

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评估 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究

胡宁^{1,2}, 马志敏^{1,3}, 蓝家程⁴, 伍宇春¹, 陈高起¹, 傅瓦利^{1*}, 文志林¹, 王文净²

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 河南省新乡市地震局, 新乡 453000; 3. 河南省新乡市第一中学, 新乡 453000; 4. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院, 贵阳 550001)

摘要: 为阐明岩溶石漠化区植被恢复对土壤氮素积累与供应的影响, 分析了土壤各级团聚体不同形态氮库分配特征以及团聚体氮库与土壤氮素矿化之间的关系. 结果表明: ①各样地土壤团聚体全氮、轻组氮、碱解氮、矿质氮含量基本上随团聚体粒径减小而升高, 峰值出现在 <0.25 mm 粒径. 除矿质氮外, 各种氮形态在不同样地之间, 总体上表现为弃耕地 < 草地 < 灌丛地 < 灌乔林地 < 乔木林地、人工金银花地 < 人工林地. ②各粒径团聚体有机氮库容量受团聚体粒径质量分数控制, 其中 5~10 mm、2~5 mm 粒径团聚体有机氮库容量较大, 土壤氮主要贮存于大团聚体中, 大团聚体对土壤碳、氮的贮存有重要意义. ③团聚体全氮贮量中, 0.25~1 mm、5~10 mm、2~5 mm 粒径对土壤净氮矿化量贡献大, 其它粒径贡献较小. 随植被恢复进程, 土壤中 >5 mm 粒径团聚体质量分数逐渐提高, 大团聚体氮贮量相应提高, 在增强土壤供氮能力的同时, 加强了对有机氮的贮存与保护.

关键词: 植被恢复; 岩溶石漠化; 土壤团聚体; 土壤有机氮; 土壤氮矿化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3411-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.037

Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification

HU Ning^{1,2}, MA Zhi-min^{1,3}, LAN Jia-cheng⁴, WU Yu-chun¹, CHEN Gao-qi¹, FU Wa-li^{1*}, WEN Zhi-lin¹, WANG Wen-jing²

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest China University, Chongqing 400715, China; 2. Seismological Bureau of Xinxiang, Xinxiang 453000, China; 3. The First Middle School of Xinxiang, Xinxiang 453000, China; 4. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to illuminate the impact on soil nitrogen accumulation and supply in karst rocky desertification area, the distribution characteristics of soil nitrogen pool for each class of soil aggregates and the relationship between aggregates nitrogen pool and soil nitrogen mineralization were analyzed in this study. The results showed that the content of total nitrogen, light fraction nitrogen, available nitrogen and mineral nitrogen in soil aggregates had an increasing tendency along with the descending of aggregate-size, and the highest content was occurred in <0.25 mm. The content of nitrogen fractions for all aggregate-classes followed in the order of abandoned land < grass land < brush land < brush-arbor land < arbor land in different sample plots. Artificial forest lands had more effects on the improvement of the soil nitrogen than honeysuckle land. In this study it also showed the nitrogen stockpiling quantity of each aggregate-size class was differed in all aggregate-size classes, in which the content of nitrogen fraction in 5-10 mm and 2-5 mm classes of soil aggregate-size were the highest. And it meant that soil nutrient mainly was stored in large size aggregates. Large size aggregates were significant to the storage of soil nutrient. For each class of soil aggregate-size, the contribution of the nitrogen stockpiling quantity of 0.25-1 mm class to soil net nitrogen mineralization quantity was the biggest, and following >5mm and 2-5 mm classes, and the others were the smallest. With the positive vegetation succession, the weight percentage of >5 mm aggregate-size classes was improved and the nitrogen storage of macro-aggregates also was increased. Accordingly, the capacity of soil supply mineral nitrogen and storage organic nitrogen were intensified.

Key words: vegetation restoration; rocky desertification; soil aggregates; soil organic nitrogen; soil nitrogen mineralization

土壤团聚体是矿物颗粒和有机物质结合形成的不同尺度的多孔结构单元, 是土壤结构形成的基础, 是土壤养分的贮存库和微生物的生存环境^[1]. 不同粒径团聚体中养分含量对于土壤养分循环、团聚体的形成和破坏以及土壤肥力的保持具有重要意义

收稿日期: 2014-12-18; 修订日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192, 41202135); 重庆市院士专项(cstc2013jcjys2001); 岩溶动力学重点实验室开放课题项目(KDL2011-04)

作者简介: 胡宁(1983~)男, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶环境与地质生态, E-mail: qingh@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fuwali@swu.edu.cn

义^[2]. 土壤氮素是植物生长必需的第一位大量营养元素,主要以有机氮形式存在,必须经过矿化作用形成矿质氮才能植物吸收利用. 不同粒径团聚体在有机氮的保持、转化及供应能力等方面发挥着不同的作用,土壤团聚体及其适宜的组合是土壤氮库的物质基础. 研究表明,在植被次生演替初期,生态系统往往表现为氮的限制性循环^[3],因此,阐明植被恢复对土壤各级团聚体不同形态氮库分配特征的影响以及团聚体氮库与土壤氮素矿化之间的关系显得尤为重要. 近年来,人们对不同施肥方式、土壤类型、土地利用方式、土地保护措施^[4-9]等对土壤团聚体有机碳、氮库特征的影响做了较多研究. 然而,在广大的西南岩溶脆弱生态区有关植被恢复过程中,土壤团聚体氮库分配特征以及团聚体氮库与土壤氮素矿化之间关系的研究较少. 为阐明岩溶石漠化区植被恢复对土壤氮素积累与供应的影响,本文拟对研究区不同植被恢复模式下,土壤不同粒径团聚体中总氮、碱解氮、轻组氮、铵态氮、硝态氮的分布特征以及团聚体氮库与氮素矿化之间关系进行分析,通过深入认识岩溶石漠化区生态环境恢复重建过程中土壤氮素的积累与供应特征,以期对土壤氮素的管理与调控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区中梁山与南川区南平镇石庆村,属于中亚热带湿润季风气候,年均温度 16~18℃,年均降水量 1 200~1 300 mm. 主要地貌

类型为岩溶槽谷,海拔 600~800 m. 出露地层主要为三叠系飞仙关组浅灰至深灰色中薄层灰岩、泥灰岩、白云质灰岩及紫褐色泥岩、页岩及嘉陵江组浅灰色中薄层灰岩. 土壤主要为发育在灰岩母质上的石灰土和发育在紫褐色泥岩、页岩母质上的紫色土. 在碳酸盐岩分布区岩石裸露明显,土壤侵蚀严重,植被覆盖率低,为轻度至中度石漠化地区. 石庆村研究区是“重庆地区岩溶山地退化生态系统恢复与重建技术开发”示范区,植被恢复模式主要以人工恢复为主,而中梁山研究区主要以自然恢复为主.

1.2 样品采集与处理

本研究所取土样均为发育在灰岩母质上的黄色石灰土. 其中在中梁山研究区依次选取弃耕地、草地、灌丛地、灌乔林地、乔木林地,除灌乔林地设置 3 个重复样地外,其余样地均为 2 个;在石庆村研究区依据主要植被恢复模式选取金银花地(5~6 a)2 个、人工樟树林地与人工柳杉林地(10~11 a)各 1 个,共计 15 个样地为研究对象. 每一样地依据其面积大小分别采集 3~5 个表层(0~10 cm)土壤样品,组成混合土样. 土壤团聚体样品放入取样盒,尽量减少挤压以保持原状土壤结构. 在室内风至土壤塑限时沿自然结构面掰成 10 mm 大小,剔除石块及植物残体等,并混合均匀继续风干. 团聚体分级采用干筛法^[10],分离出 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 和 <0.25 mm,共 5 个粒级组. 分离出的团聚体采用四分法研磨过筛备用.

各样地基本情况见表 1.

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of different sample plots

样地名称	编号	海拔 /m	坡度 /($^{\circ}$)	容重 / $g \cdot cm^{-3}$	pH	黏粒/%	全磷 / $mg \cdot g^{-1}$	速效磷 / $mg \cdot kg^{-1}$	全钙 / $mg \cdot g^{-1}$	全铁 / $mg \cdot g^{-1}$	全铝 / $mg \cdot g^{-1}$
弃耕地	I	650	5	1.15	5.66	32.22	0.87	30.98	3.01	57.92	112.29
	II	730	5	1.19	4.58	31.86	1.02	44.70	2.13	46.75	94.14
草地	I	650	11	1.15	5.28	35.45	0.56	5.99	3.72	61.74	113.52
	II	658	6	1.27	5.01	30.14	0.88	20.94	2.47	44.86	86.92
灌丛地	I	650	10	1.21	5.29	45.60	0.53	4.12	4.26	74.73	130.75
	II	660	15	1.28	5.79	36.25	0.38	2.80	5.08	57.09	114.42
灌乔林地	I	660	22	1.25	5.74	34.16	0.49	1.86	3.94	57.07	109.26
	II	665	15	1.16	6.09	40.65	0.58	2.74	5.33	61.44	114.62
	III	650	20	1.12	6.85	34.27	0.47	2.79	6.88	72.16	122.78
乔木林地	I	655	12	1.13	5.38	38.96	0.40	3.12	4.46	58.86	114.31
	II	670	30	1.16	6.15	32.27	0.36	2.40	4.61	40.30	84.61
金银花地	I	730	13	1.17	5.32	30.80	0.96	31.59	2.74	55.23	92.71
	II	705	5	1.22	4.65	34.95	1.17	46.84	2.28	52.05	99.57
人工林地	樟树	728	16	1.16	4.95	37.29	0.83	15.75	3.02	61.22	114.10
	柳杉	707	5	1.21	5.17	28.59	0.72	13.53	3.45	49.79	98.22

土壤氮素矿化速率采用野外原位 PVC 管阴离子交换树脂芯法^[11,12]测定,分别于 2013 年 1 月、2013 年 4 月、2013 年 7 月、2013 年 10 月测定,每次原位培养 28 d,本研究分析过程采用的矿化速率数据为 4 次测定的平均值,有关矿化速率的数据另文讨论。

1.3 分析方法

有机碳采用重铬酸钾外热法测定;全氮采用凯式定氮法测定;碱解氮采用扩散法测定;铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;硝态氮采用紫外分光光度法测定;轻组有机质采用溴化锌($1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)重液分离,测定重组土壤全氮,用差值法计算得出轻组有机氮^[10,13]。

1.4 计算与数据处理

$$\text{平均重量直径 (MWD)} = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

式中, X_i 、 W_i 分别表示某一粒级平均直径与该粒级团聚体的质量分数。

矿质氮总量 = 铵态氮含量 + 硝态氮含量;团聚体氮贮量 = 某粒级团聚体氮含量 × 相应粒级质量分数;团聚体氮对土壤氮贡献率 = 团聚体氮贮量/全土氮含量 × 100%

氮素矿化速率 = (培养后土壤铵态氮含量 + 土壤硝态氮含量 + 树脂硝态氮含量 - 培养前矿质氮总量)/培养时间

文中实验数据采用 EXCEL、SPSS 16.0 软件进行统计分析处理。

2 结果与分析

2.1 植被恢复对土壤团聚体粒径分布的影响

土壤团聚体粒径分布影响土壤内部物质、能量的循环与转化,是土壤肥力的重要影响因素之一。由表 2 可看出,各样地之间表层土壤(0~10 cm)团聚体含量分布呈现出较一致的规律性,主要以 5~10 mm 与 2~5 mm 粒径团聚体为主,其次为 0.25~1 mm 与 1~2 mm 粒径, <0.25 mm 粒径质量分数最低。与弃耕地(1 a)相比,植被自然恢复能明显提高土壤大团聚体比例,各样地 5~10 mm 粒径团聚体质量分数平均值为弃耕地(39.3%) < 草地(52.2%) < 乔木林地(55.6%) < 灌乔林地(58.9%) < 灌丛地(66.3%)。2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 粒径团聚体质量分数基本上表现出灌丛地 < 灌乔林地 < 乔木林地 < 草地 < 弃耕地。而 <0.25 mm 粒径表现为乔木林地 < 灌乔林地 < 灌丛地 < 弃耕地 < 草地。方差分析表明,植被自然恢复各样地 5~10 mm、2~5 mm 粒径团聚体质量分数与弃耕地之间差异均达到显著水平($P < 0.05$),而 <0.25 mm 粒径差异不显著。此外,团聚体平均重量直径也表现为弃耕地(4.39) < 草地(5.12) < 乔木林地(5.27) < 灌乔林地(5.43) < 灌丛地(5.79)。因此,植被恢复能显著增加大粒径团聚体比例,减少小粒径团聚体比例,并改善土壤结构。

与植被自然恢复相比,人工植被恢复对土壤各

表 2 各样地土壤各级团聚体质量分数

Table 2 Percentage of mass of different aggregate-size classes in sample soils

样地		团聚体质量分数/%					平均重量直径/mm
		5~10 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm	
弃耕地	I	36.14	34.38	10.57	16.33	2.58	4.18
	II	42.48	34.92	8.18	11.31	3.11	4.61
草地	I	55.93	29.16	5.81	6.89	2.21	5.35
	II	48.55	30.67	8.13	8.93	3.73	4.90
灌丛地	I	68.21	18.93	4.08	6.57	2.22	5.88
	II	64.48	21.35	4.60	7.18	2.39	5.70
灌乔林地	I	59.97	26.28	4.81	6.88	2.07	5.54
	II	64.40	21.53	4.49	7.20	2.38	5.70
	III	52.25	27.35	6.96	11.33	2.09	5.05
乔木林地	I	52.89	27.92	6.63	10.41	2.14	5.11
	II	58.32	26.75	5.08	7.75	2.10	5.44
金银花地	I	39.97	33.80	9.29	13.31	3.63	4.41
	II	35.46	31.15	12.28	16.25	4.86	4.04
人工林地	樟树	34.90	38.73	10.44	13.72	2.21	4.22
	柳杉	38.58	37.69	9.23	11.51	2.98	4.43

粒径团聚体质量分数的影响不明显. 各粒径团聚体比例与弃耕地(1 a)相当,表明金银花、人工樟树林与柳杉林(6~11 a)在短期内不能明显影响土壤团聚体粒径分布规律.

2.2 植被恢复对土壤团聚体氮库分布特征影响

2.2.1 全氮及碱解氮

从图1、2可以看出,团聚体全氮含量在各样地之间存在差异,与弃耕地相比,各植被恢复模式均能不同程度提高团聚体全氮含量. 在植被自然恢复模式下,各粒径团聚体全氮含量基本上表现为弃耕地 < 草地 < 灌丛地 < 灌乔林地 < 乔木林地. 灌丛地、灌乔林地、乔木林地各粒径团聚体全氮含量均显著高于弃耕地($P < 0.05$),草地

各粒径全氮含量与弃耕地之间差异不显著,而乔木林地各粒径全氮含量均显著高于其它样地. 其中, <0.25 mm 粒径团聚体含量在不同样地间的差异最大($F = 29.3, P < 0.001$),与弃耕地相比,草地、灌丛地、灌乔林地、乔木林地 <0.25 mm 团聚体全氮分别提高 11%、48%、53%、86%. 团聚体碱解氮含量的变化趋势与全氮相似,与弃耕地相比,草地、灌丛地、灌乔林地、乔木林地 <0.25 mm 团聚体碱解氮分别平均增加了 6%、58%、85%、115%. 人工植被恢复样地中,除人工林地 5~10 mm 粒径与弃耕地之间差异显著外,其它粒径以及金银花地各粒径与弃耕地之间差异均不明显.

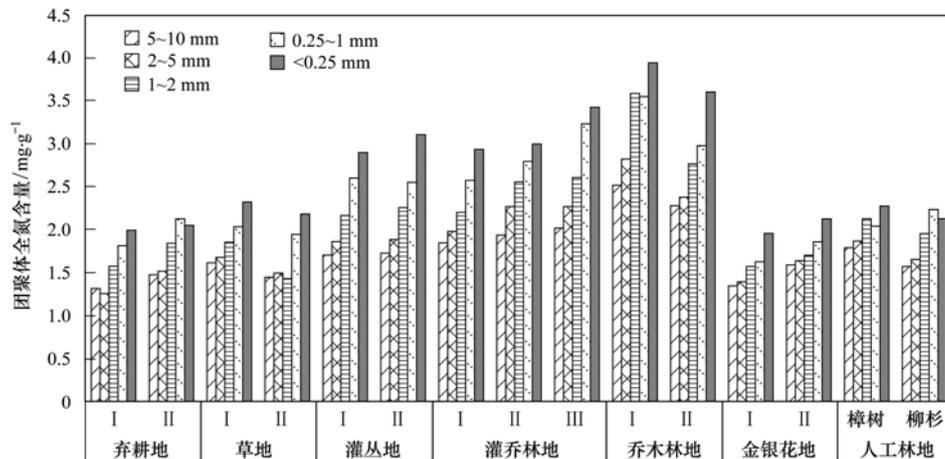


图1 各粒径团聚体全氮含量分布

Fig. 1 Distribution of nitrogen content in different aggregate-size classes

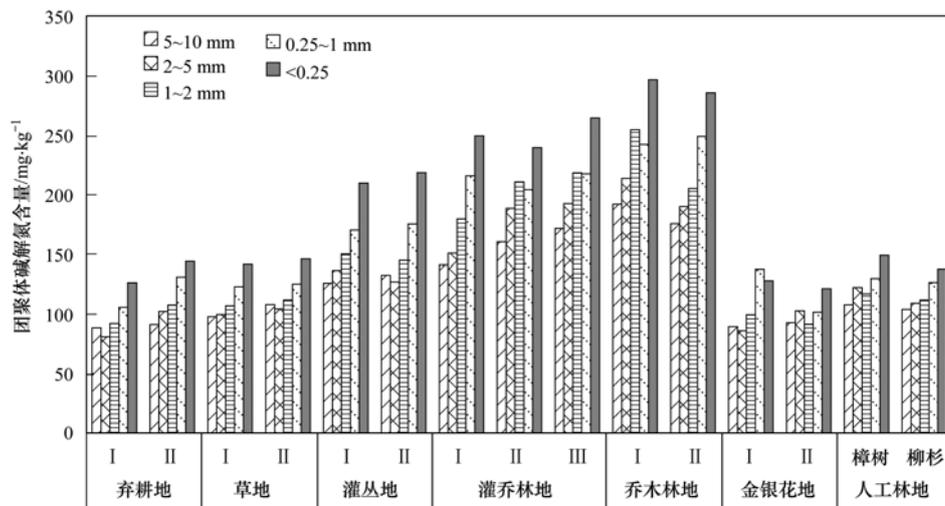


图2 各粒径团聚体碱解氮含量分布

Fig. 2 Distribution of available nitrogen content in different aggregate-size classes

总体上,各粒径团聚体全氮与碱解氮含量表现随团聚体粒径减小而增大的变化趋势,含量峰值

基本上出现在 <0.25 mm 粒径,与全氮分布规律相似. 弃耕地、乔木林地、人工林地 <0.25 mm 粒径

全氮含量显著高于 5~10 mm、2~5 mm 粒径, 草地、灌乔林地、金银花地 <0.25 mm 粒径显著高于 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm 粒径, 灌丛地 <0.25 mm 粒径显著高于其它粒径。碱解氮则表现为弃耕地、乔木林地 <0.25 mm 粒径显著高于 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm, 草地、灌丛地、灌乔林地、人工林地 <0.25 mm 粒径显著高于其它粒径 ($P < 0.05$)。

2.2.2 轻组氮

从图 3 可以看出, 团聚体轻组氮在各样地间存在差异, 植被恢复能不同程度提高各粒径团聚体轻组氮含量, 且总体上表现出随植被恢复进程而提高。其中, 灌丛地、灌乔林地、乔木林地各粒径轻组氮含量除 0.25~1 mm 之外, 均显著高于弃耕地; 草地 2~5 mm、<0.25 mm 粒径与弃耕地之间差异显著; 且乔木林地各粒径轻组氮含量均显著高于除灌乔林地之外的其它样地 ($P < 0.05$)。与弃耕地相比, 草

地、灌丛地、灌乔林地、乔木林地 <0.25 mm 轻组氮含量分别提高 52%、103%、202%、225%。人工植被恢复样地中, 人工林地 2~5 mm、1~2 mm、<0.25 mm 粒径含量显著高于弃耕地, 其它粒径以及金银花地各粒径与弃耕地之间不存在显著差异。人工林地对土壤团聚体轻组氮的改善作用大于金银花地。

轻组氮含量在各粒径团聚体之间分布特征明显不同, 总体上表现出随团聚体粒径减小而增大, 峰值基本上出现在 <0.25 mm 粒径。在不同样地之间, 弃耕地土壤轻组氮含量在各粒径团聚体之间的差异较小, 含量高低值之间绝对差量为 $0.095 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随着植被恢复时间的延长, 土壤轻组氮含量逐步提高, 团聚体轻组氮含量在各粒径间的绝对差异增大, 其中乔木林地高低值之间绝对差量为 $0.267 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。方差分析表明, 各样地 <0.25 mm 粒径轻组氮含量均显著高于 5~10 mm、2~5 mm 粒径 ($P < 0.05$)。

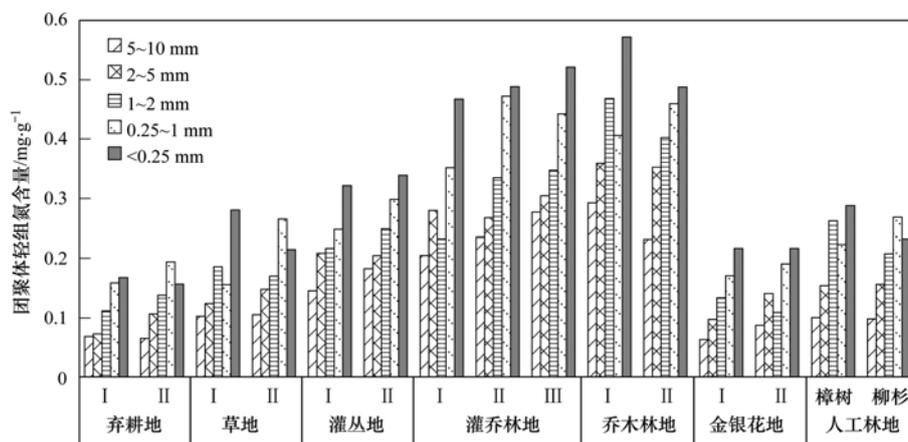


图 3 团聚体轻组氮含量分布

Fig. 3 Distribution of light fraction nitrogen content in different aggregate-size classes

2.2.3 矿质氮

铵态氮与硝态氮是土壤矿质氮的主体, 在自然土壤中主要来自土壤有机氮的矿化。从图 4~6 可以看出团聚体铵态氮、硝态氮、总矿质氮含量在不同样地间存在差异, 各粒径团聚体铵态氮基本上表现出弃耕地~草地 < 灌乔林地 < 灌丛地 < 乔木林地, 硝态氮基本上表现出, 草地 < 弃耕地 < 乔木林地 < 灌丛地 < 灌乔林地, 而总矿质氮含量除草地外, 表现出随植被恢复进程而提高的变化趋势。其中, 乔木林地各粒径团聚体铵态氮含量均显著高于其它样地, 灌丛地、灌乔林地 <0.25 mm 粒径显著高于弃耕地; 人工植被恢复样地各粒径团聚体铵态氮与弃耕地之间差异不显著。硝态氮表现为, 灌乔林地各

粒径硝态氮含量显著高于弃耕地, 其它样地与弃耕地之间差异不显著; 人工植被恢复样地与弃耕地之间差异也不显著。而矿质氮总量则表现为, 灌丛地、灌乔林地、乔木林地各粒径均显著高于弃耕地, 而乔木林地 5~10 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 粒径显著高于其它各样地 ($P < 0.05$)。与弃耕地相比, 灌丛地、灌乔林地、乔木林地 <0.25 mm 粒径矿质氮含量分别提高 65%、64%、95%。金银花地团聚体矿质氮含量与弃耕地相当, 人工林地矿质氮含量高于弃耕地, 但差异不显著。

同时, 铵态氮、硝态氮、总矿质氮含量在不同粒径间分布规律相似, 总体上表现出随团聚体粒径减小而增大, 含量峰值基本上出现在 <0.25 mm 粒

径. 其中,弃耕地、灌乔林地、乔木林地、金银花地 <0.25 mm 粒径铵态氮含量显著高于其它粒径,草地、灌丛地 <0.25 mm 铵态氮含量显著高于 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm. 硝态氮表现为,草地、灌乔林地 <0.25 mm 粒径显著高于 5~10 mm、2~5 mm 粒径,灌丛地、乔木林地 <0.25 mm 粒径硝态氮

含量显著高于 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm. 总矿质氮表现为,草地、灌丛地 <0.25 mm 粒径显著高于 5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm,人工林地 <0.25 mm 粒径显著高于 5~10 mm、2~5 mm,弃耕地、灌乔林地、乔木林地、金银花地 <0.25 mm 粒径总矿质氮含量显著高于其它粒径($P < 0.05$).

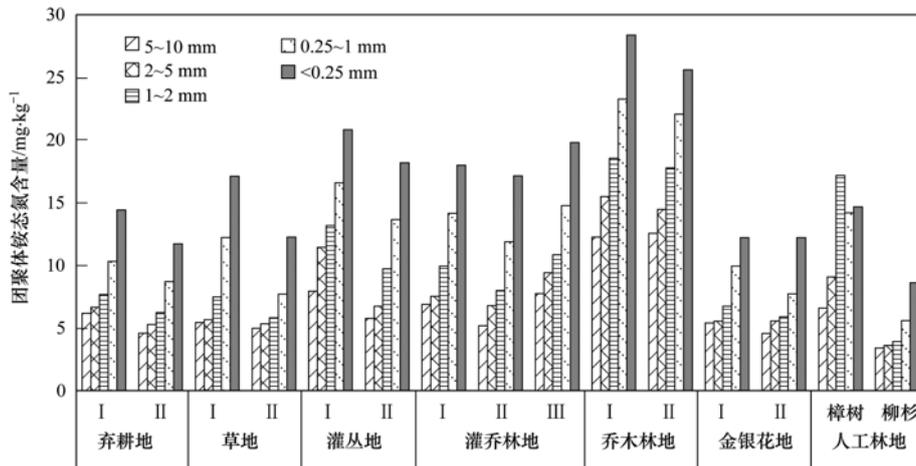


图 4 团聚体铵态氮含量分布

Fig. 4 Distribution of ammonium nitrogen content in different aggregate-size classes

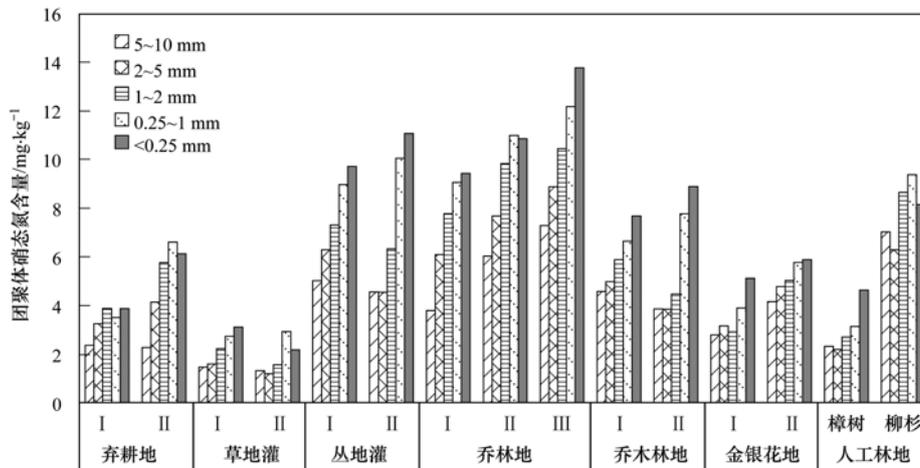


图 5 团聚体硝态氮含量分布

Fig. 5 Distribution of nitrate nitrogen content in different aggregate-size classes

2.3 各粒径团聚体氮对土壤氮贡献分析

从表 3 可以看出,各粒径团聚体对土壤全氮、碱解氮、轻组氮、总矿质氮含量的贡献率变化趋势基本一致,随粒径减小而降低,与团聚体质量分数的变化趋势相似.但在不同样地中,团聚体养分贡献率变化不尽相同.在植被自然恢复样地中,5~10 mm 粒径团聚体对土壤氮贡献率有从弃耕地、草地到灌丛地依次上升,而从灌丛地、灌乔林地到乔木林地又依次降低的趋势.2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 粒径团聚体对土壤氮贡献率有从弃耕地、

草地到灌丛地依次降低,而从灌丛地、灌乔林地到乔木林地依次上升的趋势,变化趋势与 5~10 mm 粒径相反.<0.25 mm 粒径组团聚体对土壤氮贡献率在不同样地之间没有明显的规律.各粒径团聚体对土壤氮贡献的变化趋势与团聚体质量分数的变化趋势相似,主要受团聚体质量分数控制.人工植被恢复模式下,土壤各粒径团聚体对土壤氮贡献率的变化特征与弃耕地相似,其贡献率的大小也主要受团聚体质量分数控制.表明在短期内人工植被恢复不能明显改变土壤团聚体的粒径组成特征,从而不

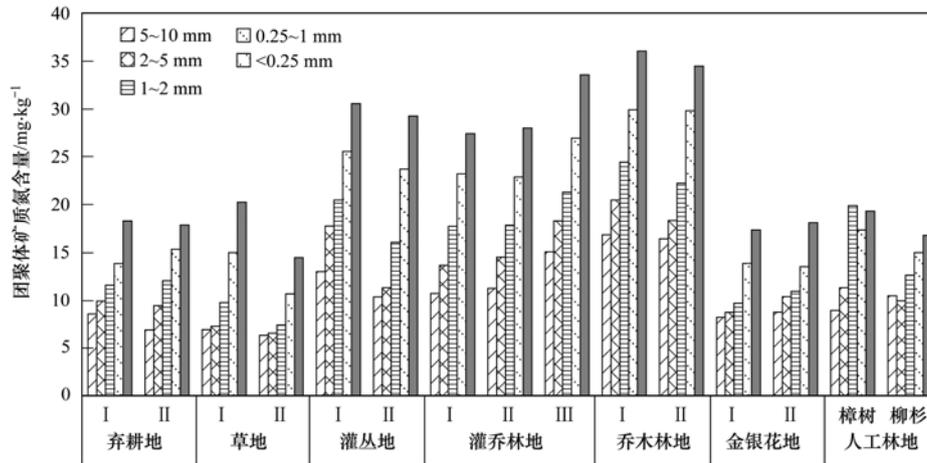


图 6 团聚体总矿质氮含量分布

Fig. 6 Distribution of total mineral nitrogen content in different aggregate-size classes

表 3 各样地土壤各级团聚体养分贡献率/%

Table 3 Contributing rates of different aggregate-size classes in soil fertility/%

样地	指标	团聚体氮贡献率				
		5 ~ 10 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.25 ~ 1 mm	< 0.25 mm
弃耕地	全氮	36.2	31.6	10.5	17.8	3.8
	碱解氮	36.7	32.9	9.7	16.8	4.0
	轻组氮	27.1	31.7	11.9	24.6	4.7
	矿质氮	30.2	33.7	11.0	19.9	5.2
草地	全氮	49.6	29.4	7.0	9.8	4.2
	碱解氮	50.7	28.8	7.2	9.2	4.0
	轻组氮	41.8	30.9	9.3	12.7	5.4
	矿质氮	45.5	27.2	7.7	13.0	6.5
灌丛地	全氮	61.3	20.3	5.2	9.5	3.7
	碱解氮	63.3	19.6	4.7	8.8	3.6
	轻组氮	58.2	22.3	5.4	10.0	4.1
	矿质氮	56.0	20.8	5.7	12.4	5.1
灌乔林地	全氮	53.7	25.5	6.2	11.5	3.2
	碱解氮	54.2	25.8	6.4	10.4	3.2
	轻组氮	51.1	26.1	6.0	12.9	3.9
	矿质氮	48.8	26.1	6.9	13.8	4.4
乔木林地	全氮	51.3	27.2	7.1	11.3	3.1
	碱解氮	51.3	27.7	6.8	11.1	3.1
	轻组氮	45.6	30.6	8.0	12.2	3.5
	矿质氮	47.8	27.3	7.1	13.9	3.9
金银花地	全氮	35.4	31.4	11.2	16.4	5.5
	碱解氮	35.1	31.2	10.5	17.8	5.4
	轻组氮	24.6	33.1	11.3	23.1	7.9
	矿质氮	31.5	30.4	10.9	19.8	7.4
人工林地	全氮	33.9	37.1	11.1	14.8	3.2
	碱解氮	34.1	38.7	9.8	14.1	3.3
	轻组氮	23.4	37.9	14.8	19.6	4.2
	矿质氮	30.7	34.4	13.6	17.3	4.0

能明显改变各级团聚体氮贮量状况。

2.4 各级团聚体氮与土壤氮素矿化速率关系

土壤中的氮素主要以有机氮形式存在, 必须

经过矿化作用形成矿质氮才能被植物吸收利用。

不同粒级团聚体在有机氮的保持、转化及供应能力等方面发挥着不同的作用, 对土壤各粒级团聚

体氮含量、贮量与土壤氮素净矿化速率之间进行相关分析(表4),结果表明,土壤净氮矿化速率与各粒径团聚体全氮、轻组氮含量之间均呈极显著正相关关系.从各级团聚体氮贮量来看,净氮矿化速率与5~10 mm 粒径团聚体全氮贮量之间呈极显著正相关关系,与2~5 mm、0.25~1 mm 粒径

之间呈显著正相关关系,而与1~2 mm、<0.25 mm 粒径组之间相关性不明显.各粒径组轻组氮贮量与净氮矿化速率之间的相关性要优于全氮贮量,净氮矿化速率除与1~2 mm 粒径之间呈显著相关外,与其他粒径组之间的相关关系均达到极显著水平.

表4 团聚体氮与土壤氮素矿化速率相关分析¹⁾

Table 4 Relationship between contents of aggregate nitrogen and soil nitrogen mineralization rate

指标	氮净矿化速率相关系数				
	5~10 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm
全氮含量	0.91 **	0.91 **	0.93 **	0.90 **	0.89 **
轻组氮含量	0.89 **	0.90 **	0.89 **	0.84 **	0.87 **
全氮储量	0.74 **	0.59 *	0.33	0.54 *	0.31
轻组氮储量	0.81 **	0.88 **	0.64 *	0.75 **	0.69 **

1) **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$, $n = 15$

为进一步明确各粒径团聚体氮对土壤氮素矿化直接作用的大小及途径,对各粒径团聚体氮贮量与氮素矿化速率之间进行途径分析.由表5可以看出,各粒径团聚体全氮贮量对土壤氮素矿化速率的直接作

用大小为,0.25~1 mm 粒径最大,其次为5~10 mm 与2~5 mm 粒径团聚体,1~2 mm 与<0.25 mm 粒径最小.表明土壤氮素净矿化量主要来自0.25~1 mm、5~10 mm、2~5 mm 粒径有机氮贮量部分.

表5 团聚体全氮贮量与土壤氮素矿化速率途径分析¹⁾

Table 5 Path analysis of stockpiling quantity of total organic nitrogen in different aggregate-size classes and soil nitrogen mineralization rate

指标	途径系数				
	$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	$x_5 \rightarrow y$
$x_1 \rightarrow$	0.59	0.06	0.13	-0.06	0.01
$x_2 \rightarrow$	0.09	0.39	-0.38	0.48	0.01
$x_3 \rightarrow$	-0.16	0.31	-0.48	0.64	0.02
$x_4 \rightarrow$	-0.05	0.26	-0.43	0.73	0.03
$x_5 \rightarrow$	0.09	0.03	-0.12	0.22	0.09

1) x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 分别表示5~10 mm、2~5 mm、1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 团聚体全氮贮量, y 表示土壤净氮矿化速率;黑体字表示直接途径系数

3 讨论

3.1 植被恢复对团聚体粒径分布影响

团聚体的组成与分布特征对土壤养分的保持与供应、孔隙状况、水力性质和生物运动等有重要影响^[14].而土壤中团聚体的分布状况受土地利用类型、植被类型、土壤类型等多种因素的控制.本研究利用萨维诺夫干筛法对团聚体进行筛分表明,团聚体主要以>5 mm 与2~5 mm 粒径为主,两者共占68%~86%,而<2 mm 粒径所占比重较小,尤其是<0.25 mm 粒径含量均在5%以下.本研究中>2 mm 大团聚体数量明显偏高,而小团聚体尤其是<0.25 mm 微团聚体数量明显偏低.这可能主要是由于研究区成土母质的性质造成的,岩溶区石灰岩风化残留物主要以黏土矿物为主,土壤质地黏重,且钙含量较高.高的黏粒含量与富钙的土壤特征有利于

大团聚体的形成.且相关研究认为在有机碳含量较高、黏粒和氧化铁铝含量较低的土壤中,有机碳的作用占主导地位;而在有机质含量不高、黏粒和氧化铁铝含量较高的土壤中,团聚体的形成则主要依靠黏粒的内聚力和铁铝氧化物的胶结作用^[15].在本研究区<0.001 mm 黏粒含量在30%~50%,钙含量在2.13~6.88 mg·g⁻¹.从表6可以看出,土壤团聚体平均重量直径与黏粒含量、钙含量以及有机碳含量之间呈显著正相关关系,而与铁、铝含量之间的相关性不显著.因此,在本研究区,有机碳、黏粒以及土壤钙在团聚体的形成过程中均有重要作用.

人工植被恢复样地中土壤团聚体粒径分布特征与弃耕地相似,表明在短期内(6~11 a),人工植被恢复不能明显提高土壤大团聚体数量.而植被自然恢复样地中,大团聚体数量明显提高,自然草地的恢

复年限与人工林地年限大致相当,但大团聚体数量明显高于人工林地,可能是由于草本大量的根系对

土壤团聚体的团聚有积极作用,从而也表明了植被自然恢复在土壤大团聚体形成中的作用。

表 6 团聚体平均重量直径与土壤性质之间关系¹⁾

Table 6 Relationship between MWD of soil aggregate and soil properties

	有机碳	全钙	全铁	全铝	<0.001 黏粒
平均重量直径	0.56 *	0.64 *	0.31	0.38	0.55 *

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$, $n = 15$

3.2 植被恢复对团聚体氮库分布影响

土壤有机质与团聚体之间关系密切,是土壤团聚体形成过程中的重要胶结剂^[1],团聚体的形成过程与机制不同,会导致不同级别团聚体有机碳含量与赋存状态存在差异。而土壤有机碳、氮之间关系密切。本研究表明,研究区土壤各粒径团聚体全氮、碱解氮、轻组有机氮、总矿质态氮含量基本上表现出随团聚体粒径减小而增高的变化趋势,各粒级氮含量峰值基本上出现在 <0.25 mm 粒级,这与已有研究结果基本一致^[16,17]。土壤有机质很少以游离态形式存在于土壤中,而是被矿质颗粒牢固地吸附,与之结合在一起形成有机-无机复合体,团聚体粒径越小,比表面越大,吸附能力越强,吸附有机质也越多^[16],有机氮也随之被积累;同时,不同级别的团聚体对 NH_4^+ -N 的吸附能力也有差异,小级别的团聚体有较强的保存和吸附氮素养分的能力^[18]。因此,氮素含量表现出随团聚体粒径减小而增大的变化趋势。此外,岩溶区土壤黏粒含量高的属性也对团聚体团聚机制产生重要影响。团聚体的形成是层次性多级聚合的过程^[19],在土壤团聚过程中有机质与黏粒以及氧化物等粘结形成粒径较小的微团聚体,微团聚体在黏粒、真菌菌丝、根系以及微生物或植物根系分泌物等的作用下进一步形成大团聚体,在大粒径团聚体的形成过程中,黏粒可能依然是重要的胶结物质,其在胶结物质中所占的比重较大,从而对大粒径团聚体有机质含量产生“稀释效应”,因此有机氮含量随团聚体粒径增大而减小。研究表明,多年保护性种植或耕作后,新有机碳的固定主要发生在 <0.25 mm 团聚体中^[20],有机碳优先向小粒级团聚体积累^[21]。同时,本研究区有关凋落叶分解的研究表明,凋落叶分解系数与 $0.25 \sim 1$ mm 以及 <0.25 mm 粒径组团聚体轻组氮含量与贮量之间呈显著正相关关系(本研究尚未发表)。因此,研究区土壤小粒径团聚体尤其是 $0.25 \sim 1$ mm 与 <0.25 mm 粒径团聚体在有机氮的积累中有至关重要的作用,进入土壤的植物枯落物、根系分泌物与残落物以及

土壤微生物生命活动过程代谢产物等有机物质,经腐殖化、半腐殖化或直接与土壤小粒径团聚体结合,然后在团聚体逐级团聚过程中贮存在大团聚体中。

植被恢复改变了进入土壤有机物料的数量与类型,影响了与有机质转化及养分循环有关的土壤微域环境条件,从而影响了氮素在各级团聚体中的分配关系。本研究各植被自然恢复样地中,与弃耕地相比,草地、灌丛地、灌乔林地、乔木林地土壤各粒径团聚体各形态氮含量均有不同程度地增加,且增加的幅度从草地、灌丛地、灌乔林地到乔木林地依次增大,植被恢复能增加土壤氮含量。表明在岩溶石漠化区,随植被恢复时间的延长,植被类型的变化,植被生物量的增大,植被枯落物以及根系残落物等有机物料的归还量也随之增加,同时由于土壤生态功能的改善,对归还的有机物料的腐解功能改善,使得各形态氮在土壤中的含量增加,并通过土壤团聚体逐级团聚的过程在各级团聚体中贮存。在人工植被恢复模式中,与弃耕地相比,总体上金银花地土壤各粒径团聚体各形态氮含量增加的幅度较小。而人工林地的增加幅度大于金银花地。其中人工樟树林地各形态氮增长幅度基本上大于人工柳杉林地的增长幅度。表明在研究区较短的恢复年限内(6~11 a),金银花对土壤各级团聚体氮的改善能力小于人工林,而人工林中樟树林地的改善能力强于柳杉林。

3.3 团聚体氮对土壤氮贡献

团聚体氮对土壤氮的贡献是由某一粒径团聚体氮含量和相应粒径团聚体质量分数共同决定的,能表征该粒径团聚体氮素状况在全土中的地位。本研究结果表明,研究区各粒径团聚体氮对土壤氮贡献大小依次为 $5 \sim 10$ mm、 $2 \sim 5$ mm、 $0.25 \sim 1$ mm、 $1 \sim 2$ mm、 <0.25 mm,与团聚体质量分数基本一致,表明各粒径团聚体质量分数之间的差异大于氮含量之间的差异,其贡献率的大小基本上由质量分数决定。已有研究表明^[22],耕作以及土地利用方式的变

化对土壤团聚体破坏或团聚作用有重要影响,大团聚体对土壤有机碳、氮具有保护作用. 本研究结果显示,与弃耕地相比,草地、灌丛地、灌乔林地、乔木林地 > 2 mm 粒径大团聚体各形态氮贡献明显提高,尤其是 > 5 mm 粒径表现更为明显,表明随着植被恢复进程,土壤大团聚体的数量逐渐提高,进入土壤的有机物质在团聚体的逐级团聚过程中在大团聚体中贮存. 大团聚体对有机碳、氮贮存有重要意义. 在人工植被恢复样地中,金银花地各粒径团聚体各形态碳、氮贡献率与弃耕地相当,人工林地 > 2 mm 粒径团聚体贡献率略大于弃耕地,但 2 ~ 5 mm 粒径团聚体贡献率提高的幅度较大,表明人工林对土壤碳、氮的改善作用较强.

3.4 团聚体氮与土壤氮素矿化间关系

不同粒径团聚体在有机氮的矿化及养分供应方面的能力存在差异. 研究认为,较小的微团聚体有较好的有机质储备能力,而较大粒级的微团聚体中有机质易矿化,其养分的供应能力强^[23];大团聚体中的有机碳比微团聚体中的有机碳更易矿化^[24];黏粒中氮素较其它粒级更容易矿化^[25];土壤颗粒中 < 50 μm 粒级的氮素决定着土壤氮素供应能力的强弱^[26]. 本研究表明 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体氮贮量对土壤氮素矿化量的直接作用最大,其次是 > 2 mm 粒径,而 1 ~ 2 mm 与 < 0.25 mm 粒径团聚体氮贮量直接作用最小. 相关研究表明,1 ~ 2 mm 团聚体有机碳矿化速率最高,< 0.053 mm 粒级矿化速率最低,累积矿化量以 0.25 ~ 1 mm 团聚体最大^[27],0.25 ~ 2 mm 团聚体氮潜在矿化势最大,> 2 mm 与 < 0.053 mm 潜在矿化势最低^[28]. 本研究结果与上述结果有部分相似之处,< 0.25 mm 粒径团聚体对土壤氮素矿化量的直接贡献较小,而大粒径团聚体的贡献相对较大. 土壤各级团聚体数量在土体中的分布状况不同,相应地氮素含量、贮量及有机质的类型等在各级团聚体中的分配状况也存在差异,从而造成氮素矿化底物的物质基础不同. 同时,不同尺度的团聚体内部养分、通气、水分以及孔隙组合状况等微环境的不同^[29,30],也造成了微域生境中微生物生物量以及由微生物和酶参与的养分转化特性的差异^[31,32]. 因此,大团聚体内由于其相对疏松的结构、良好的孔隙组合及养分、水分、微生物群落等因素为氮矿化作用提供了更合适的环境,促进了矿化作用的进行. 但是,在大团聚对土壤氮素矿化量的贡献中,不同尺度的大团聚体之间同样存在差异,0.25 ~ 1 mm 贡献最大,其次为 > 2 mm,而 1 ~ 2

mm 最小,可能是由于团聚体内部参与氮素转化的微生物数量、密度以及种群等存在差异,从而对矿化过程产生影响. 研究显示,不同团聚体内氮素转化率不同的主要原因在于微生物生物量,而非微生物群落组成的差异^[33].

4 结论

(1) 各样地土壤团聚体以 5 ~ 10 mm 与 2 ~ 5 mm 粒径占绝对优势,与弃耕地相比各植被自然恢复模式能明显提高 5 ~ 10 mm 粒径团聚体数量. 而人工植被恢复模式样地土壤团聚体粒径分布规律与弃耕地相似,但人工林地土壤大团聚体的含量高于人工金银花地.

(2) 各样地土壤团聚体全氮、轻组氮、碱解氮、矿质氮含量基本上随团聚体粒径减小而增加,< 0.25 mm 粒径含量最高. 与弃耕地相比,植被自然恢复各样地,各粒径团聚体有机氮含量均有不同程度提高,总体上表现为弃耕地 < 草地 < 灌丛地 < 灌乔林地 < 乔木林地. 人工植被恢复各样地团聚体氮含量提高的幅度不大,但人工林对土壤氮的改善作用大于金银花.

(3) 各粒径团聚体有机氮库容量受团聚体粒径质量分数控制,其中 5 ~ 10 mm、2 ~ 5 mm 粒径团聚体有机氮库容量较大,土壤氮主要贮存于大团聚体中,大团聚体对土壤碳、氮的贮存有重要意义.

(4) 团聚体全氮贮量中,0.25 ~ 1 mm、5 ~ 10 mm、2 ~ 5 mm 粒径对土壤净氮矿化量贡献大,其它粒径贡献较小. 随植被恢复进程,> 5 mm 粒径土壤团聚体质量分数逐渐提高,大团聚体氮贮量相应提高,在增强土壤供氮能力的同时,加强了对有机氮的贮存与保护.

参考文献:

- [1] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between micro-aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, **79**(1): 7-31.
- [2] Guggenberger G, Zech W, Thomas R J. Lignin and carbohydrate alteration in particle-size separates of an oxisol under tropical pastures following native savanna [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, **27**(12): 1629-1638.
- [3] Davidson E A, de Carvalho C J R, Figueira A M, *et al.* Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment [J]. *Nature*, 2007, **447**(7147): 995-998.
- [4] 刘震, 徐明岗, 段英华, 等. 长期不同施肥下黑土和红壤团聚体氮库分布特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(6): 1386-1392.

- [5] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, **39**(5): 787-793.
- [6] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同类型土壤团聚体中氮库分布的研究[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(2): 304-313.
- [7] 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1045-1052.
- [8] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- [9] 廖洪凯, 李娟, 龙建, 等. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 240-247.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [11] Bhogal A, Hatch D J, Shepherd M A, *et al.* Comparison of methodologies for field measurement of net nitrogen mineralization in arable soils [J]. *Plant and Soil*, 1999, **207**(1): 15-28.
- [12] Hatch D J, Bhogal A, Lovell R D, *et al.* Comparison of different methodologies for field measurement of net nitrogen mineralization in pasture soils under different soil conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32**(4): 287-293.
- [13] 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.
- [14] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil and Tillage Research*, 1988, **11**(3-4): 199-238.
- [15] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对峨砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(8): 1703-1711.
- [16] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报, 2006, **26**(2): 364-372.
- [17] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(3): 170-174.
- [18] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, **33**(5): 65-71.
- [19] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [20] Gerzabek M H, Haberhauer G, Kirchmann H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundance in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(2): 352-358.
- [21] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. *Plant and Soil*, 1997, **191**(1): 77-87.
- [22] 罗友近, 魏朝富, 李渝, 等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 257-266.
- [23] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, **38**(1): 49-53.
- [24] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1991, **34**(1-4): 407-419.
- [25] Chichester F W. Nitrogen in soil organo-mineral sedimentation fractions [J]. *Soil Science*, 1969, **107**(5): 356-363.
- [26] 王岩, 杨振明, 沈其荣. 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究[J]. 土壤学报, 2000, **37**(1): 85-94.
- [27] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 等. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(9): 1944-1950.
- [28] 刘玮, 蒋先军. 耕作方式对土壤不同粒级团聚体氮素矿化的影响[J]. 土壤, 2013, **45**(3): 464-469.
- [29] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤, 2011, **43**(5): 720-728.
- [30] 周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射微 CT 研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(12): 343-347.
- [31] 邱现奎, 董元杰, 万勇善, 等. 不同施肥处理对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, **42**(2): 249-255.
- [32] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 茶园土壤团聚体中微生物量碳、氮的分布特征[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(15): 3162-3168.
- [33] Muruganandam S, Israel D W, Robarge W P. Nitrogen transformations and microbial communities in soil aggregates from three tillage systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, **74**(1): 120-129.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong	(3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i>	(3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i>	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i>	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li	(3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i>	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i>	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i>	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i>	(3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i>	(3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i>	(3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i>	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i>	(3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i>	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i>	(3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i>	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i>	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i>	(3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i>	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i>	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i>	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i>	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i>	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i>	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i>	(3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i>	(3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i>	(3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i>	(3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i>	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i>	(3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i>	(3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i>	(3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i>	(3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i>	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i>	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i>	(3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i>	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i>	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i>	(3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i>	(3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i>	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i>	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i>	(3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan, <i>et al.</i>	(3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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