	0.045	0.099	
土地利用方式	0.648	0.046	0.131		0.547	0.045	0.099	
全部因子				0.676				0.578

1) “—”表示显著水平为 $P > 0.05$, 该变量没有进入回归方程

2.5 密云水库上游流域 SOC 和 TN 密度的主要影响因子

将表 3 与表 4 的结果进行比较可知,在考虑了其它因子的影响下,某一因子对 SOC 和 TN 密度变异性的解释能力均低于其独立解释能力,表明各种影响因子之间存在着较强的相互作用.如环境因子对土地利用方式及其分布的决定性影响就大大削弱了土地利用对 SOC 和 TN 密度的影响.由于气候、地形、土壤理化性质以及人为活动等诸多因子都会对 SOC 和 TN 密度产生一定的影响,因此,如果将 $\Delta R^2 > 2\%$ 的因子作为主要影响因子,则影响密云水库上游流域 SOC 密度的主要因子依次为土壤含水量、土地利用方式、坡度、土壤 pH 值和黏粒含量,而影响 TN 密度的主要因子则依次为土地利用方式、土壤黏粒含量和含水量.

土壤含水量与 SOC 和 TN 密度之间存在极显著的较强正相关关系(见表 2),并且是影响密云水库上游流域 SOC 和 TN 密度的重要因子,这一结论对该区域土壤碳氮积累具有重要的现实意义.由于地处中国北方干旱半干旱地区,密云水库上游流域干旱少雨,水资源非常紧缺,而由于历史形成的习惯,农民在流域内大量种植水稻,耗水量巨大,不仅大量截留宝贵的水资源,导致密云水库来水减少,而且大量农药、化肥的使用也给密云水库水质安全造成隐患.因此,为保证密云水库来水的水量和水质安全,2001 年国务院批准实施《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》,对密云水库上游地区进行农业产业结构调整,发展节水型农业生产和灌溉,从 2003 年开始在密云水库上游地区开展“退稻还旱”工程,

流域沿线逐步退出水稻种植,改种玉米、大豆等节水型作物和耐旱作物,农田灌溉面积大幅减少.农业用水的减少以及干旱少雨的气候特点,将导致本地区土壤含水量的降低,从而使土壤含水量成为该地区土壤碳氮积累的重要限制因子.因此,从保障北京水资源安全与保持流域内土壤碳氮平衡双赢的角度看,为解决水资源紧缺问题,北京亟须建立一个全面的供水安全体系,打造“节水型社会”,立足现有水资源的利用,调节存储,全民节水,同时应谨慎调水,以保证其周边同样缺水地区正常的生产用水和生态需水,促进生态平衡.

3 结论

(1)密云水库上游流域不同土地利用类型表层(0~20 cm)SOC 和 TN 密度的大小关系均表现为:草地>森林>农田,并且差异显著($P < 0.05$),表明研究区域内草地和森林土壤更有利于碳氮的固存和积累.

(2)相关分析表明,SOC 和 TN 密度与海拔、坡度、土壤含水量和黏粒含量之间存在显著的正相关($P < 0.05$),而与温度、降水、土壤容重和 pH 值之间存在极显著的负相关($P < 0.001$).即 SOC 和 TN 密度随环境因素变化的趋势表现为:随海拔、坡度、土壤含水量和黏粒含量的增加而增加,随温度、降水、土壤容重和 pH 值的增加而减少.

(3)在各因子中,土壤容重、含水量、海拔、土地利用方式和黏粒含量对 SOC 和 TN 密度的独立解释能力较强,而温度、降水和坡度的解释程度较弱.当与其它因子综合考虑时,单一因子贡献的解释程度

要远远低于其独立解释能力,表明各种影响因子之间存在较强的相互作用。

(4)影响密云水库上游流域 SOC 密度的主要因子依次为土壤含水量、土地利用方式、坡度、土壤 pH 值和黏粒含量,影响 TN 密度的主要因子则依次为土地利用方式、土壤黏粒含量和含水量。

(5)气候、地形、土壤理化性质等区域环境因子共同解释了 SOC 和 TN 密度变异性的 63.6% 和 53.4%,而将土地利用方式因素加入回归分析中后,环境因子和土地利用方式对 SOC 和 TN 密度变异的综合解释程度分别达到 67.6% 和 57.8%。由此可见,土地利用对 SOC 和 TN 密度变异性的贡献相对于环境因子而言较小。因此,建立高空间分辨率的区域环境因子数据库将是精确估算区域土壤碳氮贮量的关键环节。

致谢:感谢中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室罗云建、张千千、杨乐同学在野外采样期间的辛勤工作以及中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站肖钦同志在实验室分析工作中的积极协作。

参考文献:

- [1] Spain A V. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, **28**(6): 825-839.
- [2] Homann P S, Kapchinske J S, Boyce A. Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85** (3): 303-316.
- [3] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls [J]. *Geoderma*, 1996, **74**(1-2): 65-105.
- [4] Alvarez R, Lavado R S. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina [J]. *Geoderma*, 1998, **83**(1-2): 127-141.
- [5] Ganuza A, Almendros G. Organic carbon storage in soils of the Basque Country (Spain): the effect of climate, vegetation type and edaphic variables[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **37**(3): 154-162.
- [6] Burke I C, Yonker C M, Parton W J, *et al.* Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**(3): 800-805.
- [7] Miller A J, Amundson R, Burke I C, *et al.* The effect of climate and cultivation on soil organic C and N [J]. *Biogeochemistry*, 2004, **67**(1): 57-72.
- [8] Garten C T, Post W M, Hanson P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains [J]. *Biogeochemistry*, 1999, **45** (2): 115-145.
- [9] Griffiths R P, Madritch M D, Swanson A K. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): implications for the effects of climate change on soil properties [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **257**(1): 1-7.
- [10] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(7): 1675-1681.
- [11] Konen M E, Burras C L, Sandor J A. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in North Central Iowa [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(6): 1823-1830.
- [12] Grigal D F, Ohman L F. Carbon storage in upland forests of the Lake States [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(3): 935-943.
- [13] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, *et al.* Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(2): 105-123.
- [14] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(4): 345-360.
- [15] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2314-2319.
- [16] 张勇, 史学正, 于东升, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究 [J]. *土壤学报*, 2009, **46**(3): 526-531.
- [17] 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.
- [18] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究 [J]. *土壤学报*, 2001, **38**(4): 522-528.
- [19] Hontoria C, Saa A, Rodríguez-Murillo J C. Relationships between soil organic carbon and site characteristics in Peninsular Spain [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63** (3): 614-621.
- [20] Kern J S, Turner D P, Dodson R F. Spatial patterns in soil organic carbon pool size in the northwestern United States [A]. In: Lal R. *Soil processes and the carbon cycle* [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1998. 29-43.
- [21] Ungaro F, Calzolari C, Busoni E. Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy: water retention properties [J]. *Geoderma*, 2005, **124**(3-4): 293-317.
- [22] Bai J H, Ouyang H, Deng W, *et al.* Spatial distribution characteristics of organic matter and total nitrogen of marsh soils in river marginal wetlands [J]. *Geoderma*, 2005, **124**(1-2): 181-192.
- [23] Hati K M, Swarup A, Dwivedi A K, *et al.* Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, **119**(1-2): 127-134.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行