

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)	

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^{1,3}, 李新荣¹, 周玉燕¹, 李元寿²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 3. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: 通过测定干旱沙区不同年代人工植被固沙区土壤剖面 1 m 深度容重和有机碳、全氮含量, 估算了人工固沙植被演变过程中土壤有机碳和全氮储量特征及其垂直分布格局。研究表明, 干旱沙区人工固沙植被演变过程中, 0~100 cm 深土壤有机碳和全氮储量均呈增加趋势; 有机碳氮储量表现出了固沙初期的显著增加期(<16 a), 随后的缓慢增加积累期(16~25 a), 及后期的显著增加期(>25 a), 该变化趋势主要体现在 0~20 cm 的表层。土壤有机碳氮储量增加程度随深度增加有降低趋势, 并且表层土壤(0~20 cm)有机碳和全氮储量远大于深层土壤(20~100 cm); 固沙初期土壤有机碳和全氮储量的增加体现在 0~100 cm 各个深度, 而随后积累期主要体现在 0~20 cm 深度, 固沙后期的增加也主要在 0~20 cm 深度, 20 cm 以下增加不明显; 0~100 cm 深土壤有机碳氮储量表聚性随固沙植被演变越来越明显。明确了降水<200 mm 的沙区人工固沙过程中植被和土壤特征的改变对土壤有机碳氮储量及分布特征的影响, 为更好地理解干旱人工植被区的碳循环特征和预测该生态系统与气候变化间的反馈关系奠定了基础。

关键词: 干旱沙区; 人工固沙植被; 有机碳; 全氮; 储量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0938-08

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^{1,3}, LI Xin-rong¹, ZHOU Yu-yan¹, LI Yuan-shou²

(1. Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China; 3. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Soil carbon pool acts as the largest one of carbon pools in the terrestrial ecosystem. The storages and distributed patterns of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) evaluated accurately are helpful to predict the feedback between the terrestrial ecosystem and climate changes. Based on the data about bulk density, content of SOC and TN at 0-100 cm soil profile, the density of SOC and TN at the temporal (chronosequence of artificial vegetation) and spatial (vertical) distributed patterns have been estimated. The results indicated that storages of SOC and TN at 0-100 cm depth increased with the chronosequence of artificial vegetation. The storages of SOC and TN showed the same tendency with the succession time of artificial vegetation. Storages of SOC and TN significantly increased at the early stage of banding sand by artificially vegetation (<16 a), then piled up at the mid-stage (16-25 a), and markedly increased at the late stage (>25 a). The variation of storages mainly occurred in the 0-20 cm depth. The storages decreased with the soil vertical depth. At the early stage of banding sand, increase in storage included every depth (0-100 cm). Whereas, at the later stage, increase in storage at 0-20 cm depth was main, and increase in the 20-100 cm was inconspicuous. The accumulation of storage at the shallow soil depth was more notability with the succession of artificial vegetation. The distributed pattern of storage in SOC and TN has been confirmed in arid desert regions below 200 mm annual precipitation. This was beneficial to understand the carbon cycle and to predict the feedback relationship between desert ecosystem and climate changes.

Key words: arid desert; artificial vegetation of banding sand; soil organic carbon (SOC); total nitrogen (TN); storage

土壤圈是陆地生态系统中储量最大的碳库, 土壤碳储量约是目前大气碳储量的 2 倍、植被碳储量的 3 倍^[1~3]。因此, 土壤碳库可视为大气 CO₂ 的重要源和汇^[4], 其储量的任何变化都将在很大程度上改变大气 CO₂ 浓度和影响全球碳平衡^[5,6]。那么, 占全球陆地总面积 40% 的干旱土地在全球碳循环过程

中也占有十分重要的地位^[7,8]。但是, 干旱区因严酷

收稿日期: 2011-05-04; 修订日期: 2011-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801002, 41171077); 国家杰出青年科学基金项目(40825001); 国家自然科学基金重点项目(40930636)

作者简介: 贾晓红(1973~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为干旱区恢复生态学, E-mail: jiaxiaohonggs@163.com

的自然条件和对不同的过程作用的敏感和脆弱性而面临着大范围的严重退化. 人类活动而产生土地和植被退化的荒漠化过程,影响着全球干旱地区 36 亿 hm^2 的土地^[7]. 尽管土壤和植被的退化导致了温室气体的释放^[9]. 然而试验证明,通过采用恢复措施改善土壤质量、增加土壤有机碳含量、提高生物量生产来缓解温室效应是可行的^[7,10~15].

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计算,土壤碳密度已成为评价和衡量土壤中有机碳储量的一个极其重要的指标. 土壤氮作为土壤肥力的指征,其储量和密度不仅直接影响生物生产力,而且影响土壤碳密度和储量. 尽管土壤有机碳周转缓慢,其总量的微小变化难于发现,但是不同演替阶段的生态系统地下部分碳汇功能的差异^[16~18],将会导致土壤碳储量在时间和空间分布的不同. 准确估算干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳库储量,揭示其时间和分布格局将有助于预测陆地生态系统与气候变化之间的反馈关系. 然而目前,荒漠生态系统中关于人工措施改善沙区生态环境方面的研究主要集中在土壤-植被特征变化及其相互关系和如何维持稳定性^[19~31],尚缺乏干旱沙区采用人工植被措施对土壤氮和有机碳密度储量影响方面的研究. 降水量 $< 200 \text{ mm}$ 的沙坡头流沙区,采用麦草方格沙障和栽植固沙植物的方式,改善了土壤成土环境、加强了生物地球化学循环过程,特别是使土壤肥力、持水性能等的改变^[28,29],促使人工植被的组成发生了变化. 了解干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤碳和氮储量可为正确认识和评估荒漠化地区恢复措施对全球碳平衡的影响和大气 CO_2 的响应提供基础数据,也可为干旱沙区大规模生态建设的环境效益评价提供背景资料. 本研究以我国干旱沙漠区流沙治理的成功模式,包兰铁路沙坡头地段无灌溉人工植被防护体系作为对象,探讨荒漠化逆转过程中土壤全氮和有机碳储量时间和垂直变化趋势,以期为更好地理解风沙区人工植被建设的碳循环特征和预测该生态系统与气候变化间的反馈关系奠定基础.

1 研究区域与方法

1.1 自然概况

研究区位于宁夏中卫县境内的沙坡头地区,地处腾格里沙漠东南缘($37^{\circ}27'N$, $104^{\circ}57'E$),属于草原化荒漠地带,海拔 $1\,500 \text{ m}$. 该区年均气温 9.6°C ,

绝对最高气温为 38.1°C ,绝对最低气温为零下 25.1°C ,多年平均降水量为 181.6 mm ,年蒸发量高达 $3\,000 \text{ mm}$,是年均降水量的 15 倍以上^[32],天然植被盖度约为 $1\% \sim 2\%$,境内主要分布着高大密集的格状新月形沙丘链,土壤基质为疏松、贫瘠的流沙,沙丘的持水量很低,田间持水量为 $3.34\% \sim 3.96\%$,沙层稳定含水量仅 $2\% \sim 3\%$;格状沙丘的地下水埋藏很深,达几十米以下,不能为植物利用 $1\% \sim 2\%$ ^[33].

1.2 方法

1.2.1 样地设置

采样地点选择在始建于 1956 年的中国科学院沙坡头沙漠试验研究站铁路北的人工植被试验区. 为了确保包兰铁路沙坡头段的畅通无阻,自 1956 年起中国科学院和有关单位建立了“以固为主,固阻结合”的防护体系,在流沙上扎设 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的麦草方格沙障作为固沙屏障,再栽植固沙植物的方式固定流沙. 该区无灌溉人工植被固沙体系营建 50 余年来,使得原来以流动沙丘为主的沙漠景观演变成了一个复杂的人工-天然荒漠生态系统,降水、降尘等输送的细土物质已对土壤质地产生了影响. 群落的结构由单一的灌木半灌木组成演变到一年生草本层逐渐占优势的复杂结构群落,植被覆盖度基本维持在 $20\% \sim 40\%$,每年提供的枯枝落叶量 $43.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[24,25]. 随植物固沙阶段的推移,枯枝落叶的增加,大量微生物、藻类、藓类和草本植物等的出现及表层孢子植物的分泌物、残体和大气降尘(每年平均 1.60 mm)以 $1 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 速度沉积,沙面已由人工植被建立初期的无机结皮逐渐发育成有机结皮^[26]. 表层生境的变化已对生物防护体系的生态过程产生了影响,并制约着生态环境的动态质量,见表 1^[19,21~23].

1.2.2 土壤取样及分析

选择于 2000 (M1)、1990 (M2)、1987 (M3)、1981 (M4)、1964 (M5)、1956 (M6) 年固沙的植被建设样地,在每一样地选择四样区,每一样区用直径为 4 cm 土钻随机取 10 个样点,分 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 、 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 和 $60 \sim 100 \text{ cm}$ 采集土壤样品,均匀混合后用四分法取出足够样品作为一个样区土壤混合样;并在无人干扰的沙漠腹地 (M0) 和无人干扰的天然植被区 (Mn),以相同的方法采集流动沙丘和参考样地土壤样品. 所有样品带回室内自然风干,先用过 2 mm 孔径的土壤筛,除去混入的植物体碎屑;取部分土样进一步

表 1 固沙植被演变阶段环境状况
Table 1 Status of experimental plots

样地	总植被盖度 /%	优势植物种	土壤结皮厚度 /cm	土壤含水量 /%	土壤微生物数量 ×10 ³ /个·g ⁻¹
天然植被区		<i>Artemisia ordosica</i> 、 <i>Caragana korshinskii</i> 、 <i>Lespedeza davurica</i> 、 <i>Ceratoides lateens</i> 、 <i>Oxytropis aciphylla</i> 、 <i>Stipa breviflora</i> 、 <i>Carex stenophylloides</i> 、 <i>Cleistogenes sogorica</i> 、 <i>Allium mongolicum</i> 、 <i>Oxytropis myriophylla</i> 、 <i>Enneapogon brachystachyus</i> 、 <i>Aparagus gobicus</i>			
1956 年	25.19	<i>Artemisia ordosica</i> 、 <i>Bassia dasyphylla</i> 、 <i>Eragrostis poaeoides</i>	2.10	1.16	32 253.49
1964 年	27.67	<i>Artemisia ordosica</i> 、 <i>Bassia dasyphylla</i> 、 <i>Caragana korshinskii</i>	1.00	1.17	63 794.88
1981 年	36.37	<i>Agriophyllum squarrosum</i> 、 <i>Artemisia ordosica</i>	0.40	1.52	20 213.79
1987 年	30.00	<i>Artemisia ordosica</i> 、 <i>Atraphaxis bracteata</i>	0.30	2.03	19 119.38
1990 年	40.00	<i>Artemisia ordosica</i> 、 <i>Bassia dasyphylla</i> 、 <i>Eragrostis poaeoides</i>	0.20	2.56	
2000 年	41.00	<i>Bassia dasyphylla</i> 、 <i>Eragrostis poaeoides</i> 、 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	—	2.72	
流动沙丘	<1.00	<i>Agriophyllum squarrosum</i> 、 <i>Hedysarum scoparium</i>	0	3.04	15 699.80

磨细全部通过 0.25 mm 筛,用重铬酸钾氧化外加热法和凯氏法测定土壤全碳和氮. 容重采用环刀采集原状土, 105℃ 烘干测定^[34].

1.2.3 土壤碳氮储量计算方法

土壤有机碳储量用土壤有机碳密度来表示,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础来计算,土壤有机碳密度已成为衡量和评价土壤有机碳储量一个极其重要的指标,其本身也是一项反映土壤特性的重要指标,它由土壤有机碳含量、砾石(粒径 >2 mm)含量和容重所共同确定. 某一土层的土壤有机碳密度 TOC (Mg·hm⁻²) 计算公式为^[35]:

$$SOC_i = c_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100$$

式中, c_i 为土壤有机碳含量 (g·kg⁻¹), D_i 为土壤容重 (g·cm⁻³), E_i 为土壤厚度 (cm), G_i 为直径 >2 mm 的石砾所占的体积百分比 (%). 因研究区整个土壤剖面 (0~100 cm) 无直径 >2 mm 的石砾, 所以公式中 G_i 为 0.

如果某一土体剖面由 k 层组成, 那么该剖面的有机碳密度 SOC_t 为:

$$SOC_t = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k c_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100$$

土壤全氮储量的计算参照土壤有机碳储量计算方法.

数据利用 SPSS 13.0 软件包进行平均值、标准差和单因素方差 (one-way ANOVA) 分析, 显著性检验水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和全氮含量分布特征

人工固沙植被区土壤有机碳在 (植被演变过程

中) 时间和空间 (垂直) 方向表现出不同的变异, 随固沙时间的延长土壤有机碳含量呈增加趋势, 而同一年固沙植被区土壤有机碳含量随土层深度的增加呈逐渐降低的趋势 [图 1(a)]. 相对于流沙区而言, 人工植被固沙 50 a 在 0~5 cm 土壤有机碳含量增加了 2 808.70%, 5~10 cm 增加了 2 500.00%, 10~20 cm 增加了 1 400.00%, 而 20~40、40~60 和 60~100 cm 均增加了 700.00%. 虽然干旱沙区基于工程措施结合生物措施进行的人工固沙, 可有效地提高土壤有机碳含量, 但增加的程度不同; 随深度的增加有机碳增加的程度有所降低, 土壤有机碳的增加主要体现在 0~20 cm, 20~100 cm 深度土壤有机碳含量增加较少. 人工植被固沙初期 (<16 a) 0~20 cm 土壤有机碳含量是一个明显的渐增过程, 随后有一积累期 (16~25 a), >25 a 又是一个显著的渐增过程; 而 20~100 cm 土壤有机碳含量增加的趋势不明显. 与自然植被区相比, 固沙 50 a 的沙

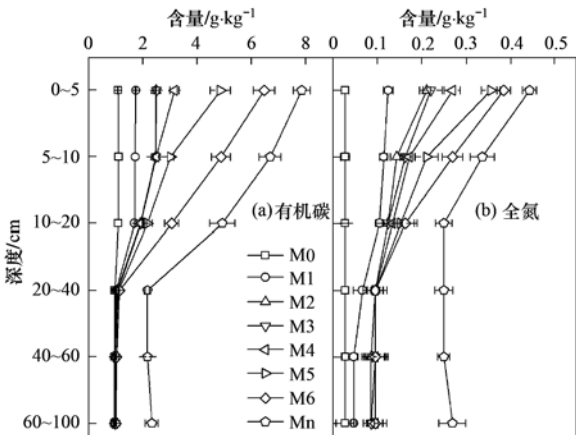


图 1 不同深度土壤有机碳和全氮含量
Fig. 1 Content of soil organic carbon and total nitrogen at different depth

地土壤各层有机碳含量较低,尤其是 20 cm 以下的增加量较少[图 1(a)].

人工固沙植被演变过程中 0~100 cm 土壤全氮变化的趋势与有机碳相似. 所不同的是在植被固沙初期 0~100 cm 深度土壤全氮都有一个明显的增加阶段(<16 a),随后 0~20 cm 全氮含量持续增加,而 20 cm 以下增加的趋势不明显,呈缓慢的累积过程. 与天然植被区相比,土壤全氮含量增加的程度较低,特别是 10 cm 以下土层的全氮增加量较少[图 1(b)].

2.2 土壤容重变化

流沙区的土壤容重在垂直方向上基本无显著的变化;人工植被固沙后,植被类型、根系分布特征、土壤性质和管理方式等的差异都会对土壤容重产生重要的影响. 相比较流沙区和天然植被区,人工固沙植被区的土壤容重随深度呈增加趋势;植被对土壤容重的影响体现在时间和空间方向上,随固沙年限的延长,土壤各层容重都有降低的趋势,并且固沙年限越长,其对容重的影响深度也增加(表 2),如固沙 50 a 植被对土壤深度的影响达 100 cm,而固沙 6 a 时,影响深度为 10 cm.

表 2 植被演变过程中土壤容重特征/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Table 2 Soil bulk density of during the succession of artificial sand-binding vegetation/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$								
深度/cm	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Mn
0~5	1.60±0.01	1.55±0.03	1.47±0.02	1.45±0.07	1.45±0.05	1.44±0.06	1.38±0.06	1.38±0.03
5~10	1.60±0.05	1.56±0.03	1.55±0.02	1.55±0.05	1.54±0.04	1.52±0.05	1.46±0.05	1.39±0.04
10~20	1.61±0.01	1.59±0.02	1.56±0.02	1.56±0.09	1.54±0.05	1.53±0.03	1.50±0.08	1.52±0.02
20~40	1.61±0.02	1.60±0.01	1.60±0.03	1.59±0.04	1.55±0.04	1.54±0.04	1.51±0.04	1.53±0.03
40~60	1.62±0.03	1.60±0.04	1.60±0.03	1.60±0.09	1.58±0.04	1.55±0.05	1.51±0.09	1.43±0.02
60~100	1.63±0.03	1.61±0.03	1.61±0.01	1.61±0.01	1.60±0.02	1.60±0.04	1.59±0.04	1.48±0.03

2.3 土壤有机碳和全氮储量分布特征

虽然天然植被区 0~100 cm 土壤有机碳储量显著大于流沙区和人工固沙植被区($P<0.05$),但固沙区 0~100 cm 深土壤有机碳和全氮储量随固沙时间延长有增加的趋势(图 2);人工固沙植被区土壤-植被的演变,增加了 0~100 cm 土层的有机碳氮储量,并且导致了不同年限固沙区土壤碳氮储量的差异. 天然植被区 0~100 cm 土壤有机碳和全氮储量显著高于流沙区(图 2),但天然植被区 0~20 cm 土壤有机碳和全氮储量占总剖面比例分别为 48.10% 和 22.57%,流沙区分别为 40.36% 和 19.97%. 从整个剖面的分布比例看,天然植被区和流沙区浅层和深层分布有极为相似的格局,即深层土壤的储量占较大比例,而浅层土壤占的比例较小. 人工固沙植被区土壤有机碳和全氮储量却是 0~20 cm 占较大比例,而深层土壤比例较小,并且这种趋势随人工植被演变有增加的趋势(图 2).

2.4 土壤有机碳和全氮储量增长率

与流沙($1.93\text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.16\text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)相比,固沙 6、16、19、25、42 和 50 a, 0~100 cm 土层有机碳和全氮储量分别增加了 111.75% 和 367.46%、212.59% 和 736.78%、214.37% 和 768.49%、243.96% 和 835.42%、371.04% 和 901.92%、589.12% 和 934.40%;虽然固沙时间越长,0~100 cm 深土壤有机碳储量增加量越大,并且

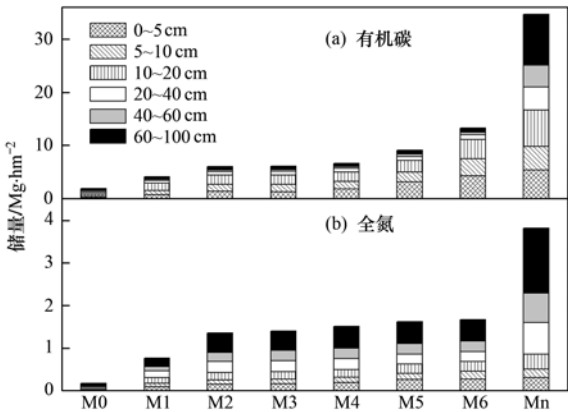


图 2 植被演变过程中土壤有机碳和全氮 0~100 cm 储量
Fig. 2 Densit of soil organic carbon and total nitrogen in 0-100 cm

有机碳储量增加量显著大于全氮($P<0.05$)(图 3),但是 0~100 cm 土壤全氮储量的增加率却显著大于有机碳($P<0.05$);有机碳氮储量表现出了明显先显著增加期(<16 a),随后的缓慢增加积累期(16~25 a),后期的显著增加期(>25 a). 有机碳储量 0~20 cm 占 0~100 cm 的比例,流沙区为 40.36%,固沙 6、16、19、25、42 和 50 a,分别为 71.73%、73.97%、73.62%、75.35%、78.90% 和 83.80%[图 3(a)]. 全氮储量 0~20 cm 占 0~100 cm 比例,流沙区为 19.97%,固沙 6、16、19、25、42 和 50 a 植被区分别为 40.75%、31.06%、31.41%、32.90%、38.23% 和 40.56%[图 3(b)].

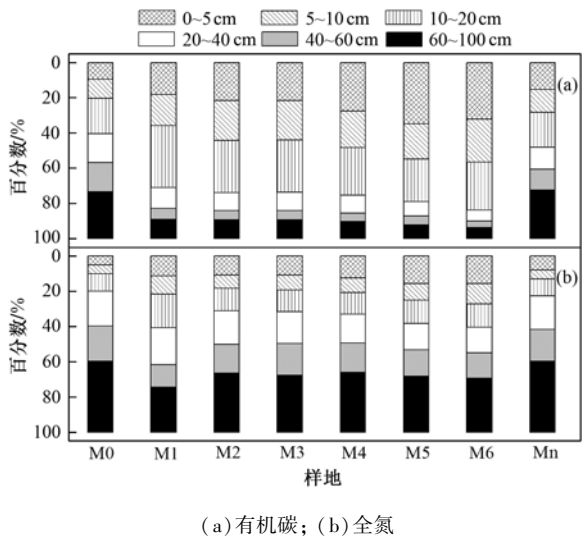


图3 植被演变过程中各层土壤有机碳和全氮储量占0~100 cm含量百分数

Fig. 3 Percent of carbon and nitrogen storage in every depth relative to the whole profile

固沙后,各土层有机碳和全氮储量的增长率随固沙年限的延长在增加,不同演变阶段,土壤有机碳和全氮储量增长率不同,陡增率发生在固沙初期(<16 a)和固沙后期(>25 a);0~20 cm土层增长率变化最大,20~100 cm增长缓慢(表3).

3 讨论

干旱沙区,风蚀是影响地表特征和土壤生物潜力的一个重要过程^[36].一方面风蚀会导致土壤细颗粒的损失,使土壤质地更加沙质化^[37],不利于土壤结构维持及水分和养分的保持,降低了土壤的生产潜力.另一方面,风蚀是通过对土壤细颗粒的选择性吹蚀而引起土壤碳、氮储量损失^[38],导致土壤贫瘠.这是因为土壤中有机碳氮是与各粒径颗粒相结合形成了土壤的保护性和非保护性碳氮组分.在土地沙漠化过程中,土壤细颗粒的损失恰恰是保护性碳氮组分损失的过程.降水<200 mm的干旱流沙区,采

表3 与流沙相比的土壤有机碳和全氮储量增长率/%

Table 3 Increased ratio of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) storages at different sites since sand-binding vegetation compared with the moving dunes/%

指标	固定年龄/a	深度/cm					
		0~5	5~10	10~20	20~40	40~60	60~100
SOC	6	304.35	247.08	273.06	49.06	—	—
	16	625.54	552.63	364.77	90.00	0.00	23.37
	19	609.24	556.34	364.77	100.00	—	23.37
	25	900.82	559.47	362.80	107.63	—	22.61
	42	1 629.57	765.45	466.81	128.13	40.74	34.87
	50	2 336.03	1 503.92	840.41	155.50	49.14	58.39
TN	6	965.63	875.00	800.00	396.88	203.75	195.38
	16	1 775.00	1 159.38	972.50	700.00	608.75	593.54
	19	1 803.13	1 353.13	972.50	700.00	695.00	593.54
	25	2 256.25	1 440.00	1 055.00	655.00	680.00	687.69
	42	3 050.00	1 800.00	1 238.75	630.00	660.00	687.69
	50	3 417.50	2 353.75	1 306.25	630.00	655.00	682.77

用麦草方格沙障和栽植固沙植物的方式,增加了地表粗糙度,降低了地表细沙粒和黏粒的吹蚀,并有力地截获了大气降尘^[26],黏粉粒含量的增加不仅改变了土壤的通气状况和持水性能,而且增加了黏土矿物对有限养分的保护作用^[30,31,39],增加的土壤有机碳氮储量改变了土壤的持水性能、加速了养分的周转,提高了土壤的生产潜力,削弱了该生态系统中土壤养分对植物生产力的限制作用^[40].反过来,植物地上和地下生物量的增加,提高了植物对土壤碳氮源的供给.因此,固沙初期土壤细颗粒物质的增加不仅保护了已有的碳氮储量,还增加了与沙粒及细沙粒结合的非保护和保护性有机碳氮数量,导致了固沙初期土壤有机碳和全氮在土壤剖面各深度的陡增

期(图2和图3).而土壤中的有机碳包括植物、动物及微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质.有机碳储量是进入土壤的植物残体量以及在土壤微生物作用下分解损失的平衡结果^[41],其储量的大小受气候、植被、土壤属性以及农业经营实践等多种物理因素、生物因素和人为因素的控制,并存在各种因子之间的相互作用^[42].流沙固定过程中,因为土壤质量的提高和环境的改善,有利于土壤微生物和动物的繁衍^[19,23],更是因为植物、动物和微生物的存在,加速了土壤养分循环,增加了土壤有机碳氮的来源.干旱沙区土壤有机碳氮储量在固沙后的明显增加,与其他土地利用方式如农田转变为人工草地以后,以及人工草地向次生天

然草地的演替过程中,土壤表现为明显的碳汇^[39,43]的结果一致。

自然条件下,一定气候区域内植被类型决定着归还土壤的凋落物和根系分泌物的数量和质量及腐殖质的形成与分解的活跃机制,植被类型的差异会导致土壤剖面有机碳和全氮分布格局的差异^[44~46]。人工植被固沙初期,地表粗糙度的增加,大气降尘的沉积,改善了土壤环境条件和养分状况,为大量孢子植物和隐花植物的出现创造了条件。相应地,固沙区枯落物量的增加、根系分泌物和枯死物及地表孢子植物和隐花植物的分泌物、残体等增加了土壤有机碳氮的形成量,提高了固沙区土壤 0~100 cm 深度的土壤碳氮储量。随着固沙植被的演变,地表黏粉粒含量的不断沉积、微生物的发育^[47]胶结大量隐花植物形成了土壤微生物结皮^[22],不仅加速了养分的循环,而且改变了有限降水在土壤剖面的再分配,使得土壤水分分布浅层化^[21],为浅根性的一年生草本植物的入侵创造了条件^[20]。加之该区地下水较深无法为植物利用,导致了深根系的柠条固沙植物种逐渐退出^[19,29]。伴随着固沙植被由深根系植物种向浅根系转变,植物地下部分的生长也浅层化^[48,21],导致地下部分对土壤有机碳氮来源也浅层化。固沙区植被演变适应水分再分配过程的变化三阶段,即人工植被建立 15 a,以人工灌木为主;15~30 a 的自然入侵草本逐渐超过人工灌木的过程;30 a 后是草本为优势的过程^[29]。在该过程中,土壤剖面 0~20 cm 和 20~100 cm 有机碳和全氮储量的增长也发生了阶段性的相应分化。0~100 cm 土层土壤有机碳氮储量有增加趋势但也浅层化,主要集中在 0~20 cm,尤其是 16 a 后深层土壤(20~100 cm)有机碳氮含量无显著的增加趋势(图 1)。与流沙相比,土壤各剖面有机碳和全氮储量增长率在固沙初期(<16 a)和固沙后期(>25 a)发生巨大变化,正是说明了植被的演变对土壤有机碳和全氮储量及分布的影响结果。从生态恢复的角度而言,干旱沙区采取的人工措施会改善环境条件,对整个剖面土壤有机碳和全氮储量产生了重要的影响,浅层土壤(0~20 cm)有机碳和全氮储量表聚性随固沙植被的演变逐步增强。

值得一提的是微生物结皮的繁殖和发育过程对固沙区土壤剖面有机碳氮储量和分布的重要作用。固沙初期,风积物沉积和降水过程中雨滴作用形成的物理结皮,除了大气降尘对土壤物理结皮形成的重要作用外,流沙中 0.01~0.05 mm 的沙粒避免吹蚀也成为结皮形成的物质基础,无机颗粒的团聚

及有机和无机颗粒的团聚,在形成和破碎的交替叠更过程中^[49],结皮对下层土壤的影响也随固沙时间延长而加深。随后,伴随着物理结皮的发育及蓝绿藻的入侵和繁殖,固沙表面养分也逐渐增加,为真菌、细菌和放线菌等发育创造了条件^[22],加速了微生物结皮的发育。沙表面逐渐形成了微生物土壤结皮改变了沙丘表面的温度、水分、养分和稳定性,在固沙 30 a 后发展到以苔藓为优势成分的结皮,固沙 40 a 后形成藻类、苔藓和叶苔等为主的微生物结皮^[20,22]。众所周知微生物结皮不仅能通过光合作用利用大气中的二氧化碳^[50],而且能通过固氮细菌增加土壤氮^[51],沙漠生态系统中固沙表面土壤微生物结皮的固碳和氮作用,为土壤碳氮提供了丰富的来源,增加了土壤碳氮的储量。但是由于微生物结皮在表土层的发育和对养分循环的作用,使得固沙区土壤碳氮储量具有明显的表聚性,加之结皮对有限降水在土壤剖面的再分配,导致了固沙时间越长浅层土壤(0~20 cm)碳氮储量急剧升高,而深层土壤碳氮储量增加较少的格局(图 2、图 3 和表 3)。这可能与固沙区表层土壤微生物结皮长期累积降尘和降水中的细颗粒物质及土壤养分含量的富集相关。

干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳和全氮储量的时间和空间分布特征,强调了固沙过程中形成的微生物结皮对土壤和植被的作用结果,已经对表土层及深层土壤乃至 0~100 cm 土层土壤有机碳和全氮储量形成了重要的影响。虽然人工固沙植被的建立和演变增加了土壤有机碳氮的来源,削弱了沙化过程中土壤和大气碳交换源效应,但该区土壤有机碳和全氮储量的表聚性,有可能会增加该区全球气候变化背景下土壤的碳分解导致的大气源效应从而削弱人工植被建设形成的汇效应。土壤有机碳和全氮储量在时间和垂直分布上的差异,究竟是土壤有机碳氮来源在时间和空间分布差异还是表层土壤有机碳氮深层迁移和淋溶导致的结果还有待于进一步研究。

4 结论

(1)干旱沙区人工固沙植被演变过程中,土壤有机碳和全氮储量均呈增加趋势,但在不同的阶段渐增程度不一;固沙初期 0~20 cm 土壤有机碳储量是一个明显的渐增过程,随后有一个缓慢增长积累期,固沙后期又是一个显著的渐增过程。

(2)干旱沙区人工固沙植被演变过程中,土壤有机碳氮储量增加程度随深度增加有降低趋势,并

且表层土壤(0~20 cm)有机碳和全氮储量远大于深层土壤(20~100 cm);固沙初期土壤有机碳和全氮储量的增加体现在0~100 cm各个深度,而随后积累期主要体现在0~20 cm深度,20 cm以下增加不明显;0~100 cm剖面土壤有机碳氮储量表聚性随固沙植被演变越明显。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H. An overview of the carbon cycle[A]. In: Lal R, Kimble J, Levin E, *et al.*, (eds.). Soils and global change [M]. Boca Raton: CRC Press, 1995. 9-26.
- [2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. Nature, 1990, **348** (6298): 232-234.
- [3] Kimble L R J, Stewart B A. World soils as a source or sink for radiatively-active gases[A]. In: Lal R, Kimble J, Levin E, *et al.*, (eds.). Soils and global change[M]. Boca Raton: CRC Press, 1995. 1-7.
- [4] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 1997, **94**(16): 8284-8291.
- [5] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. Nature, 1991, **351**(6324): 304-306.
- [6] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change[J]. Science, 1996, **272**(5260): 393-396.
- [7] Lal R. Carbon sequestration in drylands[J]. Annals of Arid Zone, 2000, **39**(1): 1-10.
- [8] Pan G, Guo T. Pedogenic Carbonate of aridic soil in China and its significance in carbon sequestration in terrestrial systems[A]. In: Kimble J M, Eswaran H, Stewart B A, (eds.). Global climate change and pedogenic carbonates[M]. London: LEWIS Publishers, 2000. 135-147.
- [9] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cuninghame G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification [J]. Science, 1990, **47**(4946): 1043-1028.
- [10] Squires V R. Dryland soils: their potential as a sink for carbon and as an agent in mitigating climate change[J]. Advances in Geocology, 1998, **32**: 209-215.
- [11] Batjes N H. Options for increasing carbon sequestration in West African soils: an exploratory study with special focus on Senegal [J]. Land Degradation & Development, 2001, **12**(2): 131-142.
- [12] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2387-2393.
- [13] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. 地球科学进展, 2003, **18** (4): 609-618.
- [14] 程淑兰, 欧阳华, 牛海山, 等. 荒漠化重建地区土壤有机碳时空动态特征——以陕西省榆林市为例[J]. 地理学报, 2004, **59**(4): 505-513.
- [15] 吕妍, 宁虎森, 王让会, 等. 人工防护林碳储量估算——以新疆墨玉为例[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(7): 27-30.
- [16] Zhou G Y, Liu S G, Li Z, *et al.* Old-growth forests can accumulate carbon in soil[J]. Science, 2006, **314**(5804): 14-17.
- [17] Zhou G Y, Zhou C Y, Liu S G, *et al.* Belowground carbon balance and carbon accumulation rate in the successional series of monsoon evergreen broad-leaved forest [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, **49**(3): 311-321.
- [18] 欧阳学军, 周国逸, 魏识广, 等. 南亚热带森林植被恢复演替序列的土壤有机碳氮矿化[J]. 应用生态学报, 2007, **18** (8): 1688-1694.
- [19] 李新荣, 石庆辉, 张景光, 等. 沙坡头地区人工植被演变过程中植物多样性变化的研究[J]. 中国沙漠, 1998, **18** (supp. 4): 23-29.
- [20] Li X R, Wang X P, Li T, *et al.* Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(3): 147-154.
- [21] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, *et al.* Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, **57**(1): 1-16.
- [22] Li X R, Chen Y W, Yang L W. Cryptogam diversity and formation of soil crusts in temperate desert[J]. Annals of Arid Zone, 2004, **43**(3-4): 335-353.
- [23] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, *et al.* Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, Northern China[J]. Restoration Ecology, 2004, **12**(3): 376-390.
- [24] 石庆辉. 腾格里沙漠东南缘沙坡头地区地段铁路北侧人工植被演替动态[A]. 见: 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站年年报[C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991-1992. 89-107.
- [25] 石庆辉, 刘家琼. 沙坡头铁路两侧人工植被区天然植被动态[A]. 见: 沙漠生态系统研究[C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 105-115.
- [26] 于永江, 林庆功, 石庆辉, 等. 包兰铁路沙坡头段人工植被区生境与植被变化研究[J]. 生态学报, 2002, **22**(3): 433-439.
- [27] 张继贤, 邸醒民, 王淑湘. 沙坡头地区防护体系建立过程中生态环境变化的特点[J]. 干旱区资源与环境, 1994, **8**(3): 68-79.
- [28] 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 沙漠流沙固定过程中土壤肥力演变[J]. 中国沙漠, 1998, **16**(supp. 1): 64-69.
- [29] 肖洪浪, 李新荣, 宋耀选, 等. 土壤-植被系统演变对生物防沙工程的影响[J]. 林业科学, 2004, **40**(1): 24-30.
- [30] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 等. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(4): 46-50.
- [31] 贾晓红, 李新荣, 陈应武, 等. 植被恢复对旱区表土颗粒中有机碳和氮分布的影响[J]. 中国环境科学, 2006, **26** (5): 560-564.

- [32] 李金贵. 沙坡头地区气候特征[A]. 见: 流沙治理研究(二)[C]. 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 417-424.
- [33] 王康富. 沙坡头地区流沙固定的研究[A]. 见: 流沙治理研究(二)[C]. 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 13-26.
- [34] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [35] Veldkamp E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(1): 175-180.
- [36] Marticorena B, Bergametti G, Gillette D, *et al.* Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(19): 23277-23287.
- [37] Murdock L W, Frye W W. Erosion: its effect on soil properties, productivity and profit[M]. Publication AGR-102. Kentucky: University of Kentucky College of Agriculture. 1983.
- [38] 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.
- [39] Kern J S, Turner D P, Dodson R F. Spatial patterns of soil organic carbon pool size in the Northwestern United States[A]. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* (eds.). *Soil processes and the carbon cycle*[M]. Boca raton: CRC Press, 1997. 29-44.
- [40] Wezel A, Rajot J L, Herbring C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, **44**(4): 383-398.
- [41] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较[J]. *北京林业大学学报*, 2006, **28**(5): 1-6.
- [42] 刘姝媛, 刘月秀, 叶金盛, 等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(8): 1981-1985.
- [43] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2007, **27**(6): 2279-2287.
- [44] 谢宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(5): 687-699.
- [45] 陈步峰, 潘永军, 史欣, 等. 广州市典型森林土壤有机碳密度及储量生态特征[J]. *东北林业大学学报*, 2010, **38**(4): 59-65.
- [46] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 黄土高原森林草原区土壤有机碳库研究[J]. *草业科学*, 2010, **27**(2): 18-23.
- [47] 邵玉琴, 赵吉, 包青海, 等. 沙坡头固定沙丘结皮层的微生物区系动态[J]. *中国沙漠*, 2002, **22**(3): 298-303.
- [48] 张志山, 樊恒文, 赵金龙, 等. 沙漠人工植物群落的根系分布及动态[J]. *中国沙漠*, 2006, **26**(4): 637-643.
- [49] Duan Z H, Wang G, Xiao H L, *et al.* Abiotic soil crust formation on dunes in an extremely arid environment: A 43-year sequential study[J]. *Arid Land Research and Management*, 2003, **17**(1): 43-54.
- [50] Beymer R J, Klopatek J M. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1991, **5**(3): 187-198.
- [51] Belnap J, Harper K T, Warren S D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: nitrogenase activity, chlorophyll content, and chlorophyll degradation[J]. *Arid soil Research and Rehabilitation*, 1994, **8**(1): 1-8.

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

国内外公开发行人